TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

FAKULTÄT I
INSTITUT FÜR SPRACHE UND KOMMUNIKATION
FACHGEBIET AUDIOKOMMUNIKATION

MAGISTERARBEIT

SCHALLLEISTUNG VON MODERNEN UND HISTORISCHEN ORCHESTERINSTRUMENTEN

TEIL II: SCHLAGINSTRUMENTE UND BLASINSTRUMENTE

VORGELEGT VON
ERIK DETZNER

[redacted]

ERSTGUTACHTER: PROF. DR. STEFAN WEINZIERL
ZWEITGUTACHTER: FABIAN BRINKMANN
ABGABEDATUM: 28.05.2015

Die selbstständige und eigenständige Anfertigung dieser Magisterarbeit versichere ich an Eides statt.

Berlin, den 28.05.2015

Erik Detzner

INHALTSVERZEICHNIS

I. EINLEITUNG 1
II. TONERZEUGUNG UND ENTWICKLUNGEN VON BLASINSTRUMENTEN 2
A. Prinzipien der Tonerzeugung 3
1. Schwingungsanregung und Resonanzrohr 3
2. Mundstück, Anblasloch und Vokaltrakt 5
3. Tonloch, Register, Zug und Ventil 8
4. Becher, Sturz und Schallstück 8
B. Entwicklungen im Instrumentenbau 9
1. Resonanzrohr 9
2. Mundstück und Anblasloch 10
3. Tonloch 11
4. Becher, Sturz und Schallstück 12
III. STAND DER FORSCHUNG 13
IV. METHODIK 14
A. Analysevorbetrachtung 14
B. Schallleistungspegel 15
C. Schallenergiepegel 15
1. Besonderheiten der Datenbasis 16
2. Bestimmung des Toneinsatzes 16
3. Berechnung der Abklingzeiten 17
V. ERGEBNISSE 18
A. Flöte 20
B. Oboe 21
C. Klarinette 22
D. Saxophon 23
E. Fagott 24
F. Horn 26
G. Trompete 26
H. Posaune 27
I. Tuba 29
J. Harfe 30
K. Gitarre 31
L. Pauke 33
VI. DISKUSSION 35

ANHANG 41
A. Übersicht der Instrumente 41
1. Holzblasinstrumente 41
2. Blechblasinstrumente 42
3. Zupf- und Schlaginstrumente 42
B. Grafische Benutzeroberfläche 43
1. Programmstart und Benutzereingabe 44
2. Darstellung 46
3. Speicherung 48

Schallleistung von modernen und historischen Orchesterinstrumenten, Teil II: Schlaginstrumente und Blasinstrumente

Erik Detzner

Fachgebiet Audiokommunikation, TU Berlin, Deutschland

Aufgrund der offensichtlichen klangfarblichen Unterschiede von Orchesterinstrumenten moderner und historischer Bauweise wurde allgemein angenommen, dass eine höhere Durchsetzungskraft, in der Regel den modernen Instrumenten zugeschrieben, mit einer Erhöhung der vom Instrument erzeugten Schallleistung korreliert. Um diese Hypothese zu verifizieren wurden in einer Messreihe für eine große Anzahl von Orchesterinstrumenten in moderner und historischer Bauart schalldruckkalibrierte Aufnahmen im reflexionsarmen Vollraum erstellt. Von professionellen Orchestermusikern wurden Einzeltöne und Tonleitern in verschiedenen Dynamikstufen über den gesamten chromatischen Tonumfang eingespielt. In der Auswertung wurden die maximal und minimal erreichten Schallleistungen und Dynamikbereiche für Einzeltöne und Tonfolgen ermittelt. Es wurden systematische Unterschiede für die untersuchten Blasinstrumente moderner oder historischer Bauweise festgestellt. Zusammen mit den Ergebnissen der Streichinstrumente [1] wurde eine empirisch - basierte Berechnung der Schallleistung von modernen und historisch besetzten Orchestern und Ensembles möglich.

I. EINLEITUNG

Die charakteristischen Klangeigenschaften der Musikinstrumente des 18. und 19. Jahrhunderts [2, S. 280], [3, S. 136], im Vergleich zu denen der modernen Orchesterinstrumente, sind ein wesentliches Element einer historisch informierten Aufführungspraxis. Wenngleich der Einsatz von Instrumenten historischer Bauweise, ob im Original erhalten oder individueller Nachbildung, im heutigen Konzertbetrieb weit verbreitet und integriert ist, gibt es bisher wenig verfügbare Daten, die die akustischen Unterschiede zu modernen Instrumenten dokumentieren. Folglich wird noch immer allgemein angenommen, dass ein höheres Durchsetzungsvermögen, typischerweise den modernen Instrumenten zugeschrieben, im Wesentlichen auf Veränderungen im Aufbau, die sowohl spektrale Unterschiede sowie eine Erhöhung der Schallleistung implizieren, zurückzuführen ist. Eine derartige subjektive Einschätzung kann zu zahlreichen Blasinstrumenten in Aussagen von Forschern, Musikinstrumentenbauern und Musikern gleichermaßen gefunden werden. Beispielsweise verweist Welch in seinem Werk zur Geschichte der Böhm Flöte [4, S. 250–252] auf einen ursprünglich von Dr. Schafhäutl verfassten und im Januar 1834, Auszug in „Der Bazar“ sowie in Gänze in „Die Allgemeine Musikalische Zeitung“, erschienen Bericht über die Eigenschaften der von Theobald Böhm entwickelten Flöte. In diesem Bericht, anlässlich eines Konzertes, Beethovens Symphonie in D-Dur, unter der Leitung von Herrn Treichlinger, „Theater an der Wien“, im Odeon im Jahre 1833, beschreibt der Verfasser die Eindrücke zum Klangbild dieser Flöte fortschrittlicherer Bauweise als

„gleichmäßig vollkommen, klar und kräftig“ und weiter in piano Passagen als „sehr zart“ sowie im forte als „dreimal so kraftvoll im Gegensatz zur gewöhnlichen Flöte“. Im Vergleich zu dieser Beschreibung wird das Klangbild der früher gebräuchlichen 1-Klappenflöten als „natürlich für diese Instrumente verstimmt zu sein“ [5, S. 180] dargestellt. Baines beschreibt die „mittlere Lautstärke“ der historischen im Vergleich zur modernen Oboe als „etwas weniger“ [2, S. 280]. Am Beispiel einer Klarinette in historischer Bauweise verweist ein zeitgenössischer Artikel [5, S. 188] auf einen für eine Vielzahl von Blasinstrumenten zutreffenden spielpraktischen Aspekt. Offenbar war das Spielen des Instrumentes „mit Schwierigkeiten verbunden, welche, wenn nicht bewältigt, zu unbeschreiblichen gurren und quietschen führen konnten“. Curt Sachs schreibt schließlich über das Anfang des 19. Jh. gebräuchliche Alt-Instrument der Querflöte, dass “die vielen offenen Klappen und die verlängerte Röhre Klang und Handhabung verschlechterten“ [3, S. 8]. Infolge der instrumentenbaulichen Umgestaltung der Blasinstrumente, im Allgemeinen, wurden Handhabung und die für die Klangbildung ungünstige Form verbessert, sowie im Speziellen der Flöte, vorerst unter „den heikelsten und schwächsten aller Orchesterinstrumente“ rangierte diese, „künftig unter den vollkommensten Blasinstrumenten“ [4, S. 252].

Obwohl solche Aussagen natürlich im Kontext ihrer Zeit gesehen werden müssen, beweisen sie jedoch, dass bereits in den letzten Jahrhunderten eine Erhöhung von Projektion und Durchsetzungsvermögen als Qualitätskriterium der Instrumente angesehen worden ist. Dennoch ist es wissenschaftlich ungeklärt, ob solche klar erkennbaren klangbildlichen Unterschiede ausschließlich auf Änderungen im Spektrum der Obertöne [6] beruhen oder auch dem bisher kaum untersuchten Parameter der Schallleistung zuzuschreiben sind. Die vorliegende Untersuchung soll zeigen, ob derartige Anmerkungen, angesichts systematischer Veränderungen der erzeugten Schallleistung historischer und moderner Orchesterinstrumente begründet und inwiefern ein, den modernen Instrumenten zugeschrieber, höherer Grad an Projektion und akustischer Durchsetzungskraft nachgewiesen werden können. Folglich wurde in einer umfangreichen Messreihe im reflexionsarmen Vollraum für alle Instrumente des klassisch - romantischen Symphonieorchesters und verschiedener Entwicklungsstufen der gesamte Dynamikumfang entsprechend der Hüllflächenmethode ermittelt. In der Weiterführung umfasst dieser zweite Teil der Dokumentation Blas-, Zupf- und Schlaginstrumente. Desweitern wird eine empirische basierte Berechnung der Gesamtschallleistung sowie die Darstellung der Klangbalance zwischen den drei Instrumentengruppen von Orchestern und Ensembles aus verschiedenen Epochen unter Einbeziehung der Streichinstrumente [1] ermöglicht.

II. TONERZEUGUNG UND ENTWICKLUNGEN VON BLASINSTRUMENTEN

Das charakteristische Klangbild der Blasinstrumente wird maßgeblich definiert durch die Resonanzeigenschaften der eingeschlossenen Luftsäule. Folglich wird die Resonanzausprägung bestimmt durch die Dimensionen des Mundstücks, Resonanzrohres und Schalltrichters [7]. Diese Komponenten beeinflussen somit das erzeugte Klangspektrum. Die Prinzipien der Tonerzeugung von Blasinstrumenten sind seit dem 19. Jh. [8] bis in die Gegenwart [9], [10] Gegenstand zahlreicher Publikationen. Die Einflüsse der einzelnen Komponenten auf die Tonerzeugung sind detailliert für ausgewählte Blasinstrumente u.a. in [11], [12] beschrieben. In diesem Abschnitt werden in einem kurzen Überblick die wesentlichen Komponenten, deren Modifikationen seit dem 18. Jahrhundert, sowie die Auswirkungen auf Tonerzeugung und somit auf den Klang anhand typischer Beispiele dargestellt und falls nötig auf weiterführende Literatur verwiesen.

A. Prinzipien der Tonerzeugung

Um einen Einblick über die Mechanismen der Tonerzeugung von Blasinstrumenten zu erhalten, ist es angebracht die beteiligten Komponenten hinsichtlich der akustischen Eigenschaften und deren Interaktion darzustellen. Im Wesentlichen kann das grundlegende Prinzip der Tonerzeugung in mehreren aufeinander folgenden Schritten beschrieben werden. Zunächst wird ein Blasinstrument zur Tonerzeugung angeregt, indem ein Musiker Luft in ein Mundstück bzw. über ein Anblasloch in das Resonanzrohr bläst und aufgrund der Resonanzeigenschaften der eingeschlossenen Luftsäule, diese in Schwingung versetzt. Mehrere Parameter der Luftsäule sind hier bestimmend für die Entstehung der Resonanz. Schließlich wird am anderen Ende, zum Beispiel über den Schallbecher, ein Teil der Energie als Schallwelle emittiert. In den folgenden Abschnitten werden diese verschiedenen Schritte im Detail diskutiert und die maßgeblichen Teilaspekte die für die verschiedenen Klangeigenschaften der Blasinstrumente bestimmend sein können berücksichtigt.

1. Schwingungsanregung und Resonanzrohr

Wichtigstes Unterscheidungsmerkmal, abgesehen vom Material der Blasinstrumente, ist die Form des Resonanzrohres und damit einhergehend die Schwingungsanregung als Ursache der Erzeugung von Tönen. Für die Betrachtung der verschiedenen Formen der Anregung von Schwingungen werden die Blasinstrumente in drei vereinfachte Grundformen unterteilt. Bestimmend für die Unterteilung ist die Form des Resonanzrohres. Anhand idealisierter Konturen, der Schallschnelle- und Schalldruckverläufe in Abb. 1, wird die Ausprägung stehender Wellen, somit akustischer Resonanz und daran ableitend die spezifischen Frequenzcharakteristika der Blasinstrumente erläutert.

Am offenen Ende des Resonanzrohres ist der Druck in etwa gleich dem Luftdruck, d.h. der Schalldruck ist Null und die Schallschnelle maximal. Am geschlossenen Ende ist der Schalldruck maximal und die Schallschnelle Null. Basierend auf diesen Bedingungen wird näher auf die verschiedenen Resonanzausprägungen der drei Rohrformen an Beispielen der typischen Vertreter der Blasinstrumente eingegangen.

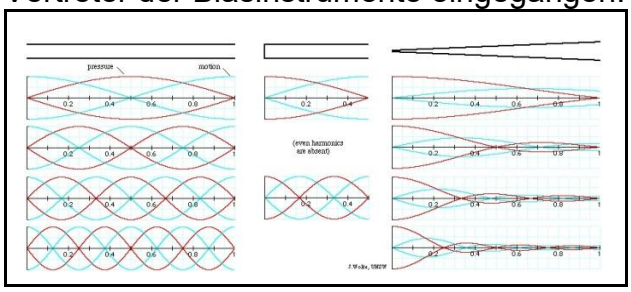

Abbildung 1: rot: Schalldruck, blau: Schallschnelle. Idealisierte Grundformen und Ausprägung der akustische Resonanz von Blasinstrumenten, links: offener Zylinder (Flöte), Mitte: geschlossener Zylinder (Klarinette), rechts: Kegel (Oboe) [13].

Die Flöte hat eine nahezu zylindrische Grundform und beide Enden dieses Zylinders sind offen. Durch Wechselwirkung des an der Anblaskante gebrochenen Luftstromes, Luftblatt, und der Resonanzeigenschaft, der innerhalb des Flötenrohres eingeschlossenen Luftsäule, wird der Luftstrom abwechselnd nach innen, in das Flötenrohr, und außen, zur Umgebungsluft, abgelenkt. Es entsteht folglich ein schwingender Luftstrom. Dieser oszillierende Luftstrom wird an jeder Änderung des Querschnitts des Resonanzrohres teilweise reflektiert, so z.B. auch am offenen Ende des Instrumentes. Für den beidseitig offenen Zylinder bilden die Frequenzen der Resonanzen eine harmonische Reihe, 1*f*, 2*f*, 3*f*, 4*f*, etc., wobei *f* Grundfrequenz genannt wird. Wird beispielsweise für die Wellenlänge λ entsprechend die Länge des Zylinders von L = 0,6 m und die Ausbreitungsgeschwindigkeit c von Schall in Luft mit einbezogen, beträgt die niedrigste Grundfrequenz, anhand Gl. (1), rund 280 Hz. Diese entspricht ungefähr der Grundfrequenz des Tones C4.

$$\bar{\lambda} \qquad (1)$$

Die Klarinette hat ebenfalls eine zylindrische Grundform, ist offen am Trichter / Becher, jedoch am anderen Ende durch ein schwingendes Rohrblatt, Mundstück und den Mund des Spielers geschlossen, Abb. 1. Zu dieser geometrischen Grundform zählen beispielsweise ebenso die Blechblasinstrumente Posaune und Trompete. Die schwingenden Lippen des Spielers übernehmen die Funktion des Rohrblattes der Holzblasinstrumente. Das Mundstück, Kessel- oder Trichterform, dient als luftdichter Abschluss gegenüber der Umgebung. Einerseits beeinflusst das schwingende Rohrblatt bzw. die schwingenden Lippen des Bläsers den Luftstrom in das Instrument, andererseits werden das Rohrblatt und die schwingenden Lippen durch die Resonanzen der eingeschlossenen Luft beeinflusst. Diese Resonanzen entstehen an den ungeraden Vielfachen der Grundfrequenz. Dies ist als eine Ursache für die charakteristische Klangfarbe, zumindest im unteren Register, der Klarinette anzusehen. Wird wiederum die Länge der Klarinette mit einbezogen beträgt die tiefste Grundfrequenz, 140 Hz, nach Gl. (1), eine Oktave tiefer als die der Flöte.

Oboe, Saxophon sowie Instrumente der Horn- und Tubafamilie bilden als kegelförmige Instrumente die dritte Grundform, Abb. 1. Diese sind am Becher, Schallaustrittspunkt, offen und am anderen Ende z.B. durch das Doppelrohrblatt im Mundstück und den Mund des Spielers verschlossen. Doppelrohrblatt und Resonanzen der eingeschlossen Luft beeinflussen den eintreffenden Luftstrom. Eine Druckwelle verteilt sich mit zunehmender Entfernung vom Mundstück, dem nahezu geschlossenen Ende, über einen größeren Querschnitt des Kegels. Ähnlich dem Verhalten der Schallausbreitung im Freien gilt hier für die Amplituden der Druckverläufe das Abstandsgesetz. Demnach ist der Schalldruck p umgekehrt proportional zum Abstand r, folglich $p \sim 1/r$. Beispielsweise wird beim Verdoppeln des Abstands r der Schalldruck p halbiert. Basierend auf diesen Bedingungen bilden die Frequenzen der Resonanzen eine harmonische Reihe. Die niedrigste Frequenz der harmonischen Reihe beträgt hierbei 280 Hz, vgl. Absatz Flöte. Zusätzlich ist zu bemerken, dass die Amplituden der Druckverläufe das Abstandsgesetz berücksichtigen, vgl. Schalldruck in Abb.1, rechts, und sich folglich auf das erzeugte Klangbild auswirken.

Dieses soeben beschriebene Verhalten der Resonanzausprägungen der drei typischen Instrumentenformen konnte unter Verwendung der akustischen Impedanz nachgewiesen werden [14]. Die akustische Impedanz $Z(\omega)$, Gl. (2), ist für die Schallausbreitung in einer Röhre definiert als frequenzabhängiges Verhältnis von Schalldruck $p(\omega)$ und Schallfuss bzw. Volumenfluss $Q(\omega)$. Der Volumenfluss $Q(\omega)$ wird aus dem Produkt von Schallschnelle $u(\omega)$ und der durchströmten Querschnittsfläche S gebildet.

$$\omega \quad \frac{\omega}{\omega}, \text{ mit } \omega \;\; 2 \qquad (2)$$

Aufgrund der Frequenzabhängigkeit ist die akustische Impedanz $Z(\omega)$ als Spektraldiagramm darstellbar, Abb. 2. Um einen Ton mit einer Grundfrequenz f bzw. 1. Harmonische zu erzeugen, erfordert es Extrema der Impedanzkurve bei f und auch an den Stellen der Harmonischen $2f$, $3f$, $4f$, etc. Je stärker ausgeprägt und genauer diese Extrema sich in der Nähe der Harmonischen befinden desto präziser wird der Ton getroffen und somit die Spielbarkeit des Instrumentes erleichtert.

Beispielsweise ist die Flöte am Ansatz teilweise offen zur Umgebung, somit der Druck am Ansatz nahe dem Umgebungsdruck und der Druckunterschied nahe Null. Der Luftstrom, also ein Volumenfluss, wird durch den Bläser erzeugt. Oszilliert der Volumenfluss, kann dieser die Anblasluft nach innen und außen ablenken. Die Flöte produziert bei kleinen Druckdifferenzen und großen Volumenflussänderungen, somit bei den Minima von $Z(\omega)$, einen Ton. Das Impedanzspektrum eines Tones der Flöte weist einige deutliche Minima auf. Die Harmonischen eines erzeugten Tones entsprechen den Frequenzen dieser Minima im Impedanzspektrum.

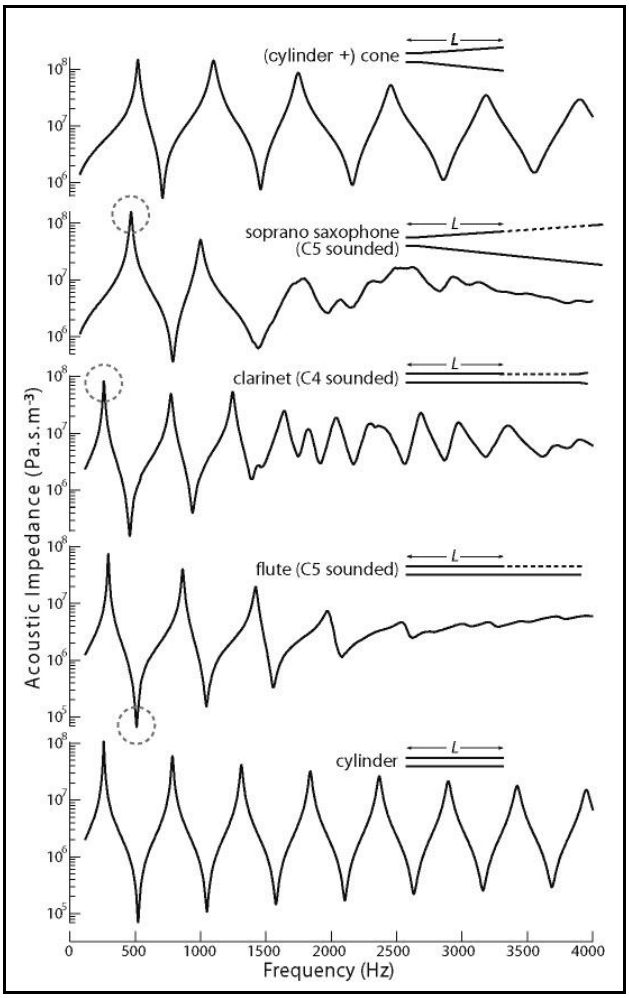

Abbildung 2: Akustische Impedanz $Z(\omega)$ der Formen des Resonanzrohres gleicher Länge, durch einen Kreis Tonerzeugung des Instrumentes im Minimum oder Maximum gekennzeichnet [14, S. 4].

Andere Blasinstrumente besitzen ein Rohrblatt oder sind durch den Mund des Bläsers an einem Ende geschlossen. An dieser Stelle sind die Druckdifferenzen hoch und Volumenfluss klein, somit wird bei den Maxima von $Z(\omega)$ ein Ton erzeugt. Die Harmonischen des Tones entsprechen den Frequenzen dieser Maxima im Impedanzspektrum. Stabilität und Präzision einer produzierten Tonhöhe hängen von der Größe und der Begrenztheit dieser Extrema ab. Sind im Spektrum der Impedanz bei hohen Tönen die Minima bzw. Maxima beispielsweise weniger stark ausgeprägt „hilft“ das Instrument dem Spieler bei der Tonerzeugung weniger. Weiterhin sollte erwähnt sein, dass die Amplituden der Spektren, Abb. 2, besonders bei den hohen Frequenzen aufgrund der Reibungsverluste der Luft mit den Rohrinnenwänden schwächer werden.

2. Mundstück, Anblasloch und Vokaltrakt

Die Ursache zur Erzeugung von Tönen ist der Luftstrom aus den Lungen des Musikers. Luftmenge und Druck können durch den Musiker variiert werden. Ferner sollten die Parameter des Anblasloches, Mundstückes und oder (Doppel-) Rohrblattes der Blasinstrumente berücksichtigt werden.

Bei Flöteninstrumenten können durch Änderung der Luftmenge aus den Lungen oder Position der Lippen am Anblasloch ohne Öffnen zusätzlicher Tonlöcher oder Klappen Töne verschiedener Tonhöhe angespielt werden. Hierbei sind Formgebung der Lippen, Stellung der Oberlippe zur Unterlippe, Anblaswinkel etc. entscheidende Faktoren für die Tongebung. Darüber hinaus sind Größe, Form und Kantenbeschaffenheit des Ansatzloches sowie die Position dessen an der Flöte bestimmend für die Ausprägung der Schwingungen der eingeschlossenen Luftmenge im Resonanzrohr. Die Position des Korks, normalerweise 17 mm von der Mitte des Anblasloches entfernt, im Kopfstück der modernen Querflöte ist entscheidend für die eingeschlossene Luftmenge zwischen Kork und Anblasloch. Diese eingeschlossene Luftmenge bildet zusammen mit dem Anblasloch einen Helmholtz-Resonator. Die Resonanzfrequenz des Resonators ist ausschlaggebend für die Kompensation der frequenzvermindernden Effekte des Fußstücks, das Stimmen und Begrenzung des Tonumfangs der Flöte [15].

Bei Instrumenten mit (Doppel-) Rohrblatt wird das Rohrblatt des Mundstückes beim Anblasen durch den Lippendruck, den Luftdruck und der Berührungsfläche zwischen dem Rohrblatt kontrolliert und in Vibration versetzt. Die Energie der Vibrationen des Rohrblattes wird an die Luftsäule im Inneren des Instrumentes weitergegeben und regt diese zu Schwingungen an.

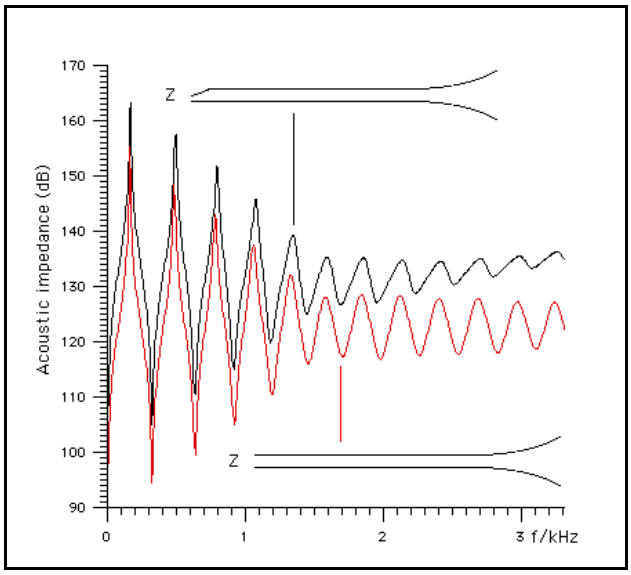

Abbildung 3: Akustische Impedanz $Z(\omega)$ eines Zylinders gleicher effektiver Länge mit Schallstück und ohne Mundstück (rot) bzw. mit Schallstück und Mundstück (schwarz) [16].

Das entstandene schwingende Luftvolumen innerhalb des Mundstückes erhöht die Impedanzextrema des Rohres über den gesamten Frequenzbereich. Dieser Effekt beeinflusst besonders die Maxima der Impedanzkurve. Diese sind in den höheren Resonanzfrequenzen deutlich höher und zu höheren Frequenzen verschoben. Die Minima sind schwächer ausgeprägt und zu niedrigeren Frequenzen verschoben. Maßgebend für die Tonhöhenverschiebung, tiefere Tonhöhe, ist die Erhöhung der Impedanz der unteren Frequenzmaxima, die deutlich geringere Ausprägung der Extrema in den höheren Frequenzen, Abb. 3., und somit resultierend eine Begrenzung der höchsten anspielbaren Tonhöhe. Die Steifigkeit des Rohrblattes und Luftmenge innerhalb des Mundstückes beeinflusst insbesondere bei hohen Frequenzen ebenfalls die Ausprägung der Resonanzen. Aufgrund der größeren Schwingungsneigung verringern weiche Rohrblätter die Frequenzen der Resonanz stärker, jedoch mit geringerer Amplitude, als harte Rohrblätter. Soll ein Ton sehr laut erzeugt werden, sind die Schwingungen des Rohrblattes groß, zum Teil schlägt das Rohrblatt am Mundstück auf und verschließt somit die Öffnung des Instrumentes kurzzeitig. Das Rohrblatt produziert im Spektrum zunehmend gerade und ungerade Harmonische. Aufgrund der Form des Rohres der Klarinette, einseitig geschlossener Zylinder, werden jedoch vor allem im unteren Register die ungeraden Harmonischen durch die Resonanzen des Rohres verstärkt. Folglich sind im Klangspektrum speziell der unteren Register die ungeraden verstärkt und die geraden Harmonischen abgeschwächt [14], [17].

Bei Blechblasinstrumenten wird der Luftstrom durch die schwingenden Lippen des Musikers kontrolliert. Die Schwingungen der Lippen werden bei konstanter Lippenspannung durch Kräfte der Aerodynamik, Elastizität und Wechselwirkungen mit den Resonanzen des Instrumentenrohres beeinflusst. Die Amplitude der Lippenschwingungen steigt mit zunehmendem Druck, nimmt aber mit zunehmender angespielter Tonhöhe ab. Verantwortlich für den blechernen Klang dieser Instrumente ist somit nicht die Amplitude der Lippenschwingungen [12, S. 73–116], [18]. Blechblasinstrumente verwenden Kessel-, Trichter- und Bechermundstücke in diversen Formen und Größen zur Aufnahme der vibrierenden Lippen des Musikers und zum luftdichten Abschluss des Instrumentes. Das entstandene schwingende Luftvolumen am Mundstück bildet zusammen mit der Luftmenge in der Mensur einen Helmholtz-Resonator mit einer eigenen Resonanzfrequenz und beeinflusst folglich den Klangcharakter des Instrumentes. Im Gegensatz zu den frequenzerhöhenden Effekten der Stürze verringert es zum Einen die höchsten Resonanzfrequenzen und zum Anderen verstärkt es die Resonanzen des Rohres. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass bei einer Zunahme des Druckes im Mundstück um den Faktor 2 oder 3, der produzierte Schalldruck des Instrumentes um den Faktor 10 oder mehr steigt [12, S. 188].

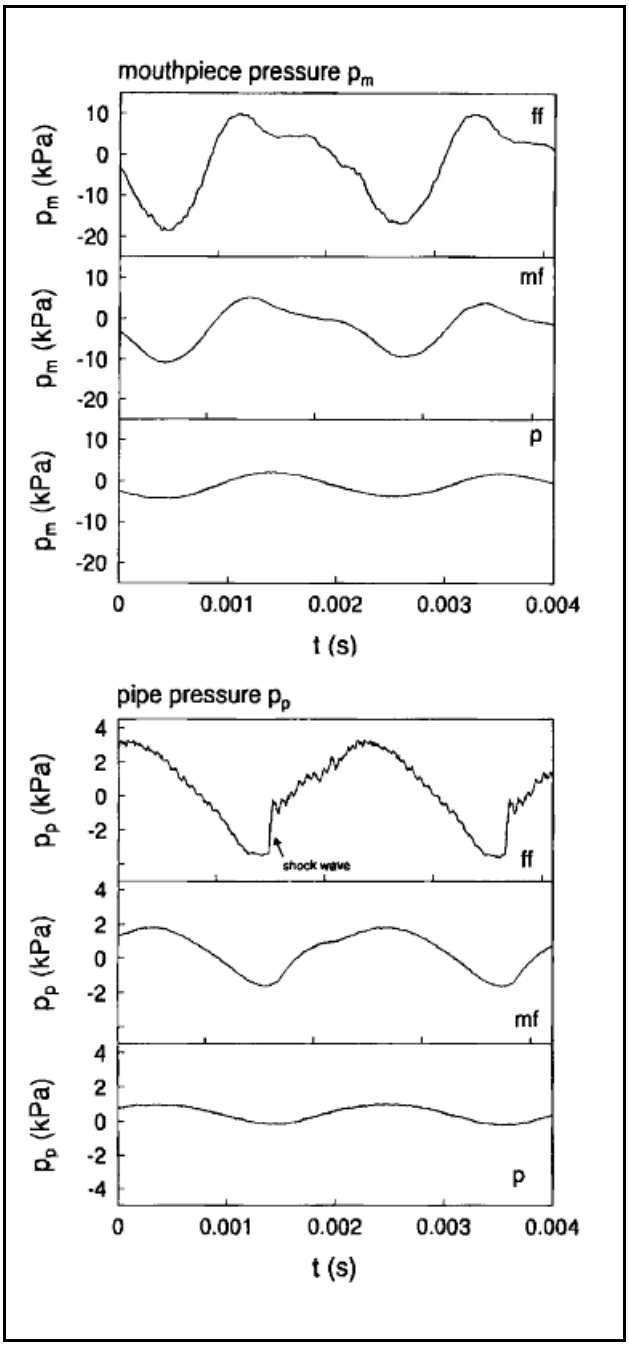

Abbildung 4: Ermittelte Schalldruckverläufe in den Dynamikstufen piano (*p*), mezzoforte (*mf*) und fortissimo (*ff*) im Mundstück (oben) und Rohr (unten). Bei steigender Dynamik zunehmende Tendenz zu nicht harmonischen Verhalten des Schalldrucks im Mundstück und nichtlineare Ausbreitung der Druckwellen im Rohr [19].

Die Erhöhung des Schalldruckes im Mundstück, Komprimierung der Luft durch den kleineren Querschnitt am Mundstückübergang zum Rohr, und die resonanzverstärkende Bauform des Rohres bestimmen die Ausprägung von Schockwellen – nichtlineares Verhalten – innerhalb des Instrumentes und somit die frequenzabhängige Energieübertragung, tiefe Frequenzanteile im Spektrum steigen weniger stark als hohe, sowie der Erzeugung nicht harmonischer spektraler Anteile, Abb. 4 [19].

Grundsätzlich gilt, dass die Schärfe der Innenkante des Kessels mit der Schärfe des Klanges korrespondiert, d.h. je flacher der Kessel, desto heller und schärfer, aber mit weniger Klangvolumen, ist der Klang. Je tiefer der Kessel, umso mehr Volumen und umso weicher und runder ist der Klangcharakter. So haben Trompeten ein flaches Mundstück mit scharfer Kante und einer Kesseltiefe von ca. 10 mm. Diese Form des Mundstücks bewirkt eine brillante, scharfe, helle und glänzende Tongebung. Posaunen verwenden größere Kesselmundstücke, die den Lippen größere Vibrationen erlauben. Nur so können auch tiefere Frequenzen zum Klingen gebracht werden. Hörner werden mit einem tiefen Trichtermundstück geblasen, das sehr weiche Klänge ermöglicht. Der Durchmesser entspricht dem eines Trompetenmundstücks, wodurch im tiefen Register kräftige Töne gespielt werden können. Für tiefe Flügelhörner und auch für Tuben verwendet man ein Bechermundstück, das einen weichen Klang produziert und dessen Ansatz leichter ist als beim Trichtermundstück. Die hohen Naturtöne werden weniger gefördert als beim Kesselmundstück [20].

Ein weiterer Aspekt der Wechselwirkungen zwischen den Resonanzen der Luftmenge innerhalb des Instrumentes mit der veränderlichen Luftmenge innerhalb des Rachenraums des Musikers ist nicht immer systematisch nachweisbar [21], [22]. Untersuchungen des Resonanzverhaltens des Vokaltraktes von Klarinettenspielern zeigen, dass diese beim Spielen von Noten über ein Register die Parameter nahezu konstant halten. Andererseits ändern sich beim schnellen Wechsel der Register die Parameter wesentlich und dadurch die Impedanz des Vokaltraktes und beeinflussen somit das Resonanzverhalten [18], [23].

3. *Tonloch, Register, Zug und Ventil*

Die Länge des Resonanzrohres bestimmt die erzeugte Tonhöhe. Grundsätzlich gelten die folgenden Effekte: Je länger die Röhre, umso tiefer ist die Tonhöhe und umso höher die Anzahl der Teiltöne, die gespielt werden kann. Je weiter die Röhre im Verhältnis zu seiner Länge, desto leichter sprechen die 1. Harmonischen an, aber umso schwieriger ist es, höhere Frequenzen zum Klingen zu bringen. Sie enthalten nur die tiefsten Teiltöne, was eine dunklere Klangfarbe ergibt. Enge Röhren produzieren wiederum zahlreiche hohe Obertöne.

Blechblasinstrumente besitzen in der Regel Züge oder zusätzlich Ventile zur Änderung der Länge des Resonanzrohres und somit der Tonhöhe. Zur Veränderung der anzuspielenden Tonhöhe werden bei den Holzblasinstrumenten die Tonlöcher oder Klappen des Resonanzrohres verwendet. Durch sukzessives Öffnen von Tonlöchern Richtung Ansatz wird das Resonanzrohr kürzer, somit das Druckminimum der Druckwelle, Abb. 1, verschoben. Dieser Effekt ist auch bestimmend für die Funktion der Registerlöcher. Die Verschiebung des Druckminimums ist jedoch abhängig von der jeweiligen Resonanzfrequenz. Für hohe Resonanzfrequenzen ist die Masse der Luft im offenen Tonloch zu groß um diese effektiv zu bewegen, folglich wirkt es als Hochpassfilter. Die Grenzfrequenz, 1,5 – 2 kHz, dieses Filters steigt mit der Größe der Tonlöcher [24].

$$0{,}110 - \frac{}{\sqrt{}} \qquad (3)$$

Mit Hilfe der Gl. (3), 1976 von Benade [25], [26, S. 13], wird unter Verwendung der relevanten Parameter die Grenzfrequenz der Flöte berechnet. Mit den Parametern der Radien b und a für Tonloch respektive Rohr, v der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls in Luft, s die halbe Distanz zwischen den Mittelpunkten angrenzender Tonlöcher und t_e die effektive Länge, wobei diese ca. die geometrische Länge plus 1,5 b beträgt, lässt sich die Grenzfrequenz f_c bestimmen. Unterhalb von f_c breiten sich die Wellen entlang der Tonlöcher mit Abschwächung und oberhalb von f_c ohne Abschwächung aus. Die Grenzfrequenz beeinflusst des Weiteren die höchste spielbare Note der Flöte. Somit bestimmen die Parameter der Tonlöcher Tonumfang, Klangfarbe und Schallleistung [24].

4. *Becher, Sturz und Schallstück*

Die meisten Blasinstrumente verfügen im Anschluss des Rohres über eine kegelförmige Erweiterung, z.B. die Mensur, gefolgt von einer weiteren kegelförmigen Erweiterung, Schallstück oder Stürze. Die Form dieser Erweiterungen ist bestimmend für das frequenzabhängige Verhalten eines Hochpassfilters. Hohe Resonanzfrequenzen werden durch die Erweiterung am Ende des Zylinders effektiver emittiert. Somit werden die Extrema der höheren Frequenzen im Impedanzspektrum abgeschwächt. Ebenso werden die Extrema, aufgrund der Vergrößerung der effektiven Länge des Resonanzrohres, zu niedrigeren Frequenzen hin verschoben und treten ferner nahezu an den Frequenzen der Harmonischen auf, Abb. 5.

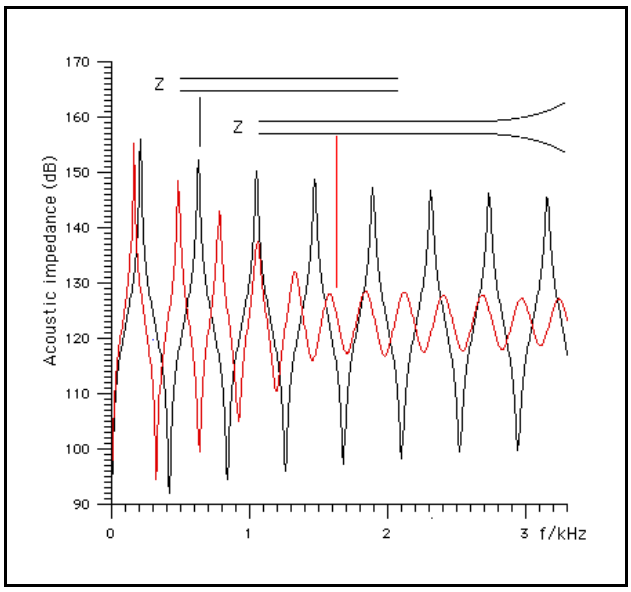

Abbildung 5: Akustische Impedanz $Z(\omega)$ eines Zylinders gleicher effektiver Länge mit Schallstück (rot) bzw. ohne Schallstück (schwarz) [27].

Die Auswirkungen der Stürze auf das Impedanzspektrum können somit auch im Hinblick auf das Klangbild des Instrumentes interpretiert werden. Die frequenzverändernden Effekte des Mundstücks und der

Stürze ermöglichen die Erzeugung von geraden und ungeraden Harmonischen, auch bei einseitig offenen Zylindern. Je weiter die Stürze, desto besser strahlt diese tiefere Töne ab. Erweitert sich die Stürze jedoch zu schnell, werden tiefe Töne schlecht abgestrahlt. Die Stürze unterdrückt dementsprechend gewisse Teiltöne. Bei der Verstärkung der Klangintensität spielt die Form der Stürze also zwei gegensätzliche Rollen. Eine zu breite Stürze vermindert die höheren Teiltöne und verringert die Brillanz des Klanges, wird die Stürze wiederum zu eng, strahlen die tiefen Frequenzen schlecht ab [12, S. 14].

B. Entwicklungen im Instrumentenbau

Die in dieser Arbeit untersuchten historischen und modernen Vertreter der Blasmusikinstrumente repräsentieren einen kleinen Teil ihrer langen Entwicklungsgeschichte. Die Veränderungen im Design und somit der Klangeigenschaften des Instrumentes sind ein Resultat eines sich verändernden Repertoires und klangästhetischen Empfindens der jeweiligen Epoche. Steigende Ansprüche, betreffend Tonumfang, Chromatisierung, und Klangqualität, sollten nun auch von den Blasinstrumenten erfüllt werden. Die Streichinstrumente erfüllten diese Ansprüche schon im 17. Jahrhundert. Somit ist es, wie schon im vorigen Absatz, angebracht die einzelnen Bestandteile eines Blasinstrumentes, dessen wesentlichen Veränderungen im Design und folglich die Auswirkungen auf die Tonerzeugung an repräsentativen Beispielen darzulegen.

1. Resonanzrohr

Die Änderungen der Dimensionen des Resonanzrohres sind eine der Ursachen für die Veränderung der erzeugten Klangfarbe und Schallpegel des Tones. Die Form und Länge des Rohres wurden aufgrund der steigenden klangästhetischen Ansprüche verändert. Ein wesentlicher Aspekt ist die Erhöhung, Chromatisierung, des stark begrenzten Tonumfangs, Naturtonskala, der zugrundliegenden historischen Verwandten. Um den vor allem in der Tiefe begrenzten Tonumfang eines in der Länge konstanten Rohres zu erhöhen, in der Höhe liegen die Naturtöne dicht beieinander, werden die anfänglich geraden Resonanzrohre gewunden, durch zusätzliche, in Länge veränderbare Stimmzüge, z.B. Posaune, bzw. durch Ventile aktivierbare Bögen, z.B. Horn, verlängert. Für die Spielpraxis erweist sich der Einsatz der Ventile bzw. Züge mit variierbarer aktiver Resonanzrohrlänge als vorteilhaft, weil somit das vorher eingeführte umständliche Wechseln verschieden langer Einschübe vermieden wird. Die Spezialisierung auf eine Tonlage, verbesserte Methoden der Herstellung, zylinderförmige Rohre sind leichter herzustellen als konische und kreisrund gebogene Rohre, beispielsweise beim Horn, lassen für einen entsprechenden Einsatz in der Kunstmusik eine Vielzahl von Rohrformen – Variation von Durchmesser, Form, Wanddicke – entstehen.

Ein weiterer Aspekt, Verbesserung der Klangästhetik, wird am Beispiel der untersuchten Flöten deutlich. Barocke Travers- und klassische Klappenflöte besitzen ca. 0,5 m lange, kegelförmige, zum Fuß hin enger werdende hölzerne Rohre, einen zylinderförmigen Flötenkopf und einen etwas kleineren Durchmesser als die moderne Variante. Zur Anpassung an die jeweilige musikalische Situation werden verschiedene, sich in Tonlochanzahl und Länge unterscheidende Zwischenstücke, verwendet. Diese Zwischenstücke erschweren einerseits das Stimmen des Instrumentes und somit die Harmonisierung der erzeugten Töne über den Tonumfang des Instrumentes. Anderseits erhöhen die Zwischenstücke den Tonumfang. Grundlage für das Design der modernen Querflöten, zylinderförmiges, 0,6 m langes Rohr aus Metall, sind die Entwürfe von Theobald Böhm [4, S. 3–106], [28, S. 5–21]. Aufgrund dieses veränderten Rohrdesigns werden die Reibungs- und thermodynamischen Verluste, besonders der hohen Resonanzfrequenzen, geringer.

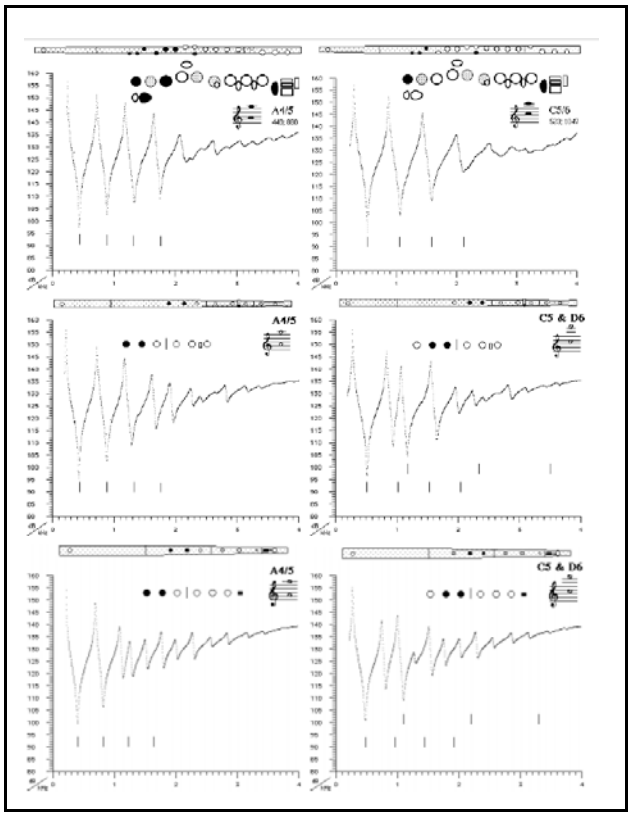

Abbildung 6: Diagramme links zeigen Fingersatz, akustische Schemata und Impedanz $Z(\omega)$ einer modernen (oben), klassischen (mittig) und barocken Flöte (unten) für die Noten A4 und A5, angegeben in dB, z.B. $20*\log_{10}(Z/\text{Pa s m}^{-3})$, Diagramme rechts zeigen Fingersatz der Note C5 desselben Instrumentes (mit dem gleichen Fingersatz können auch C6 bzw. D6 angespielt werden). Klangspektren dieser Noten, zeigen hohen Amplituden in den Harmonischen, die mit den tiefen Minima übereinstimmen. Vertikale Linien geben die Harmonischen an [6], weitere Daten sind unter [29] zu finden.

In einem Vergleich der Extrema der Flöten verschiedener Epochen sind die Minima des Impedanzspektrums der tiefen Frequenzen, bis 2 kHz, der modernen Flöte stärker ausgeprägt, verringern sich mit ansteigender Frequenz weniger und sind in der Nähe der Harmonischen, Abb. 6, lokalisiert. Basierend auf Böhms Entwicklungen sind außerdem die in Lage, Größe und Anzahl angepassten Tonlöcher für einen deutlich helleren, lauteren Klang sowie größeren Tonumfang der modernen Flöte von entscheidender Rolle [6], [30].

2. Mundstück und Anblasloch

Beim Vorgänger der hier untersuchten Blasinstrumente mit Rohr- respektive Doppelrohrblatt, der Schalmei, befindet sich das Doppelrohrblatt innerhalb einer Windkapsel und wird beim Anblasen nicht berührt. Der Spieler hat somit keine Möglichkeit durch Änderung des Lippendruckes auf das Rohrblatt den Klang zu beeinflussen. Für ein leichteres Überblasen, erhöhter Blasdruck oder besonders schneller Anstieg des Blasdrucks für die Erzeugung eines höheren Tones bei gleichem Griff, werden Mundstück kleiner und Rohrblatt schmaler gestaltet.

Abbildung 7: Flötenköpfe der barocken Traversflöte (oben), klassischen Klappenflöte (mittig) und modernen Querflöte (unten).

Die Entwicklung der Mund- bzw. Kopfstücke ist beispielhaft an den Kopfstücken der untersuchten Flöten in Abb. 7 zu erkennen. Die Änderungen im Design wirken sich auf die Tonerzeugung aus und werden deshalb hier genauer betrachtet. Das Kopfstück der historischen Flötenvertreter ist nahezu zylindrisch, das der modernen Variante verjüngt sich jedoch leicht in Richtung Anblasloch. Bewegliche Korkschrauben zur Stimmung der Flöte sind in den Flöten vorhanden. Die Position des Korks, 19 mm klassische, 17 mm moderne Variante [10, S. 12–29], [31], variiert, folglich wird das eingeschlossene Volumen und somit die Frequenz des Helmholtz-Resonators beeinflusst. Demzufolge werden die Minima verdichtet und verstärkt bzw. in der Nähe der Resonanzfrequenz des Helmholtz-Resonators erweitert und gedämpft, Abb. 8, womit sich u.a. die Begrenzung des Tonumfanges der historischen Vertreter nach oben erklärt.

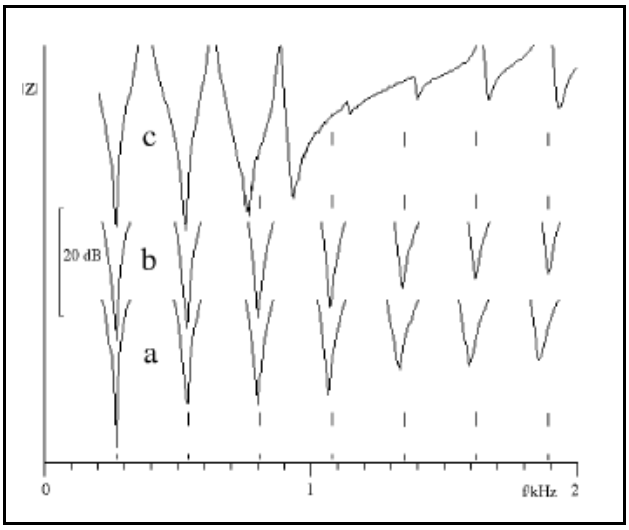

Abbildung 8: Minima der Impedanzkurven für zylinderförmige Flöten ohne verjüngtes Kopfstück bei normaler Position des Korks, 17,5 mm vom Anblasloch (a), 5 mm (b), 70 mm (c) entfernt. Vertikale Striche geben die Lage der Harmonischen an. Zu beachten ist hierbei, dass eine Flöte ohne verjüngtes Kopfstück bei einer Position des Korks von 17,5 mm nicht harmonische Minima erzeugt [32].

Ferner sind die Unterschiede des Mundlochdesigns am Kopfstück der Flöten auffällig. Das Mundstück der modernen Flöte, langes Rechteck mit abgerundeten Ecken, nach Böhm, unterscheidet sich von dem der historischen Vertreter, leicht oval oder rund, Abb. 7. Der größere Querschnitt der Öffnung und Änderung der Form, von kreis bis leicht oval zu rechteckig, verändert die Luftströmungs- und somit die akustischen Eigenschaften. Neben der optimaleren Abstimmung – Anblaswinkel, Aufnahme der Unterlippe, Anblaskante – beeinflusst die Form- und Größenänderungen wiederum die Resonanzeigenschaft des Helmholtz-Resonators und somit das Klangbild der jeweiligen Flöte. Im Vergleich der Impedanzkurven, Abb. 9, ist u.a. der resultierende Einfluss der Veränderungen des Kopfstückes zu erkennen.

Die Minima im Bereich bis 2 kHz der modernen Flöte sind deutlich stärker ausgeprägt als die der historischen Variante und steigen weniger stark zu höheren Frequenzen hin an. Somit werden die höheren harmonischen Anteile der Resonanzfrequenz prägnanter und folglich erzeugt die moderne Flöte einen deutlich helleren und

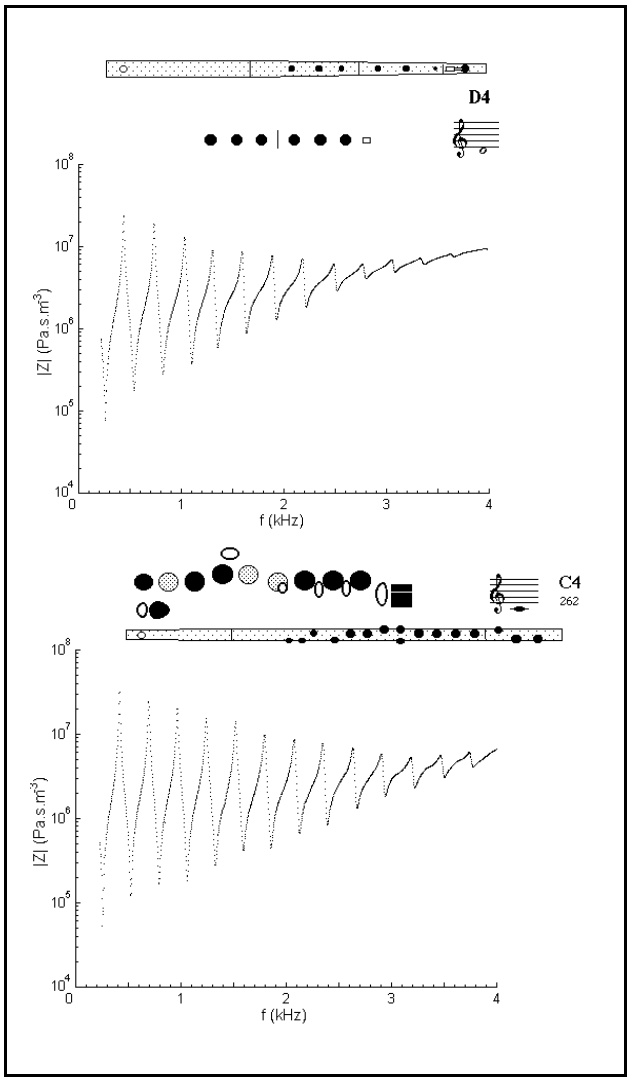

Abbildung 9: Impedanzkurve des tiefsten Tones (alle Tonlöcher geschlossen) der barocken Flöte, (oben) [33] und moderne Querflöte (unten) [34].

über den gesamten Tonumfang homogenen Klang. Dies hat außerdem zur Folge, dass aufgrund der menschlichen Hörkurve, höchste Empfindlichkeit zwischen 2 - 5 kHz, leiseres bzw. lauteres Spielen ermöglicht wird. Zur weiteren Optimierung bestimmen experimentell ermittelte bzw. überprüfte mathematische Berechnungen die Abstände bzw. Werte zwischen Anblasloch, Kork bzw. den Tonlöchern und den übrigen Parametern, beispielsweise Rohrdurchmesser und -länge, der modernen Querflöten [6].

3. Tonloch

Zur Erzeugung einer bestimmten Tonhöhe wird u.a. die akustisch aktive Resonanzrohrlänge z.B. durch Öffnen von

Tonlöchern verändert. Die Tonlöcher der untersuchten Holzblasinstrumente variieren in Anzahl, Form und Größe. Beispielhaft wird auf die Entwicklung der Böhmflöte eingegangen. Vergrößerung, modern am größten, und Zuwachs der Tonlöcher, 6 - 8 historische bzw. 17 moderne Bauweise, führte zur Einführung des Klappensystems. Das Klappensystem ermöglicht das Öffnen und Schließen von Tonlöchern mit Hilfe von gekoppelten Klappen. Infolgedessen konnte ein Wechseln des Mittelstücks mit variierender Länge und Lochanzahl vermieden und somit ein vorteilhafter Einfluss auf die Spielpraxis erreicht werden. Durch Einführung des Klappensystems wurden die vielfach komplizierten Gabelgriffe zumeist unnötig. Als weitere Konsequenz verringert sich die Tonhöhenabweichung beim Anspielen eines gleich temperierten Halbtones, Abb. 10. Das Klangbild ist somit über den gesamten Tonumfang des Instrumentes homogener.

	Baroque	Classical	Modern
First resonance	-50 ± 20	-25 ± 5	-15 ± 5
Second resonance	-215 ± 20	-55 ± 5	-30 ± 5

Abbildung 10: Ermittelte Tonhöhenabweichung in cent ± Standardabweichung für mit Gabelgriffen erzeugte Töne von Flöten verschiedener Epochen [24].

Unter Verwendung von Gl. (3) und der Parameter der Flöten verschiedener Epochen kann die entsprechende Grenzfrequenz berechnet werden. Anhand dieser Werte nimmt die Grenzfrequenz, historische ca. 1,5 kHz und moderne Flöte ca. 2 kHz, u.a. mit zunehmender Tonlochgröße zu [24]. Aufgrund der höheren Grenzfrequenz steigt bei Ermittlung der Impedanzkurve die Anzahl der Minima die im harmonischen Verhältnis sind, siehe Abb. 9. Folglich werden die angespielten Noten in der Klangfarbe heller und lauter bzw. können Töne durch die tieferen Minima der Harmonischen auch leiser angespielt werden.

4. Becher, Sturz und Schallstück

Am Ende des Instrumentes, dem Hauptaustrittspunkt der Schallwellen, verfügen die Blasinstrumente über eine Erweiterung. Die Form und Größe dieser meist kegelförmigen Erweiterung variiert aufgrund der fortschreitenden Erfordernisse, Diversifizierung, in Klangästhetik und Aufführungspraxis zwischen homogenen sowie heterogenen Mitgliedern der Instrumentenfamilien. Beispielsweise sind deutliche Unterschiede des Schallstücks, folglich das Klangbild beeinflussend, von Bassetthorn, klassischer, moderner Klarinette sowie Bassklarinette in Abb. 11 erkennbar.

Abbildung 11: Evolution des Schallstücks, links: Bassetthorn (oben), klassische Klarinette (unten), rechts: Bassklarinette (oben) und moderne Klarinette (unten).

Bassetthorn und Bassklarinette sind aufgrund des größeren Resonanzrohrs und der Form des Schallstücks in den tieferen Registern einsetzbar. Hierbei unterstützt die Form des Schallstücks von Bassetthorn oder Bassklarinette die Abstrahlung der tiefen Resonanzen. Die Form des Schallstücks, mit geringen feststellbaren Unterschieden, der klassischen oder auch modernen Klarinette, unterstützt wiederum die Abstrahlung der höheren Anteile der Resonanzfrequenzen. Die veränderte frequenzabhängige Richtungswirkung des Schall-

stücks ist klar erkennbar, in [7, S. 107–142] sowie in [35] nachgewiesen.

Die aufgezeigten Unterschiede in der Tonerzeugung, deren Ursachen in Bauform und der Veränderung infolge der instrumentenbaulichen Entwicklung der einzelnen Komponenten, werden anhand des ermittelten Tonumfangs sowie erzeugten Schallleistungspegels der Instrumente verschiedener Epochen in Kap. V darlegt.

III. STAND DER FORSCHUNG

Gleichwohl umfangreiche Forschungsarbeit zu verschiedenen akustischen Aspekten der Musikinstrumente erfolgte, beschränken sich die vorliegenden wissenschaftlichen Untersuchungen zur Ermittlung der erzeugten Schalldruck- beziehungsweise Schallleistungspegel ausschließlich auf moderne Orchesterinstrumente. Eine der maßgeblichen Studien wurde diesbezüglich von Jürgen Meyer [7], [36] in den achtziger Jahren des 20. Jh. durchgeführt. In dieser ersten konsistenten Messreihe ermittelte Meyer unter Verwendung einer Referenzschallquelle im Hallraum die Schallleistungspegel typischer moderner Orchesterinstrumente. Die bereits seit den 1960ern erfolgten Untersuchungen sind andererseits teilweise unter ungenau definierten Versuchsbedingungen und systematischen Problemen durchgeführt. Entsprechend Meyers Zusammenfassung wurde von Clark und Luce [37] der unbewertete Schalldruckpegel der häufigsten Orchesterinstrumente im reflexionsarmen Raum gemessen und somit eine der ersten Untersuchungen zum dynamischen Verhalten von Musikinstrumenten durchgeführt. In einer Untersuchung von Burghauser und Spelda [38] wurden bewertete Schalldruckpegel von einer Vielzahl von modernen Orchesterinstrumenten mit einem Messabstand der dem „durchschnittlichen Abstand der Zuhörer“ entspricht in einem Rundfunkstudio ermittelt. Bouhuys [39] bestimmt in verschiedenen unvollständig definierten oder nicht näher beschriebenen Versuchsumgebungen ausschließlich bewertete Schalldruckpegel von Blasinstrumenten. Keine dieser früheren und von Meyer referenzierten Untersuchungen wurde somit unter standardisierten und messtechnisch validen, nachvollziehbaren Bedingungen in einem Hall- oder reflexionsarmen Vollraum durchgeführt. Somit ist eine Umrechnung von richtungsabhängigen und fehleranfälligen Daten in Schallleistungspegel mit Kompromissen behaftet. Dennoch unternimmt Meyer den Versuch die Ergebnisse aller drei oben genannten Untersuchungen unter Anwendung von entsprechenden Korrekturfaktoren in Schallleistungspegel zu konvertieren [36]. Auf Basis der Umrechnungen der verschiedenen Datensätze und der Untersuchungen von Meyer selbst wird ein erster empirischer Vergleich bezüglich der Dynamik von modernen Orchesterinstrumenten möglich. Seit der Veröffentlichung im Jahr 1990 bis heute repräsentiert diese Dokumentation auf diesem Gebiet immer noch die Standard- und Referenzliteratur.

Hinsichtlich der dokumentierten Spielanweisungen der Musiker verweist Meyer auf eine weitere Problematik der Untersuchungen von Clark und Luce, sowie Burghauser und Spelda. Beide Untersuchungen leiten, basierend auf den gemessenen minimalen (*pianissimo*) und maximalen (*fortissimo*) Extremwerten, somit den höchstmöglichen Dynamikumfang ab. Zusätzlich werden die in einer vom Musiker empfundenen mittlerer Lautstärke „*mf*“ angespielten Pegelwerte angegeben. Meyer folgend sind derartig ermittelte Werte lediglich mit bestimmten Einschränkungen zuverlässig, infolge der subjektiven Interpretationsmöglichkeit von Musiker zu Musiker verschieden und somit auch im Hinblick auf das Spielen in einer ungewohnten akustischen Situation bedingt nachvollziehbar. Aus diesem Grund stellt Meyer in seiner Untersuchung nur die Grenzen des spielbaren Umfangs für einzelne Noten und Tonleitern dar und führt darüber hinaus ein arithmetisches Verfahren zur Berechnung des Schallleistungspegels im sogenannten mittleren forte ($L_{w\ f}$) [36] ein. Dieses Thema wird anhand der dargestellten Ergebnisse

dieser Untersuchung im Abschnitt V weitergehend erörtert.

IV. METHODIK

Zur Ermittlung der von einer Schallquelle insgesamt abgestrahlten Schallleistung, d.h. die transportierte Schallenergie pro Zeiteinheit durch eine die Quelle ganz umhüllende Fläche, Hüllfläche, werden die Schallleistungen auf Teilflächen der Hüllfläche bestimmt, Gl. (4, 5, 6, 7) und folglich Hüllflächenverfahren genannt. Grundlage für die Berechnung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel nach dem Hüllflächenverfahren, [40], [41], sind Schalldruckmessungen der Orchesterinstrumente im reflexionsarmen Vollraum der TU Berlin [42], [43]. Die Instrumente sind für die Bestimmung der Pegelwerte möglichst im geometrischen Zentrum eines 32-kanaligen, sphärischen Mikrofonarrays platziert, Abb. 12. Die Empfindlichkeit aller Aufnahmekanäle ist mit einem Klasse-A-Gerät auf einen Referenzwert von 94 dB bei 1 kHz kalibriert. Für die spätere Auswertung ist der Amplitudenverlauf der Kalibrierung dokumentiert.

Abbildung 12: Schallleistungsmessung nach dem Hüllflächenverfahren im reflexionsarmen Vollraum der TU Berlin mit sphärischem 32-Kanal-Mikrofonarray [42].

Basierend auf den Schalldruckmessungen der Töne im chromatischen Tonabstand über den spielbaren Tonumfang des Instruments in den Dynamikstufen *ff* (*fortissimo*) und *pp* (*pianissimo*) wird der Schallleistungspegel für den stationären Teil des Tones berechnet. Weiterhin wird der Schallleistungspegel der im flüssigen Tempo und in Mittellage über zwei Oktaven eingespielten Tonleiter für jedes Instrument sowohl im *pp* als auch im *ff* ermittelt. Für kurzzeitige, transiente, Klänge wird ergänzend zum Schallleistungspegel der Schallenergiepegel der angespielten Töne bestimmt.

Neben den Streichinstrumenten [1] wurden für diese Untersuchung eine Vielzahl von Blas- und anderer Orchesterinstrumente aufgenommen. Hierzu sind tabellarisch in Anhang A zur Übersicht alle ausgewerteten Blasinstrumente, Abb. A 1, A 2, sowie Schlag- bzw. Zupfinstrumente, Abb. A 3, aufgeführt. In diesen Tabellen sind spezifische Informationen u.a. über Herkunft und Stimmungsfrequenz der verwendeten modernen und historischen Instrumente zu finden. Vertiefende Informationen zum Messverfahren, Auswahl der Musiker und Instrumente können aus [1] entnommen werden.

A. Analysevorbetrachtung

Datenbasis zur Ermittlung der Pegelwerte sind die aus der Vorverarbeitung erzeugten Daten [1]. Für jeden angespielten Ton ist eine Audiodatei mit einer Abtastrate von 44,1 kHz und eine Textdatei vorhanden. Die Textdatei beinhaltet Beginn und Ende des stationären Teils des Tones als Angabe der Samplewerte im Zeitbereich der Audiodatei. Mithilfe eines MATLAB® - Skriptes werden die Samplewerte und Audiodaten eingelesen und der stationäre Teil des Tones für die Bestimmung des Schallleistungspegels selektiert. Für Töne die keinen stationären Zustand ausbilden, infolge keiner gleichmäßigen Anregung der Schwingung, beispielsweise durch schlagen oder zupfen, ist ein Verfahren zur Bestimmung der relevanten Zeitspanne implementiert. Hierzu wird anmerkend auf Abschnitt C – Schallenergiepegel – verwiesen.

Bei der Ermittlung der Pegelwerte werden die Kalibrierungsdaten zum Zeitpunkt der Messung und die Ergebnisse nach BEM-Simulation der nachgewiesenen Kammfiltereffekte [35], des Mikrofonarrays berücksichtigt. Desweitern ist aufgrund der unteren Grenzfrequenz des reflexionsar-

men Vollraumes von 63 Hz ein linearphasiges Butterworth Bandpassfilter 4. Ordnung, 63 Hz - 20 kHz, implementiert. Unterschreitet der Tonumfang des Instrumentes die untere Grenzfrequenz wird das Filter bei der Berechnung nicht angewendet.

Unter Berücksichtigung der beschrieben Vorbedingungen werden mittels implementierter Algorithmen die Schallleistungs- bzw. Energiepegel für die vorliegenden Daten berechnet. Zur Visualisierung der Ergebnisse ist eine grafische Benutzeroberfläche, Anhang B, implementiert. Diese Oberfläche ermöglicht die Analyse der ermittelten Werte und ist Hilfsmittel zur Darstellung der Pegelverläufe der Instrumente im folgenden Kapitel.

B. Schallleistungspegel

Innerhalb des Skriptes werden die Audiodaten, des stationären Teils des Tones eingelesen, die umgesetzten Gl. (4, 5, 6), vgl. DIN EN ISO 3745:2003, angewendet sowie anhand der Kalibrierungs- und Filterdaten des Mikrofonarrays der unbewertete Schallleistungspegel berechnet.

$$10\log_{10}\left[\frac{1}{}\int\frac{^{2}}{^{2}}\,\mathrm{d}\right] \qquad (4)$$

Zeitlich gemittelter Schalldruckpegel L_{pi} nach Gl. (2) DIN EN ISO 3745, an der *i*-ten Mikrofonposition erzeugter Momentanschalldruck p_i und Bezugsschalldruck $p_{i\,0}$ anhand der Kalibrierungsdaten.

$$10\log_{10}\left(\frac{1}{}\left[\sum_{1}10^{0,1\cdot}\quad\right]\right) \qquad (5)$$

Messflächen-Schalldruckpegel nach Gl. (9) DIN EN ISO 3745, entsprechend der Messung über gleichgroße Teilflächen mit N=32 für die Anzahl der Mikrofonpositionen.

$$10\log_{10}\frac{1}{} \qquad (6)$$

Schallleistungspegel nach Gl. (13) DIN EN ISO 3745, ohne Korrekturen der atmosphärischen Bedingungen, Gl. (14) und (15) nach DIN EN ISO 3745, Bezugsfläche S_0=1 m^2 und Messfläche S_1=4 r^2 (r=4,17 m).

Ebenso wie die Schallleistungspegel werden unbewertete, A- und C-bewertete Schalldruckpegel berechnet.

Ist von einem Ton in der gleichen Dynamikstufe mehr als eine Variante vorhanden, wird anhand des ermittelten Schallleistungspegels der leiseste im *pp*, respektive im *ff,* der lauteste Wert ausgewählt. Für die weitere Analyse werden die nach dem gleichen Verfahren gewonnenen Pegelwerte des gesamten Tonumfanges der gleichen Dynamikstufe des Instrumentes chromatisch sortiert.

C. Schallenergiepegel

Für einzelne Schallimpulse oder vorübergehende Schallereignisse werden der Schallleistungs- und Schallenergiepegel nach DIN EN ISO 3745:2003 bestimmt. Hierfür ist es notwendig die entsprechende Gleichung für die Berechnung des Einzelereignis-Schalldruckpegels Gl. (7) anstatt des zeitlich gemittelten Schalldruckpegels Gl. (4) anzuwenden. Die weiteren Berechnungsschritte zur Ermittlung des Schallenergiepegels sind identisch zur Bestimmung des Schallleistungspegels Gl. (5, 6). Zur besseren Lesbarkeit wird in Gl. (7) zur Bestimmung des Einzelereignis-Schalldruckpegels der Index *i*, Mikrofonposition, weggelassen, vgl. Gl. (4) zur Bestimmung des Schalldruckpegels.

$$10\log_{10}\left[\int\frac{^{2}}{^{2}}\,\mathrm{d}\right] \qquad (7)$$

Einzelereignis-Schalldruckpegel nach Gl. (5) DIN EN ISO 3745, momentane $p(t)$ und Bezugsschalldruck p_0, im Intervall $t_2 - t_1$ in s, Bezugszeit T_0=1 s des Intervalls.

Gemäß Gl. (7) muss als Integrationszeit, t_1 - t_2, angegeben werden, um den gesamten wesentlichen Schall des Ereignisses zu erfassen. Die Integrationszeit wird durch den Einsatz (t_1) und die frühere Abklingphase (t_2) des Tones definiert. Analog zur Anfangsnachhallzeit – **E**arly **D**ecay **T**ime, **EDT** – von Räumen [44] wird der Pegelabfall über die ersten 10 dB bestimmt,

auf einen Abfall von 60 dB umgerechnet und somit die frühere Abklingzeit berechnet. Des Weiteren wird durch die Knickstelle im Pegelverlauf und wiederum auf einen Abfall von 60 dB bezogen die spätere Abklingzeit des Tones ermittelt. Die Pegeldifferenz zwischen Spitzenwert und Knickstelle wird zusätzlich angegeben [7, S. 91]. Zur Bestimmung der früheren und späteren Abklingzeit ist es nötig die Abklingkurve mittels Rückwärtsintegration [45] Gl. (8) des Impulses [46], [47] zu ermitteln. Mit Hilfe des Verfahrens der kleinsten Fehlerquadrate werden die Geraden an die Abklingkurve zur Bestimmung der Abklingzeiten angepasst.

1. Besonderheiten der Datenbasis

Die zugrundeliegenden Daten der Textdateien, „stationärer", manuell selektierter, Bereich des Audiosignals, sind nicht für eine konsistente Berechnung der Schallenergie geeignet. Eine direkte Bestimmung des Zeitintervalls – t_1 = Toneinsatz und t_2 = Zeitpunkt für das Ende des wesentlichen Schallereignisses – anhand des Pegelverlaufes z.B. durch Über- bzw. Unterschreiten eines definierten Schwellwertes ist aufgrund des geringen Signal-Rausch-Verhältnis – **s**ignal- to- **n**oise **r**atio, **SNR** – nicht für alle vorliegenden Daten möglich, Abb. 13. Dies gilt im Besonderen für in *pianissimo* erzeugte Töne der Harfe und Gitarre. Somit ist es nötig ein Verfahren zur Detektion des Toneinsatzes zu implementierten.

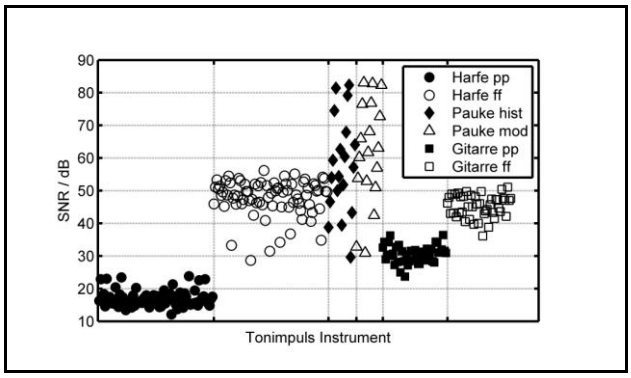

Abbildung 13: Signal- Rausch-Verhältnis (SNR) eingespielter Einzeltöne der Instrumente mit transienter Schallerzeugung.

Die Detektion des Toneinsatzes ist Gegenstand aktueller Forschung [48], [49]. Folglich ist eine Vielzahl von Lösungsverfahren vorhanden. Eine Evaluierung der verschiedenen Methoden bei Signalen mit geringem SNR ist nicht Umfang dieser Arbeit. Zur Ermittlung des Toneinsatzes wird eine auf der spektralen Analyse des Signals [50], [51] basierenden Methode zur Erstellung einer Detektionsfunktion genutzt und im folgenden Abschnitt beschrieben.

Die Grenzwerte des vorgeschriebenen Signal-Rausch-Verhältnis, >10 dB, zur Optimierung der Abklingkurve, z.B. Lundeby-Verfahren [52], Umsetzung in [53], werden nicht von allen vorliegenden Daten erfüllt und somit ist ein Verfahren zur Optimierung der Abklingkurve nicht implementiert.

2. Bestimmung des Toneinsatzes

Zur Ermittlung des Toneinsatzes im Signal wird eine Zeit-Frequenz-Darstellung auf Basis einer Kurzzeit-Fourier-Transformation – STFT – unter Verwendung des Hamming-Fensters mit einer Fenstergröße = 46 ms und einer Abtastrate = 10 ms erstellt. Die Parameter bezüglich der Fenstergröße und Abtastrate zur Erstellung des Kurzzeitspektrums nutzen unterschiedliche weiterführende Verfahren der Detektion des Toneinsatzes [51] und sind folglich für diese Anwendung adäquat, die tiefste vorliegende Grundfrequenz beträgt 31 Hz ≈ 32 ms.

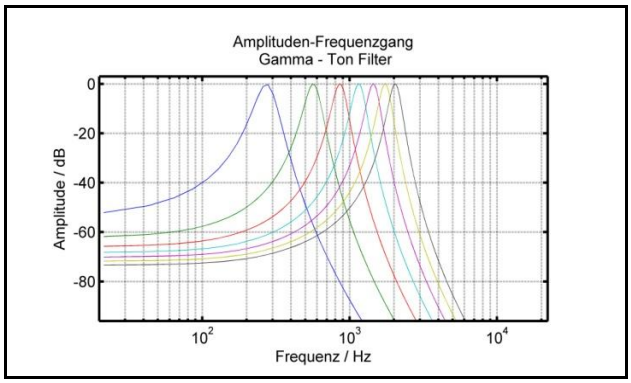

Abbildung 14: Impulsantwort für das Gamma Ton Filter, Mittenfrequenzen: 1. - 7. Harmonische (294, 588,.., 2058 Hz) für den Ton D4.

Abweichend von der in [50] vorgestellten psychoakustisch motivierten Methode – Verwendung von 40 ERB skalierten Bändern – wird an dieser Stelle das Signal

mithilfe einer Gamma-Ton-Filterbank [54] mit 7 Frequenzbändern im Spektralbereich gefiltert. Die Grundfrequenz des Tones bestimmt die Mittenfrequenzen, $\cdot_0$, k = 1, 2, 3,…, 7, der Filter, Abb. 14. Somit wird das Spektrum auf 7 Frequenzbänder, k - Harmonische des Tones, und nicht auf die psychoakustisch evaluierten Frequenzbänder begrenzt. Zur Bestimmung der spektralen Differenzfunktion $D_n(k)$ wird die Summe der Differenzen des gefilterten Signalspektrums $C_n(k)$ gebildet Gl. (8). Das Spektrum $C_n(k)$ bezieht sich auf das k-te energieäquivalent kombinierte Gamma-Ton Filterband zum Zeitpunkt n.

$$( ) \quad ( ) - \frac{\sum_{1} \quad -}{} \qquad (8)$$

$$( ) = \sum_{1}^{7} \max \quad ,0 \qquad (9)$$

In dieser Anwendung wird der Parameter M mit M=3 zur Berechnung der Differenzfunktion festgelegt. Auf Grundlage der Gl. (9) wird die Detektionsfunktion $DF(n)$ definiert [50] somit der Toneinsatz bestimmt und durch energieäquivalente Umformung des gefilterten Spektrums der Pegelverlauf des Signals ermittelt. Das gefilterte Signal ist nachfolgend Grundlage für die Bestimmung der frühen und späten Abklingzeit des Tones.

3. Berechnung der Abklingzeiten

Durch Rückwärtsintegration des gefilterten Signals bis zum Zeitpunkt des Tonbeginns wird die Abklingkurve – **E**nergy **D**ecay **C**urve, **EDC** – bestimmt. Prinzipiell basiert die Rückwärtsintegration auf der Berechnung des Nachhallverlaufes $r(t)$ aus der Impulsantwort $h(t)$. Der Energiegehalt der Impulsantwort wird durch Integration und Subtraktion, der mit zunehmender Zeit t abfließenden Energie, berücksichtigt [45] Gl. (10).

$$\int \; ^2( )\mathrm{d}$$

$$\int_0 \; ^2( )\mathrm{d} \; - \int_0 \; ^2( )\mathrm{d} \qquad (10)$$

Unter Verwendung der DIN EN ISO 3382-2, Anhang B – Auswertung nicht linearer Abklingkurven, vgl. Gl. (11, 12) – wird die frühere bzw. spätere Abklingzeit für einen Pegelabfall der Abklingkurve von 60 dB berechnet. Hierfür wird das Quadrat des Korrelationskoeffizienten r bestimmt. Dieser Wert liegt zwischen 0 und 1, wobei r^2 = 1 einer vollkommen geraden Abklingkurve entspricht. Folglich wird für die Bestimmung der Abklingzeiten der Verlauf des Korrelationskoeffizienten bestimmt und die Zeitpunkte der Maximalwerte des Korrelationskoeffizienten sowie die entsprechenden Pegelwerte berechnet.

$$- \; \frac{1}{-} \sum_{1} \qquad (11)$$

$$^2 \; \frac{\sum_{1} \; \widehat{} \; - \; - \; ^2}{\sum_{1} \; - \; - \; ^2} \qquad (12)$$

Mittelwert $^{-}$ der Pegel L_i nach DIN EN ISO 3382-2 (B.1) und (B.2) Quadrat des Korrelationskoeffizienten r aus dem Schätzwert $\widehat{}$ des Punktes Nummer i aus der linearen Regression .

Anhand dieser Zeitpunkte und Pegelwerte werden die frühere und spätere Abklingphase, somit die Abklingzeiten, die Pegeldifferenz zwischen Spitzenpegel und Einsatz der späteren Nachklingphase des Tones ermittelt, Abb. 15. Unter Verwendung der Zeitpunkte des Toneinsatzes und früheren Abklingzeit werden folglich entsprechend der Gl. (5, 6, 7), der Energie- und Leistungspegel berechnet.

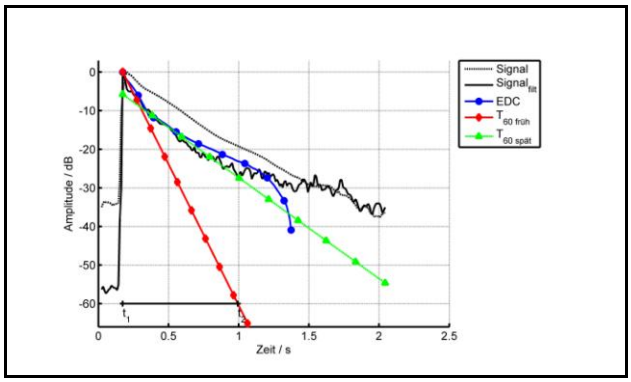

Abbildung 15: Amplitudenverlauf Signal (–), gefiltertes Signal (schwarz), Abklingkurve (blau), interpolierte Abklingzeiten $T_{60\ \text{früh}}$ = 0,82 s (rot), $T_{60\ \text{spät}}$ = 2,07 s (grün) nach ermittelten Toneinsatz, Pegeldifferenz zwischen Spitzenpegel und Einsatz der späteren Nachklingphase von -8,8 dB, t_1 – t_2 Integrationsintervall für den Ton D4 im *ff* der Konzertgitarre.

V. ERGEBNISSE

Für einen kurzen Überblick sind die ermittelten Schallleistungspegel L_w der Orchesterinstrumente verschiedener Epochen bzw. Stimmlagen in den Tabellen, Abb. 16 – 18, zusammengefasst. Auf der rechten Seite der Tabellen sind jeweils zeitlich gemittelte maximale und minimale frequenzunbewertete Schallleistungspegel des stationären Tonanteils der über den gesamten Tonumfang chromatisch skaliert eingespielten Einzeltöne dargestellt. Basierend auf diesen Ergebnissen der besonders lauten bzw. leisen Varianten der gehaltenen Einzeltöne wird der maximal erreichbare Dynamikumfang des Instrumentes ermittelt. Zusätzlich zu den dargestellten Extremwerten der eingespielten Einzeltöne in den Dynamikstufen *pp* und *ff* ist anhand dieser der mittlere Schallleistungspegel in *forte* $L_{w\ f}$ nach Meyer [36] berechnet. Auf der linken Seite der Abbildungen sind die zeitlich gemittelten Schallleistungspegel L_w der im flüssigen Tempo in *pp* und *ff* über zwei Oktaven eingespielten Tonleitern dargestellt [1]. Anhand der ermittelten Leistungspegel der eingespielten Tonleitern ist im Vergleich zu den Werten der gehaltenen Einzeltöne bei allen Instrumenten ein deutlich geringerer Dynamikumfang erkennbar. Dies begründet sich zum Einen am veränderten

	Tonleitern [dB]		Einzeltöne [dB]		
	$L_{w,pp}$	$L_{w,ff}$	$L_{w,pp}$	$L_{w,f}$	$L_{w,ff}$
Flöte					
Traversflöte	85	92	69	93	101
Klappenflöte	85	90	73	95	102
Querflöte	89	95	77	98	105
Oboe					
Romantik	-	-	80	94	99
Wiener Klassik	88	93	81	95	100
modern	89	95	80	95	100
Englischhorn	88	96	79	96	101
Klarinette					
Bassetthorn	73	90	59	91	102
Wiener Klassik	70	94	57	93	105
modern	80	100	53	95	110
Bassklarinette	80	93	65	93	102
Saxophon					
Altsaxophon	94	104	85	105	111
Tenorsaxophon	97	104	82	105	113
Fagott					
Dulzian	-	92	77	93	98
Barockfagott	86	94	77	93	98
Wiener Klassik	88	96	82	96	101
modern	86	99	82	98	104
Kontrafagott	86	94	80	94	98

Abbildung 16: Dynamikumfang der untersuchten Holzblasinstrumente sowie minimaler und maximaler Schallleistungspegel ($L_{w\ pp}$ bzw. $L_{w\ ff}$) des stationären Tonanteils der Einzeltöne und Tonleitern als auch der berechnete mittlere Schallleistungspegel in *forte* $L_{w\ f}$.

Resonanzverhalten bei schnell und gebunden angespielten Tonleitern und zum Anderen an der teilweisen Abhängigkeit des Dynamikumfanges von der Tonhöhe [55]. Weiterhin entsprechen das Spielen einer Tonleiter und somit auch der erreichte Dynamikumfang, im Gegensatz zum ermittelten Dynamikumfang der gehaltenen Einzeltöne, der gängigen Spielpraxis.

Im Gegensatz zu den ermittelten geringfügigen Unterschieden der Schallleistungspegel der Streichinstrumente verschiedener Epochen [1] sind die offensichtlichen Unterschiede in den Konstruktionsformen der untersuchten Blasinstrumente bestimmend für die signifikanten Unterschiede der abgebildeten Schallleistungspegel. Grundsätzlich erreichen die moder-

	Tonleitern [dB]		Einzeltöne [dB]		
	$L_{w,pp}$	$L_{w,ff}$	$L_{w,pp}$	$L_{w,f}$	$L_{w,ff}$
Horn					
Inventionshorn	89	100	74	102	111
Doppelhorn	89	103	75	104	114
Trompete					
Naturtrompete	91	104	81	100	107
modern	92	105	74	103	112
Posaune					
Altposaune	87	99	68	95	104
Tenor-/Wiener Kl.	87	100	79	99	106
Tenor- /modern	-	-	68	102	113
Bass-/Wiener Kl.	96	100	78	102	109
Bass- /modern	-	-	72	102	112
Tuba					
modern	98	114	71	109	122

Abbildung 17: Dynamikumfang der untersuchten Blechblasinstrumente sowie minimaler und maximaler Schallleistungspegel ($L_{w\,pp}$ bzw. $L_{w\,ff}$) des stationären Tonanteils der Einzeltöne und Tonleitern als auch der berechnete mittlere Schallleistungspegel in *forte* $L_{w\,f}$.

nen Vertreter sowohl der Holz-, in Abb. 16, als auch der Blechblasinstrumente, in Abb. 17, im *ff* unabhängig von der Spielweise einen bis zu 10 dB höheren Pegelwert, vgl. hierzu Abb. 16, Klarinetten.

Eine Tendenz zu geringen Pegelwerten im *pp* und somit einer Erhöhung im unteren Dynamikbereich lässt sich für die Blechblasinstrumente, Abb. 17, und Varianten der Klarinetten anhand der Extremwerte ermitteln. Die *pp*-Werte der angespielten Tonleitern differieren, mit Ausnahme der Vertreter der Klarinetten und Flöten, hingegen eher geringfügig. Einschränkend wird auf die Varianten der Oboe verwiesen, deren Extremwerte sich in dieser Darstellung nur marginal unterscheiden. Trotz dieser Einschränkung bestätigen bereits die abgebildeten Messwerte, in *pianissimo*, *forte* und *fortissimo*, die Annahme der höheren Durchsetzungskraft moderner Orchesterinstrumente auch aufgrund der höheren Schallleistungspegel.

Ergänzend zu den vorangestellten Ergebnissen der Blasinstrumente sind die ermittelten maximalen und minimalen

	Tonleitern [dB]		Einzeltöne [dB]		
	$L_{w,pp}$	$L_{w,ff}$	$L_{w,pp}$	$L_{w,f}$	$L_{w,ff}$
Harfe					
Doppelpedalharfe	76	89	54	87	98
Gitarre					
Konzertgitarre	71	85	62	83	90
Pauken					
Kurbelpauke	-	-	64	105	119
Pedalpauke	-	-	65	106	119

Abbildung 18: Dynamikumfang einer modernen Doppelpedalharfe und Konzertgitarre, sowie historischer Kurbel- und moderner Pedalpauke, ferner minimaler und maximaler Schallleistungspegel ($L_{w\,pp}$ bzw. $L_{w\,ff}$) des ermittelten relevanten Tonanteils der Einzeltöne und Tonleitern (mit *-gekennzeichneten Werte entsprechend einem Trommelwirbel mit Abschlag) als auch der berechnete mittlere Schallleistungspegel in *forte* $L_{w\,f}$.

Schallleistungspegel der untersuchten Zupf- und Schlaginstrumente in Abb. 18 dargestellt. Infolge der charakteristischen Klanganregung kann der Ton dieser Orchesterinstrumente keinen stationären Zustand ausbilden. Folglich ist die abgestrahlte Schallleistung, vgl. hierzu Ausführungen Kap. IV, für den Anfangsbereich des Tones, den Zeitbereich mit der stärksten Schallentwicklung angegeben [7, S. 95].

Bezüglich der Extremwerte der Varianten der Pauken sind geringfügige Unterschiede im *pianissimo*- und im berechneten *forte*-, sowie ein identischer *ff*-Pegelwert erkennbar. Abweichend zur Bestimmung des Schallleistungspegels einer über zwei Oktaven eingespielten Tonleiter ist für die Pauken, unter Berücksichtigung derselben Spielanweisung, der Pegelwert eines Trommelwirbels mit Abschlag ermittelt. Diesbezüglich ist eine deutlich höhere Schallleistung der modernen Pauke im *ff* festzustellen.

Basierend auf einer detaillierten Analyse der eingespielten Einzeltöne verdeutlichen die nachfolgenden Abschnitte die Verschiedenheit, im Bezug auf die erzeugte Schallleistung, zwischen den Varianten der einzelnen Instrumente historischer und moderner Konstruktion.

Schwerpunkt der folgenden Ausführungen sind die erzeugten Schallleistungen in ein und demselben Ton der Varianten aus den Epochen der Wiener Klassik und Moderne. Auf den nachfolgenden Abbildungen sind der minimale und maximale unbewertete Schallleistungspegel des jeweiligen Tones über den erhobenen Tonumfang des Instrumentes, der leiseste im *pp*, respektive lauteste Ton im *ff* sowie der resultierende maximal erreichbare Dynamikumfang ersichtlich.

A. Flöte

Im Vergleich der Schallleistungspegel der Flöten verschiedener Epochen, Abb. 19, werden für moderne Querflöte höhere und ferner für den Vertreter der frühesten Epoche, die Traversflöte, die niedrigsten Extremwerte ermittelt. Hinsichtlich der Tonhöhe der Extrema, D#6 (*ff*) und D4 bzw. F4 (*pp*), werden geringfügige Unterschiede festgestellt. Darüber hinaus wird auf die charakteristische Erweiterung des spielbaren Tonumfanges hingewiesen. Anhand der Analyse der Schallleistungen in ein und demselben Ton ist jedoch ersichtlich, dass der moderne Vertreter im *fortissimo* in den höheren Lagen, D6, bisweilen bis zu 3 dB niedrigere und in der tiefen Lage, G#4, bis zu 10 dB höhere Pegelwerte als die historischen Varianten erreicht. Die Werte im *pianissimo* der modernen Flöte sind über den gesamten gemeinsamen Tonumfang der Instrumente höher. Hierbei werden im Vergleich zu den historischen Flöten in der tiefen Lage maximal 13 dB höhere Werte ermittelt. Mit zunehmender Tonhöhe verringert sich diese Differenz auf einen Wert von 3 dB. Signifikante Unterschiede zwischen den historischen Varianten werden in beiden Dynamikstufen vor allem in der tiefen Lage, mit bis zu 6 dB niedrigeren Pegelwerten der Traversflöte, ersichtlich.

Der maximale Dynamikumfang, 10 dB in hoher Lage, der Querflöte ist in dieser Untersuchung relativ begrenzt. Besonders in hoher Lage erreichen die historischen Vertreter – Klappenflöte mit 19 dB und Traversflöte mit 17 dB – einen höheren Dynamikumfang. In der Betrachtung einer Dynamikstufe wird für die Querflöte ein Umfang von 20 dB (*ff*) und 16 dB (*pp*) ermittelt. Die Klappenflöte erreicht mit 20 dB (*ff*) einen identischen und mit 14 dB (*pp*) geringfügig abweichenden Wert. Größere Differenzen werden für die Traversflöte mit 18 dB (*pp*) und 22 dB (*ff*) ermittelt. Weiterhin wird eine Verringerung der maximalen Pegeldifferenz angrenzender Töne, 8 dB barocker, 4 dB klassischer und 3 dB moderner Vertreter, festgestellt. Somit kennzeichnet den modernen Vertreter ein tendenziell ausgewogener Verlauf bezüglich der Pegelwerte im Vergleich desselben Tonumfanges der historischen Instrumente.

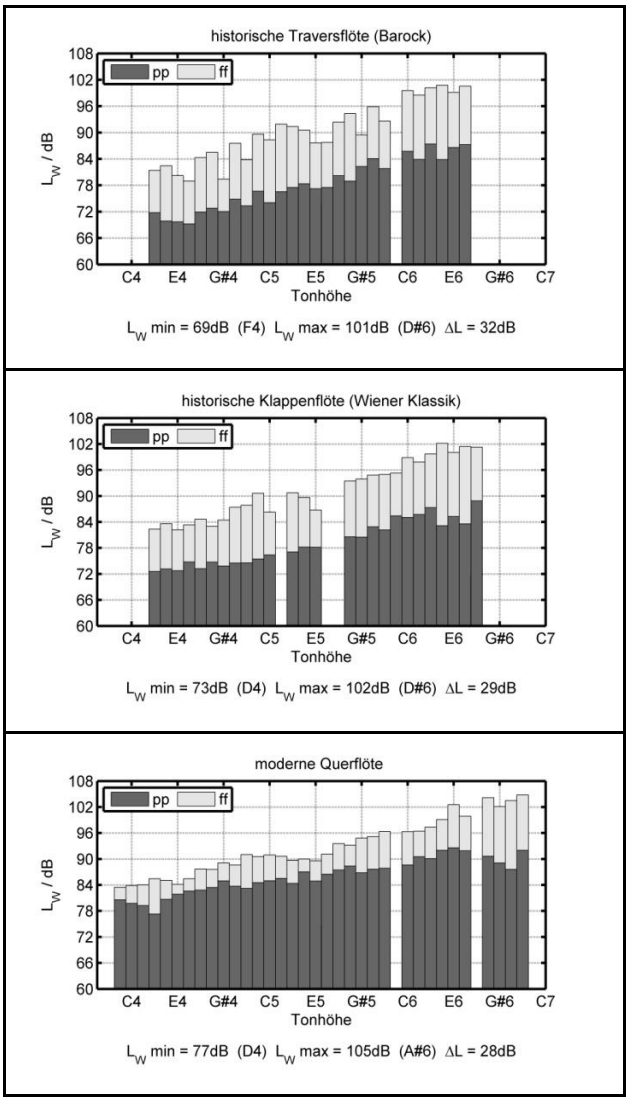

Abbildung 19: unbewertete Schallleistungspegel in chromatischer Skalierung einer Barock-Traversflöte (oben), klassischen Klappenflöte (mittig) und modernen Querflöte (unten).

B. Oboe

Im Vergleich der untersuchten Varianten der Oboe sind im Hinblick auf die Extremwerte der Schallleistungspegel der beiden Dynamikstufen keine signifikanten Unterschiede ersichtlich, Abb. 20, 21. Die Oboen, der Epochen der Wiener Klassik und Moderne, erreichen einen identischen *ff*-Pegelwert von 100 dB sowie einen geringfügig abweichenden *pp*-Pegelwert. Bemerkenswert sind an dieser Stelle die in Tonhöhe und Schallleistung übereinstimmenden Extremwerte sowohl im *ff* als auch nahezu im *pp*, wiederum in gleicher Tonhöhe, der aufgeführten Varianten der Oboe, Abb. 20. Andererseits werden in der Analyse der erreichten Schallleistungspegel in ein und demselben Ton im *pianissimo*, in tiefer Lage bis zu 4 dB höhere, in mittlerer und hoher Lage bis zu 8 dB geringere Pegelwerte des modernen Vertreters festgestellt. Im *fortissimo* werden, wiederum über denselben Tonumfang, tendenziell höhere Pegel, 7 dB, der modernen Oboe ermittelt.

Im Vergleich der vorliegenden Daten eines typischen Vertreters der Romantik erreicht dieser 5 dB (*pp*) und 4 dB (*ff*) geringere Pegelwerte als das moderne Instrument. Folglich ist der Dynamikumfang der modernen Variante in mittlerer mit maximal 18 dB respektive 12 dB in hoher Lage deutlich höher anzusehen. Bezüglich der absoluten Pegeldifferenz angrenzender Halbtöne werden im *ff* für modernen 5 dB und klassischen Vertreter 6 dB ermittelt. Beispielsweise steigt im Tonintervall C5 - D#5 im Fall der klassischen die Schallleistung um 12 dB (*pp*) bzw. 7 dB (*ff*) und im Fall der modernen Oboe im nahezu identischen Intervall B4 - D5 – ein Halbton niedriger – um 8 dB (*pp*) bzw. 5 dB (*ff*). Darüber hinaus ist der charakteristische und schrittweise, vom Vertreter der Romantik bis zum modernen Vertreter aufgrund der im Kap. II erwähnten Entwicklungen, erweiterte Tonumfang ersichtlich.

Ergänzend zum Vertreter der modernen Oboe sind für einen weiteren Vertreter der Oboen der modernen Orchesterbesetzung, das Englischhorn, Abb. 21, Schallleistungspegel von 79 dB (*pp*) und 101 dB (*ff*) anzugeben. Anhand der Analyse der ermittelten Leistungspegel ist ein von der Dynamikstufe annähernd unabhängiger Verlauf dieser über den Tonumfang des Instrumentes ersichtlich.

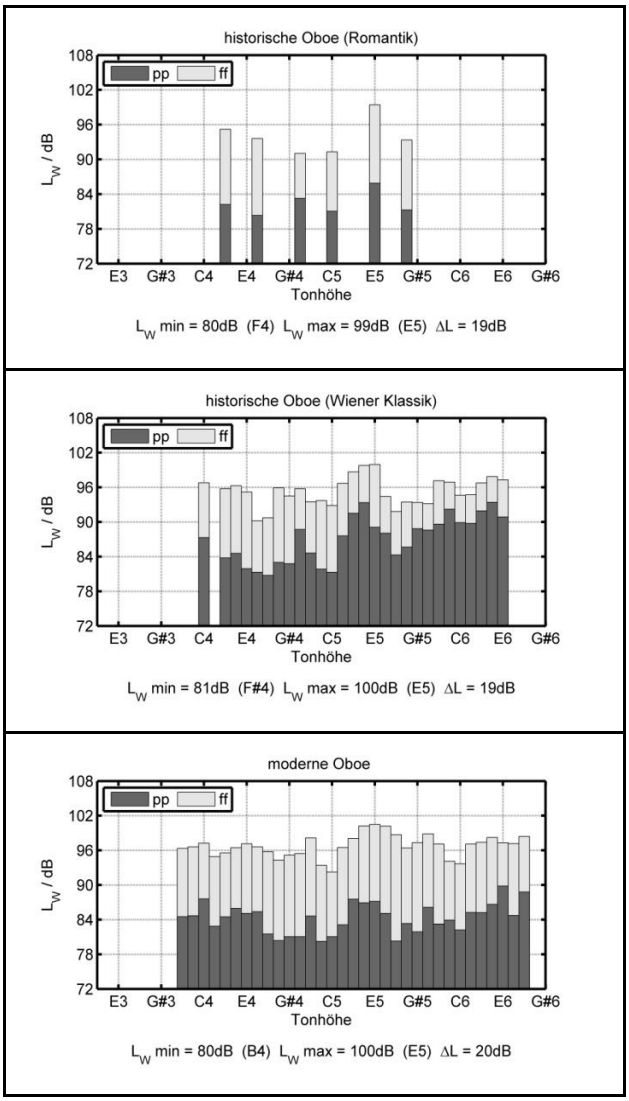

Abbildung 20: unbewertete Schallleistungspegel in chromatischer Skalierung eines typischen Vertreters der Oboe der Romantik (oben), Wiener Klassik (mittig) und Moderne (unten).

Innerhalb einer Dynamikstufe sind sowohl lokale Maxima als auch Minima im Abstand von annähernd eine Oktave zu finden. Die Verminderung der Pegel im Intervall E3 - D4 um 10 dB (*pp*) respektive 6 dB (*ff*) sowie der Anstieg um 10 dB (*pp* sowie *ff*) im weiteren Verlauf, D4 - A4, sind hier als exemplarisch anzusehen. Zudem ist der erreichbare Dynamikumfang, mit 10 dB in tiefer Lage und 12 dB in hoher Lage gegenüber der modernen Oboe etwas eingeengter [7, S. 62–64]. Desweitern sind im

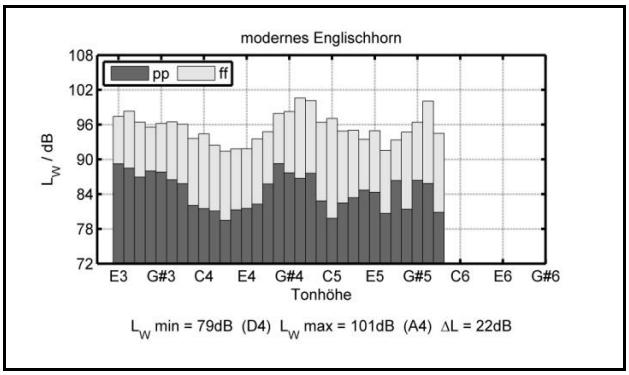

Abbildung 21: unbewertete Schallleistungspegel in chromatischer Skalierung eines modernen Englischhorns.

Vergleich des gemeinsamen Tonumfanges, A#3 - A#5, der beiden modernen Instrumente die Pegelwerte des Englischhorns unabhängig von der Dynamikstufe nur in mittlerer Lage, F#4 - B4, höher. In dieser Lage werden Differenzen von 5 dB (*ff*) und 9 dB (*pp*) ermittelt. Umgekehrt ist ein, besonders in hoher Lage, mit 9 dB höherer *ff*-Wert der modernen Oboe ersichtlich.

C. Klarinette

Im Zuge dieser Untersuchung sind die Ergebnisse der Varianten der Klarinette verschiedener Epochen, beispielsweise dem Bassetthorn, als ein Vertreter der aus der Romantik in Abb. 22, sowie der Bassklarinette in Abb. 23 dargestellt. Sofort ersichtlich sind sowohl der geringere *pianissimo*-Wert, 53 dB, als auch der höhere *fortissimo*-Wert, 110 dB, der modernen gegenüber den Werten der klassischen Klarinette, 57 dB (*pp*) und 105 dB (*ff*) bzw. des Bassetthorns, 59 dB (*pp*) und 102 dB (*ff*). Somit ist, im Gegensatz der anderen untersuchten Holzblasinstrumente historischer Bauart, ein geringerer *pp*-Extremwert der modernen Variante festzustellen. Ferner ist der erweiterte Tonumfang von einer Oktave in der oberen Lage der modernen Klarinette im Vergleich zum Bassetthorn ersichtlich. In der Analyse der Daten in ein und demselben Ton sind über alle Lagen die *ff*-Pegel der modernen Klarinette höher. Gegenüber der klassische Variante werden maximal 7 dB und des Vertreters der Romantik, in der tiefen 13 dB, mittleren sowie hohen Lage 9 dB, höhere Pegel ermittelt. Hinsichtlich der-

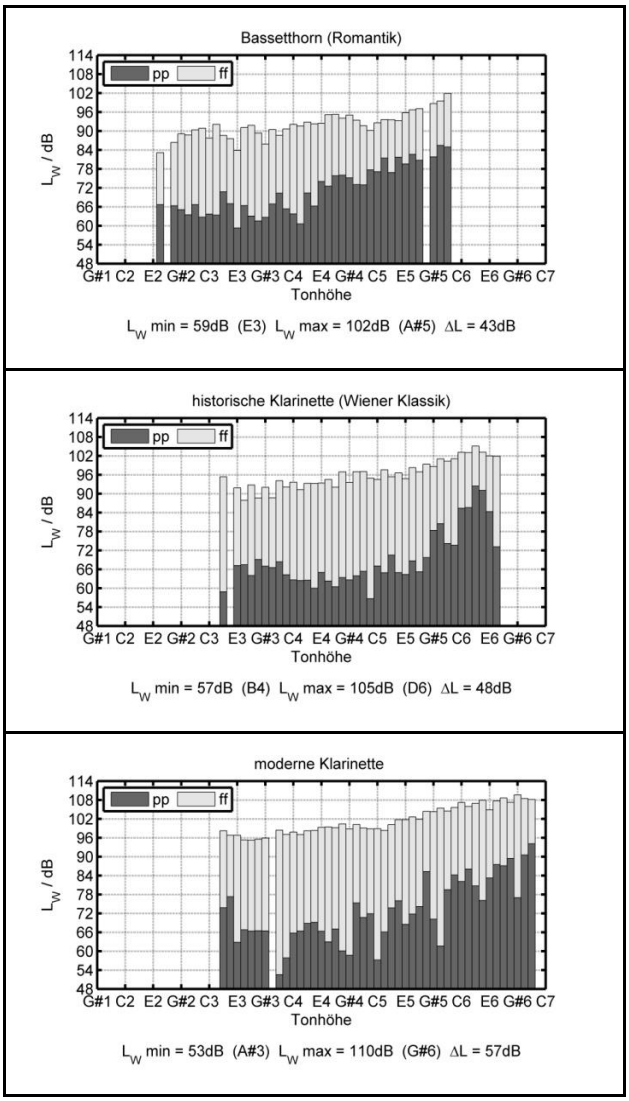

Abbildung 22: unbewertete Schallleistungspegel in chromatischer Skalierung eines typischen Vertreters der Klarinette der Romantik (oben), Wiener Klassik (mittig) und Moderne (unten).

selben Analyse wird die gewonnene Erkenntnis des niedrigen *pianissimo*-Extremwertes der modernen Klarinette nur partiell bestätigt. Im Vergleich zur klassischen sind die *pp*-Werte der modernen Variante für Töne in Mittellage tendenziell höher anzusehen.

Weiterhin sind, wiederum im Vergleich der Varianten, geringere *pp*-Werte des Bassetthorns nur in der tiefen Lage festzustellen. Gleichwohl dieser Feststellung wird ein Dynamikumfang der modernen Klarinette von maximal 46 dB, A#3, ermittelt. Der Dynamikumfang der historischen Varianten – Klassische 38 dB und Bassetthorn 30 dB – ist besonders die mittlere und hohe Lage betreffend, entspre-

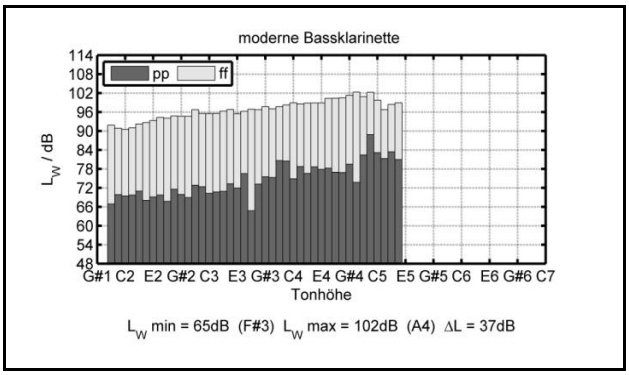

Abbildung 23: unbewertete Schallleistungspegel in chromatischer Skalierung einer modernen Bassklarinette.

chend niedriger. Bezüglich der Schallleistungspegel einer Dynamikstufe wird eine Differenz von 33 dB (*pp*) bzw. 10 dB (*ff*) des modernen und 23 dB (*pp*) bzw. 13 dB (*ff*) des klassischen Instrumentes ermittelt. Das Instrument aus der Epoche der Romantik erreicht eine Differenz von 26 dB (*pp*) bzw. 18 dB (*ff*). In der Betrachtung der absoluten Pegeldifferenz angrenzender Töne wird ebenfalls im *fortissimo* eine Verringerung – modern 3 dB, klassisch 5 dB und Romantik 7 dB – festgestellt. Im *pianissimo* hingegen wird entsprechend der Ergebnisse – moderne Klarinette 18 dB, Bassetthorn sowie klassische Klarinette 10 dB – ein konträres Verhalten nachgewiesen. Im Hinblick auf die Pegeldifferenz innerhalb einer Dynamikstufe sowie angrenzender Töne der Vertreter der Klarinetten wird folglich ein tendenziell homogener Verlauf der Leistungspegel im *ff* des modernen Instrumentes bemerkt.

Für die Bassklarinette, ein weiteres Bassinstrument der Holzblasinstrumente im Orchester, vgl. Kontrafagott, werden Extremwerte von 102 dB (*ff*) bzw. 65 dB (*pp*) ermittelt, Abb. 23. Besonders in der tiefen Lage sind die Pegelwerte beider Dynamikstufen mit 70 dB (*pp*) bzw. 90 dB (*ff*) geringer, steigen aber mit Zunahme der Tonhöhe auf 89 dB (*pp*) respektive 102 dB (*ff*) an. Somit wird in ein und demselben Ton ein Dynamikumfang von 20 dB in tiefer und mittlerer Lage sowie von 13 dB in hoher Lage erreicht. Weiterhin wird eine charakteristische, vgl. Daten der modernen Klarinette, maximale Pegeldifferenz von 3 dB (*ff*) und 12 dB (*pp*) angrenzender Töne ermittelt. Werden die Schallleistungen des gemeinsamen Tonumfanges, D3 – D#5, der modernen Klarinette und Bassklarinette mit in die Betrachtung einbezogen, sind im Gegensatz zu den entsprechenden Vertretern des Fagottes im *fortissimo* keine signifikanten Unterschiede und ferner deutlich höhere *pianissimo*-Werte der Bassklarinette festzustellen.

D. Saxophon

Ergänzend zu den traditionellen Vertretern der Holzblasinstrumente, Fagott, Flöte, etc. sind die ermittelten Schallleistungspegel des Alt- und Tenorsaxophones in Abb. 24, 25 dargestellt. Im Fall des Altsaxophon, Abb. 24, werden Extremwerte von 111 dB im *ff* und 85 dB im *pp* erreicht. Ersichtlich sind die Reduzierung der Pegelwerte um 10 dB im *pp* sowie 5 dB im *ff* innerhalb einer Oktave, D3 - D#4. In diesem Intervall werden unabhängig von der Dynamikstufe die geringsten Pegelwerte, 101 dB (*ff*) sowie der bereits erwähnte *pp*-Extremwert, ermittelt. Somit wird eine Steigerung des Dynamikumfanges in ein und demselben Ton um 6 dB, im Einzelfall bisweilen auch erheblicher, beobachtet. In tiefer und hoher Lage ist dieser mit 10 dB deutlich eingeengter. Des Weiteren ist ein Pegelanstieg von 10 dB (*pp*) und 7 dB (*ff*) mit zunehmender Tonhöhe, D4 - G4, offensichtlich. Exemplarisch wird die mit 8 dB (*pp* sowie *ff*), E4 / F4, bemerkenswerte Pegeldifferenz angrenzender Halbtöne erwähnt. In dieser Lage werden, wiederum unabhängig von der Dynamikstufe, die höchsten Pegelwerte von 97 dB (*pp*) und *ff* ermittelt. In hoher Lage des Tonumfanges des Altsaxophons wird ebenfalls eine Reduzierung der Schallleistungen von 6 dB (*pp*) bzw. 7 dB (*ff*) beobachtet. Beispielsweise wird in dieser Lage eine Pegeldifferenz zwischen den Halbtönen B4 und C5 von 9 dB (*pp*) bzw. 3 dB (*ff*) ermittelt.

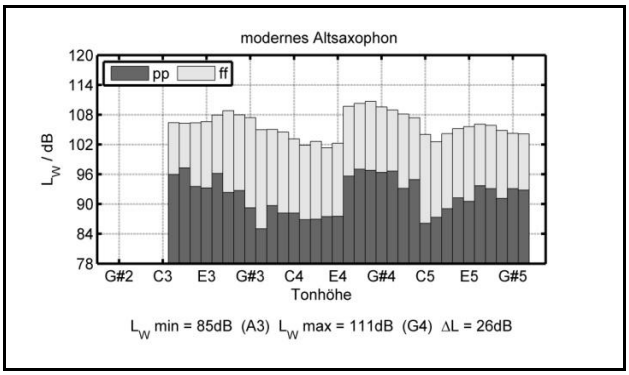

Abbildung 24: unbewertete Schallleistungspegel in chromatischer Skalierung eines Altsaxophons.

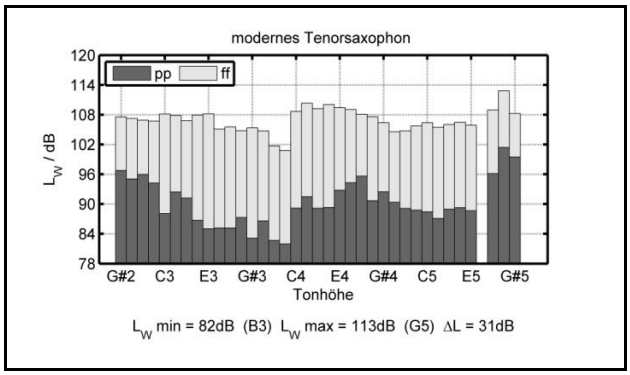

Abbildung 25: unbewertete Schallleistungspegel in chromatischer Skalierung eines Tenorsaxophons.

Für das Tenorsaxophon, Abb. 25, werden, mit 82 dB sowie 113 dB, geringfügig von den Werten des Altsaxophons abweichende Extremwerte festgestellt. Im Hinblick auf den Verlauf der ermittelten Pegel beider Dynamikstufen über den Tonumfang dieses Vertreters ist ein tendenziell homogener Verlauf ersichtlich. In tiefer Lage werden Schallleistungspegel von 97 dB (*pp*) und 108 dB (*ff*) erreicht. Bemerkenswert ist eine Reduzierung der Pegelwerte um 14 dB (*pp*) bzw. 6 dB (*ff*) der Töne innerhalb einer Oktave, A#2 - A#3. Für Töne in mittlerer Lage werden sowohl die geringsten, 82 dB (*pp*), 101 dB (*ff*) als auch die annähernd höchsten Pegelwerte, 96 dB (*pp*), 110 dB (*ff*), beider Dynamikstufen ermittelt. In dieser Lage ist somit eine ausgeprägte Pegeldifferenz, in diesem Fall von 7 dB (pp) und 8 dB (ff), angrenzender Halbtöne, B3 / C4, festzustellen. Dieses Merkmal, nahezu eine Terz höher, ist im Abschnitt über das Altsaxophon ebenfalls erläutert. Mit weiterer Zunahme der Tonhöhe, dementsprechend Töne der hohen Lage, erreicht das Tenorsaxophon die höchsten Pegelwerte in beiden Dynamikstufen. Ergänzend sei der *pp*-Wert von 101 dB, G5, erwähnt. Aufgrund der vorangehenden Darlegungen wird für Halbtöne in tiefer bzw. hoher Lage ein minimaler Dynamikumfang von 10 dB erreicht. Anderenfalls ist für einen Bereich von zwei Oktaven, C3 - C5, ein Dynamikumfang von annähernd 20 dB ersichtlich.

Ungeachtet der Unterschiede der Vertreter der Saxophone in der klangfarblichen Charakteristik ist in einem Vergleich der Schallleistungen des gemeinsamen Tonumfanges, C#3 - G#5, die Abhängigkeit von der Stimmlage und somit der tendenziell höhere Pegel des jeweiligen Vertreters in beiden Dynamikstufen ersichtlich. Zu diesem Zweck ist exemplarisch die Differenz der Pegelwerte von 4 dB (*pp*) und 8 dB (*ff*) für die Note C#4 sowie 4 dB (*pp*) und 3 dB (*ff*) für die Note G4 beider Vertreter angegeben.

E. Fagott

Die ermittelten Daten der eingespielten Einzeltöne der historischen Vorläufer, des modernen Fagottes sowie ergänzend dessen Entsprechung für die tiefen Lagen, sind in den Abb. 26 - 28 dargestellt. Im Hinblick auf die Extremwerte der Schallleistungspegel der untersuchten Varianten der Fagotte der Wiener Klassik und Moderne ist besonders die Zunahme im ermittelten *fortissimo*-Wert ersichtlich. Der moderne Vertreter erreicht im *ff* 104 dB, einen um 3 dB höheren maximalen Pegel als die klassische Variante. Die Analyse der eingespielten Daten in ein und demselben Ton, sowohl im *ff* als auch im *pp*, verdeutlicht eine Tendenz zu höheren Pegeln. Im *ff* erreicht der moderne Vertreter in dieser Untersuchung in der mittleren und hohen Lage, A4, bis zu 9 dB höhere Pegel. Im *pianissimo* erzeugen modernes und klassisches Fagott einen identischen minimalen Pegel. Werden in dieser Betrachtung die ermittelten *pp*-Werte mit einbezogen, erreicht das moderne Fagott lediglich in der tiefen, C2 - G#2, und hohen Lage, F#4 - C5, geringere

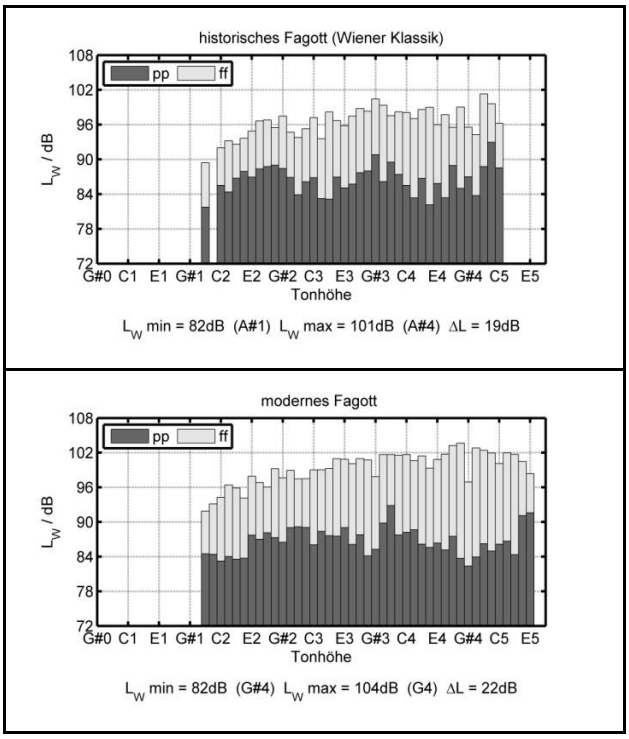

Abbildung 26: unbewertete Schallleistungspegel in chromatischer Skalierung eines um 1800 typischen (oben) und modernen Fagotts (unten).

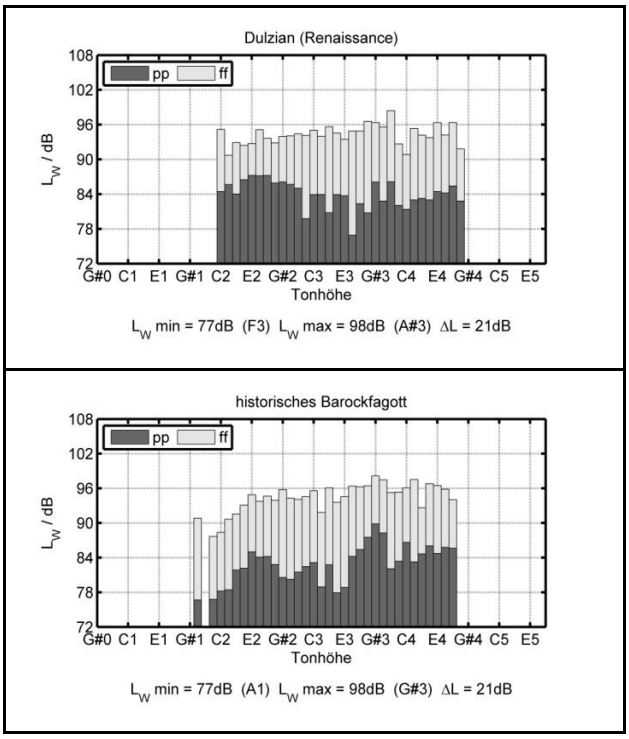

Abbildung 27: unbewertete Schallleistungspegel in chromatischer Skalierung eines Dulzians (oben) und Barockfagotts (unten).

Werte. Somit vergrößert sich der maximal erreichbare Dynamikumfang des modernen Fagottes im Vergleich zum klassischen, Abb. 26, hauptsächlich in der tiefen, D2, um 6 dB und hohen Lage, B4, um 10 dB.

In beiden Dynamikstufen bekräftigen die vorliegenden Daten der historischen Vorläufer des klassischen Fagotts, Dulzian und Barockfagott, die Tendenz der höheren Pegelwerte des Modernen im Vergleich zu den Instrumenten historischer Bauweise, Abb. 26, 27. Bemerkenswert ist hierbei die Zunahme der Pegel im *ff* in hoher, um bis zu 11 dB, in mittlerer und tiefer Lage um bis zu 6 dB. Wiederum werden, besonders in mittlerer Lage, bis zu 11 dB höhere *pp*-Werte des modernen Instrumentes festgestellt. Ferner wird für Barockfagott und Dulzian, basierend auf den Extremwerten, ein identischer Dynamikumfang bestimmt. Auffallend in der Analyse dieser historischen Vertreter sind die höheren Leistungspegel im *pp* des Dulzian in der tiefen Lage und die geringfügigen Unterschiede der *ff*-Werte. Desweitern wird im Vergleich der Varianten der Fagotte bzgl. des eingespielten Tonumfangs eine Erweiterung der spielbaren Tonhöhe in der hohen Lage um eine Terz festgestellt.

Hinsichtlich der maximalen Differenz der Pegelwerte über demselben Tonumfang innerhalb einer Dynamikstufe der Instrumente werden nur geringfügige Unterschiede festgestellt. Der Dulzian, als frühester Vertreter, erreicht hierbei, 10 dB (*pp*) und 8 dB (*ff*) einen nahezu identischen Umfang im Vergleich zu den Werten des modernen, 10 dB (*pp*) und 9 dB (*ff*) sowie des klassischen Vertreters, 9 dB (*pp*) und 8 dB (*ff*). In beiden Dynamikstufen werden für das Barockfagott, 12 dB (*pp*) und 10 dB (*ff*) größere Abweichungen ermittelt. Auffallend sind die Verlagerung des lokalen Maximums, G#3, in beiden Dynamikstufen der historischen Varianten zu finden, zum Ton A#3 der modernen Variante und eine Verminderung der maximalen Differenz der Pegelwerte zwischen angrenzenden Halbtönen. Dies ist im besonderen Maße für Töne der hohen Lage im *fortissimo* zutreffend. Beispielhaft werden für das moderne Instrument Differenzen von 2 dB, D4 - D#4, und für den Dulzian von 6 dB, A#3 - B3, ermittelt.

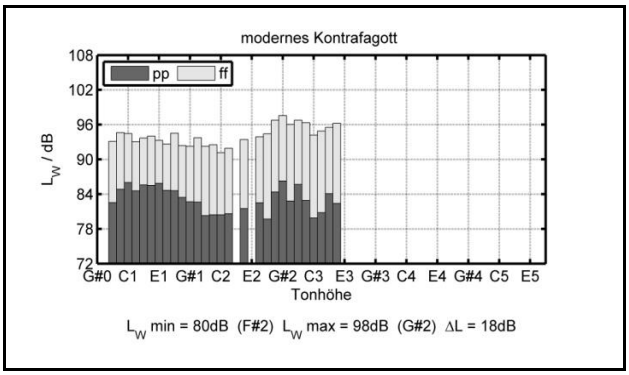

Abbildung 28: unbewertete Schallleistungspegel in chromatischer Skalierung eines modernen Kontrafagotts.

Das Kontrafagott, Abb. 28, erreicht maximal 98 dB im *ff* und minimal 80 dB im *pp*. Der Dynamikumfang ist besonders in der tiefen Lage stark begrenzt, 10 dB, steigt aber mit zunehmender Tonhöhe aufgrund der im *ff* ansteigenden respektive im *pp* tendenziell fallenden Schallleistungen auf 15 dB an. Innerhalb einer Dynamikstufe wird eine Differenz von 6 dB (*pp*) sowie 7 dB (*ff*) festgestellt. Des Weiteren werden die geringsten Pegelwerte, sowohl im *ff* als auch *pp*, in der mittleren Lage des Tonumfanges des Instrumentes ermittelt. In der höchsten eingespielten Lage, F2 - D#3, erzeugt das Kontrafagott zudem im *pianissimo* bis zu 9 dB und im *fortissimo* bis zu 5 dB geringere Pegel als der moderne Vertreter in der höheren Stimmlage, vgl. Abb. 26.

F. Horn

Die entsprechenden Extremwerte zur Schallleistung des modernen Doppelhorns, 75 dB (*pp*) und 114 dB (*ff*), sowie des Inventionshorns aus der Epoche der Wiener Klassik, 74 dB (*pp*) und 111 dB (*ff*), sind in Abb. 29 dargestellt. Anhand der Daten ist im *pianissimo* ein geringfügig abweichender, im *fortissimo* ein um 3 dB höherer Wert und ferner die charakteristische Erweiterung des spielbaren Tonumfanges des Doppelhorns erkennbar. Hinsichtlich der Analyse der Pegelwerte in ein und demselben Ton beider Instrumente wird jedoch ein identischer Maximalwert von 111 dB festgestellt. Größere Differenzen werden insbesondere in tiefer und mittlerer Lage ermittelt. In tiefer Lage erzeugt das moderne

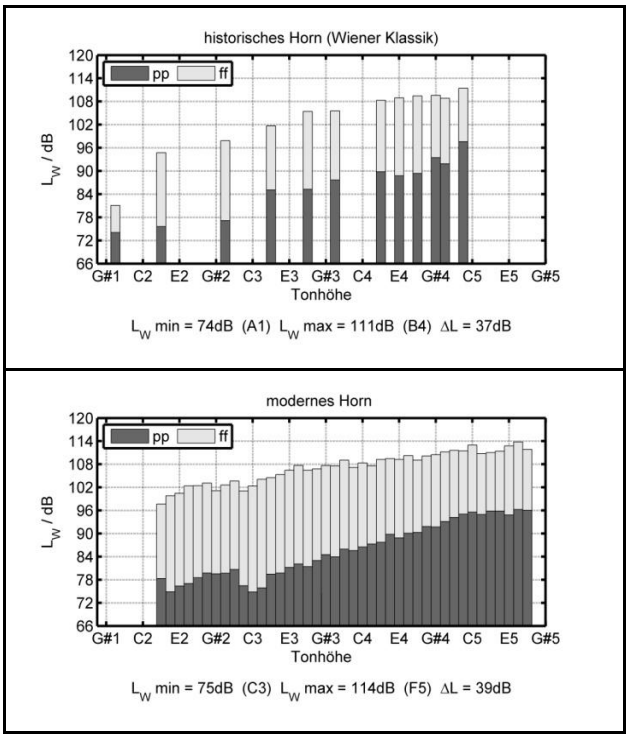

Abbildung 29: unbewertete Schallleistungspegel in chromatischer Skalierung eines für die Zeit um 1800 typischen Inventionshorns (oben) und modernen Doppelhorns (unten).

Instrument einen um 5 dB (*ff*) und 3 dB (*pp*) höheren bzw. in mittlerer Lage im *ff* einen geringfügig höheren sowie im *pianissimo* mit bis zu 6 dB tendenziell geringeren Pegelwert. Somit erreicht das moderne Instrument einen Dynamikumfang in tiefer und mittlerer Lage von bis zu 28 dB, ferner in hoher Lage annähernd 18 dB.

Auffallend ist die geringere maximale Differenz der Pegelwerte einer Dynamikstufe des Doppelhorns. Die Unterschiede des modernen Instrumentes betragen 20 dB (*pp*) respektive 14 dB (*ff*). Hinsichtlich der historischen Variante wird eine Differenz von 22 dB (*pp*) sowie 16 dB (*ff*) und mit maximal 21 dB ein deutlich geringer Umfang der Dynamik in ein und demselben Ton festgestellt. Mit zunehmender Tonhöhe ist, vergleichbar in Verlauf und Betrag des modernen Instrumentes, ein abnehmender Umfang der Dynamik erkennbar.

G. Trompete

In einer Gegenüberstellung der ermittelten Schallleistungspegel einer historischen und modernen Trompete, Abb. 30,

sind zunächst im Hinblick auf den 5 dB geringeren *ff*- und 7 dB höheren *pp*-Wert sowie zusätzlich der begrenzte Tonumfang, der historischen Variante, folglich signifikante Unterschiede festzustellen. Andererseits wird eine Tendenz zu höheren *ff*- sowie geringeren *pp*-Pegeln des modernen Instrumentes infolge der Betrachtung der Pegelwerte desselben Tones der Instrumente teilweise bestätigt. Für das moderne Instrument werden im *pianissimo* für Töne in tiefer Lage geringere, andererseits in hoher Lage ein bis zu 4 dB höherer Pegelwert ermittelt. Im *fortissimo* werden in tiefer Lage tendenziell ausgeglichene, sowie wiederum in hoher Lage ein bis zu 5 dB höherer Pegelwert festgestellt. Dementsprechend wird im Bezug auf den möglichen Umfang der Dynamik der eingespielten Einzeltöne bereits in tiefer Lage ein Betrag von 20 dB, in Ausnahmen 26 dB, für das moderne Instrument ermittelt. In hohen Lagen, ab der Tonhöhe E5, wird aufgrund der vorrangig gestiegenen *pp*-Werte – D#6 = 100dB zugleich Maximalwert der Dynamikstufe – auf einen bis zu 12 dB abnehmenden somit geringeren Dynamikumfang verwiesen.

Für das historische Instrument sind kennzeichnend, in gleicher Weise für das moderne Instrument zutreffend, die mit zunehmender Tonhöhe, tendenziell ansteigenden Pegelwerte in beiden Dynamikstufen. Im Fall der zwei höchsten Töne wird ein gleichförmig abnehmender Betrag der Schallleistungen im *ff* und *pp* und ferner ein nahezu konstant eingeengter Umfang der Dynamik ermittelt. Im Bezug auf den Umfang der möglichen Dynamik der eingespielten Einzeltöne erreicht das historische Instrument, aufgrund der bereits erwähnten geringeren *ff*-Werte, ein Umfang der Dynamik von maximal 23 dB. Bemerkenswert ist wiederum, ab der Tonhöhe E5, die Verringerung des Umfanges der Dynamik. In hohen Lagen wird bei diesem Vertreter, infolge der gestiegenen *pp*-Werte, eine minimale Differenz der Beträge der Dynamikstufen von 10 dB ermittelt. Bezüglich der Differenz der Pegelwerte angrenzender Halbtöne wird im Fall der Trompeten der Bereich A5 - D6 in die Betrachtung einbezogen. Hinsichtlich dieses Bereiches werden für das moderne Instrument in beiden Dynamikstufen tendenziell geringere Abweichungen festgestellt.

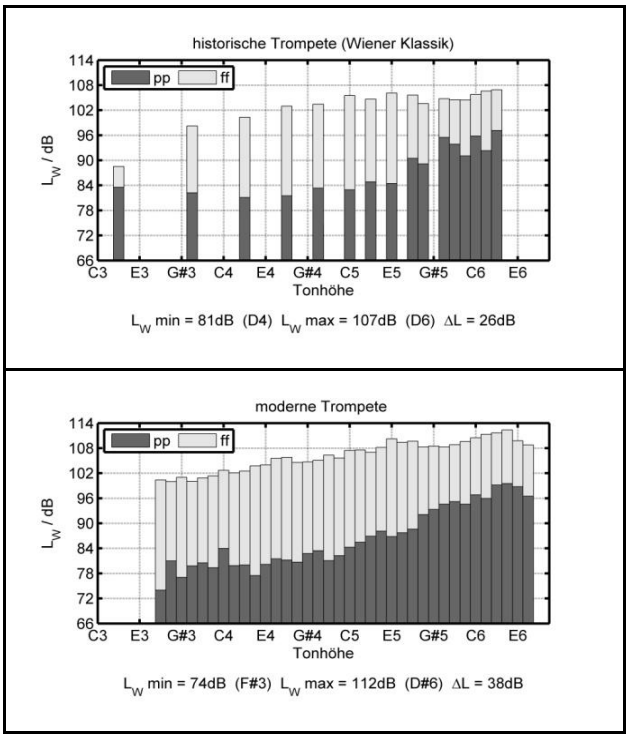

Abbildung 30: unbewertete Schallleistungspegel in chromatischer Skalierung einer für die Zeit um 1800 typischen (oben) und modernen Trompete (unten).

H. Posaune

Im Zuge eines Vergleiches sind die erhobenen Daten einer für die Zeit der Romantik typischen Altposaune, einer historischen und modernen Tenorposaune, sowie der Bassposaunen verschiedener Epochen in Abb. 31, 32 dargestellt. Basierend auf den *pianissimo*- und *fortissimo*-Schallleistungswerten werden signifikante Unterschiede, sowohl der erzeugten Extrem- als auch der Pegelwerte desselben Tones, der Posaunen historischer und moderner Konstruktion festgestellt. Grundsätzlich wird für das entsprechende moderne Instrument ein geringerer *pp*-Wert und höherer *ff*-Wert ermittelt. Diese Tendenz ist bereits anhand der erzeugten Extremwerte ersichtlich, wird durch die Einzeltonbetrachtung bestätigt und somit ein größerer Umfang des Dynamikbereiches der modernen Instrumente nachgewiesen.

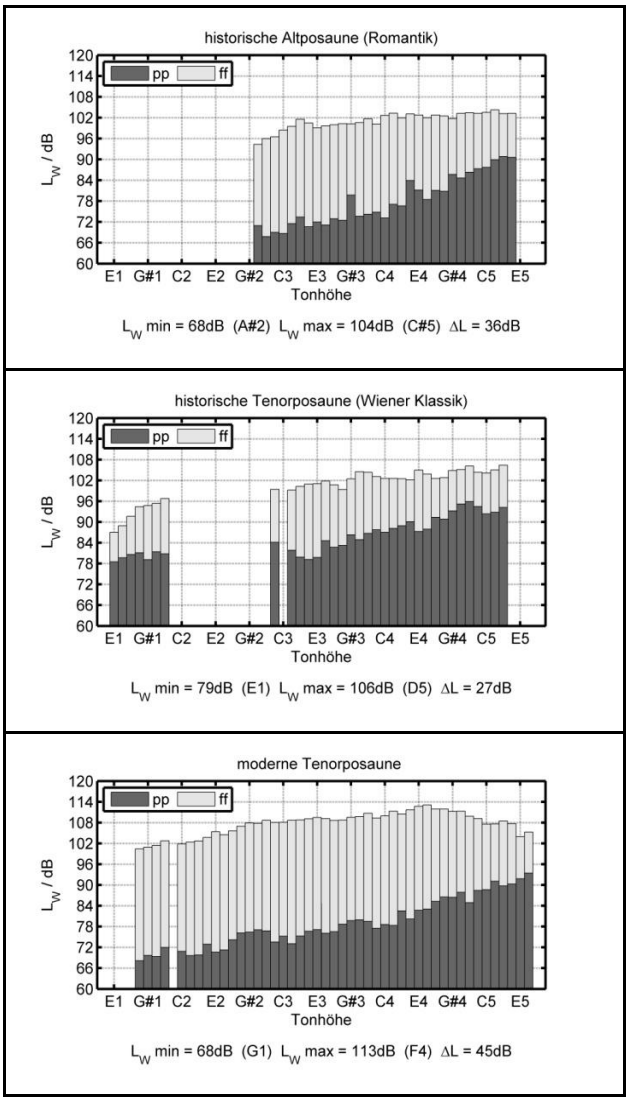

Abbildung 31: unbewertete Schallleistungspegel in chromatischer Skalierung einer für die Zeit der Romantik (oben), um 1800 typischen (mittig) und modernen Posaune (unten) der Alt- bzw. Tenorlage.

Im Fall der Posaunen der Tenorlage, Abb. 31, werden für das moderne Instrument Extremwerte von 68 dB (*pp*) und 113 dB (*ff*) ermittelt. Die klassische Variante erzeugt im *pp* 11 dB höhere und *ff* 7 dB geringere Extremwerte. Innerhalb einer Dynamikstufe wird für das moderne Instrument eine Pegeldifferenz von 23 dB (*pp*) und 13 dB (*ff*) sowie mit 17 dB (*pp*) und 12 dB (*ff*) für das klassische Instrument ein entsprechend geringerer Wert festgestellt. Ferner ist für den klassischen und modernen Vertreter die charakteristische Zunahme der Schallleistung mit ansteigender Tonhöhe in beiden Dynamikstufen, insbesondere im *pp*, zu bemerken. Eingrenzend wird nach Erreichen des Maximalwertes eine, mit zunehmender Tonhöhe, schrittweise Verminderung der *ff*-Pegelwerte von insgesamt 10 dB im Fall der modernen Variante festgestellt. Bezüglich der Pegeldifferenz desselben Tonumfanges werden im *pp* in tiefer Lage die mit bis zu 13 dB geringeren, mit zunehmender Tonhöhe in Betrag tendenziell abnehmenden Werte, des modernen Instrumentes ermittelt. Ferner erreicht die moderne Variante im *ff* einen mit maximal 10 dB, sowie in tiefer mit 6 dB und hoher Lage mit 3 dB, deutlich höheren Pegelwert. Somit ist für das moderne Instrument ein maximal erreichbarer Umfang der Dynamik in ein und demselben Ton von 36 dB sowie für das klassische von 20 dB anzugeben. Bemerkenswert ist der Umfang der Dynamik des modernen Instrumentes von annähernd 32 dB über einen Tonumfang von nahezu drei Oktaven, G1 - F4. Darüber hinaus ist im *ff* als auch *pp* eine geringere absolute Pegeldifferenz angrenzender Halbtöne der modernen Variante festzustellen. Für ein erweitertes Intervall, G3 - A3, wird beispielhaft eine Differenz von 1 dB (*ff*) für das moderne und von 5 dB (*ff*) für das klassische Instrument ermittelt.

Ergänzend zur Untersuchung der Posaunen der Wiener Klassik und Moderne der Tenorlage wird für einen Vertreter aus der Epoche der Romantik, die Altposaune, im Hinblick auf die Extremwerte der modernen Variante, ein identischer *pp*-Wert und mit 104 dB ein um 9 dB geringerer *ff*-Wert ermittelt. Ferner werden im Vergleich der Schallleistungen desselben Tones des modernen Instrumentes sowie der Altposaune im *pianissimo*, in tiefer Lage, bis zu 9 dB niedrigere Werte und in hoher Lage keine signifikanten Abweichungen ermittelt. In gleicher Betrachtungsweise werden im *fortissimo*, in tiefer bis zu 13 dB und in hoher Lage bis zu 6 dB, geringere Pegelwerte der Altposaune festgestellt. Bemerkenswert sind, im Vergleich zur Tenorposaune der Wiener Klassik, der geringfügig abweichende maximale *ff*-Wert und der, aufgrund der geringeren *pp*-Werte, deutlich höhere Dynamikumfang der Altposaune.

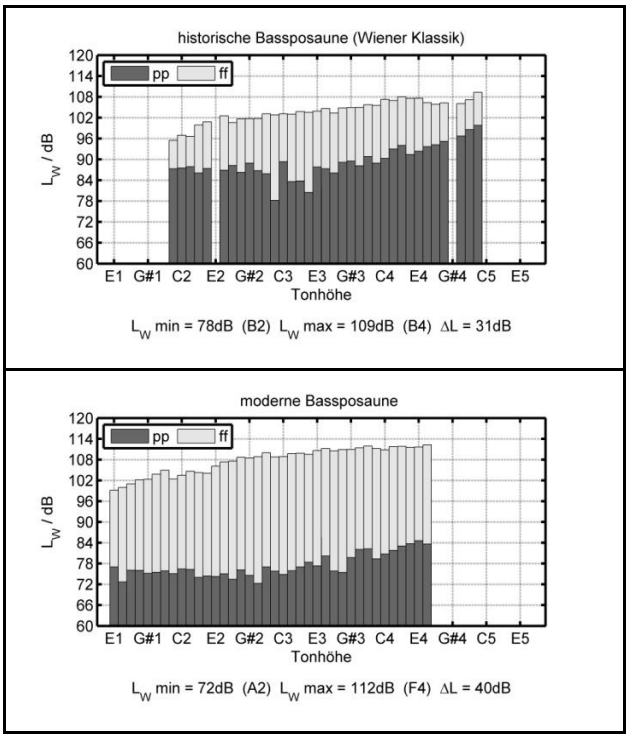

Abbildung 32: unbewertete Schallleistungspegel in chromatischer Skalierung einer für die Zeit um 1800 typischen (oben) und modernen Bassposaune (unten).

Bezüglich der in Abb. 31 vorgestellten Vertreter ist für die Altposaune die geringste Differenz der Pegelwerte einer Dynamikstufe, 13 dB (*pp*) und 10 dB (*ff*) und andererseits, auffallend, eine höhere Pegeldifferenz im *pp*, bis zu 8 dB, zwischen angrenzenden Halbtönen, G3 / G#3, ersichtlich. Im Vergleich werden für das moderne, 23 dB (*pp*) und 13 dB (*ff*) sowie klassische, 17 dB (*pp*) 12 dB (*ff*), Instrument innerhalb einer Dynamikstufe entsprechend höhere Differenzen der Pegelwerte ermittelt.

Im Zuge des Vergleiches der Extremwerte der Bassposaunen, Abb. 32, werden für die historische mit 78 dB (*pp*) höhere sowie mit 109 dB (*ff*) geringere Schallleistungen angeführt. Für die moderne Variante werden hingegen um 6 dB (*pp*) respektive 3 dB (*ff*) deutlich abweichende Extremwerte ermittelt. Die Tendenz zu geringeren *pianissimo*- bzw. höheren *fortissimo*-Pegel des modernen Instrumentes wird in einer Betrachtung der erreichten Schallleistung desselben Halbtones verstärkt. Im *pp* wird, besonders in tiefer Lage, ein um bis zu 15 dB geringer Wert ermittelt. Im *ff*, wiederum in tiefer Lage, werden von der modernen Bassposaune bis zu 8 dB höhere Pegelwerte erreicht. Diese Pegeldifferenz nimmt tendenziell über den gemeinsamen Tonumfang mit zunehmender Tonhöhe ab, erreicht jedoch in hoher Lage minimal 4 dB (*ff*) bzw. 8 dB (*pp*).

Bemerkenswert ist wiederum der Umfang der spielbaren Dynamik des modernen Instrumentes. Über einen Tonumfang von zwei Oktaven, D2 - D4, werden über 30 dB und maximal 37 dB ermittelt. Das historische Instrument erreicht in dieser Untersuchung einen mit maximal 25 dB entsprechend geringeren Dynamikumfang. Im Gegensatz zu den aufgeführten Werten der Vertreter der Tenorlage wird für die historische mit 16 dB (*pp*) und 13 dB (*ff*) sowie für die moderne Bassposaune mit 13 dB (*pp*) und 10 dB (*ff*) somit eine geringere maximale Differenz der Pegelwerte innerhalb einer Dynamikstufe festgestellt. Ebenso ist die, insbesondere im *pianissimo*, geringere maximale Pegeldifferenz angrenzender Halbtöne des modernen Instrumentes signifikant. Hierzu wird exemplarisch im Intervall A2 - B2 eine Differenz von nahezu 5 dB des modernen und ferner 10 dB des historischen Instrumentes ermittelt.

Hinsichtlich eines Vergleiches der Schallleistungen beider Stimmlagen der modernen sowie historischen Vertreter werden für die Varianten der Tenorlage in beiden Dynamikstufen, charakteristisch, geringere Pegelwerte festgestellt. Demgegenüber sind die Unterschiede der Schallleistungen historischer Varianten in beiden Dynamikstufen als ausgeprägter zu betrachten. Des Weiteren sind keine signifikanten Abweichungen der *ff*-Pegelwerte der modernen Varianten zu erkennen. Eingrenzend sind an dieser Stelle die, in tiefer Lage, kennzeichnend höheren *pp*-Werte der Bassposaune zu erwähnen.

I. Tuba

Der Tonumfang sowie die entsprechenden Schallleistungen der verwendeten Tuba dieser Untersuchung sind in Abb. 33 dargestellt. Außergewöhnlich sind der Ton-

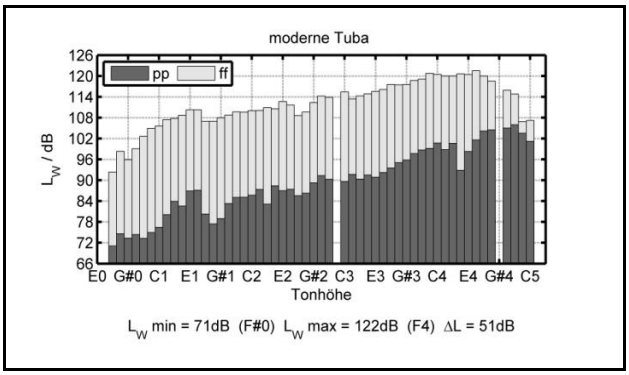

Abbildung 33: unbewertete Schallleistungspegel in chromatischer Skalierung einer modernen Tuba.

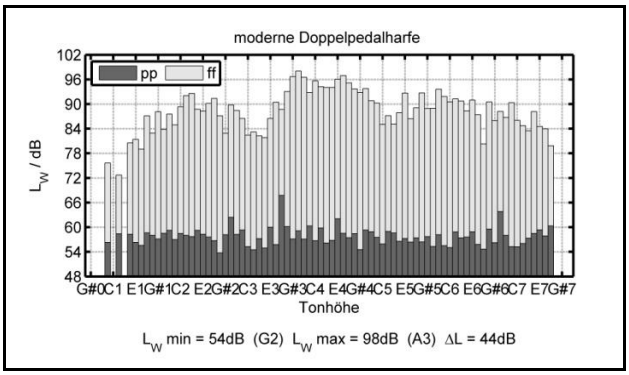

Abbildung 34: unbewertete Schallleistungspegel in chromatischer Skalierung einer modernen Doppelpedalharfe.

umfang von nahezu fünf Oktaven und ein maximaler Schallleistungspegel von 122 dB. In tiefer Lage werden Pegelwerte von 71 dB (*pp*) und 92 dB (*ff*) erreicht. Für Töne in hoher Lage werden 106 dB (*pp*) und 122 dB (*ff*) ermittelt.

Ebenfalls bemerkenswert ist die Zunahme der Schallleistungen um 20 dB (*ff*) und 10 dB (*pp*) innerhalb des Tonumfanges einer Oktave der Töne in tiefen Lage. Resultierend ist ein Umfang der Dynamik oberhalb von 20 dB für nahezu den gesamten Tonumfang anzugeben. Bisweilen werden in tiefer Lage 30 dB sowie einschränkend für erzeugte Töne einer Tuba in ungewöhnlich hoher Lage deutlich geringere Werte erreicht. Weiterhin ist im Bereich der Töne E1 - G1 in beiden Dynamikstufen eine Pegeldifferenz von 10 dB (*pp*) respektive 3 dB (*ff*) ersichtlich. Diese Charakterisitk ist ebenso in der entsprechend höheren Oktave geringer ausgeprägt auffallend.

J. Harfe

Die Schallleistungswerte einer in dieser Untersuchung verwendeten modernen Doppelpedalharfe sowie der Konzertgitarre und Pauken sind, nach dem beschrieben Verfahren – Kap. IV, Ermittlung des Toneinsatzes und der frühen Abklingzeit – hinreichend für die Bestimmung des relevanten Teil des Tones und somit für die Berechnung der Schallleistung ermittelt und in den Abb. 34, 36, 38 dargestellt.

Die ermittelten Schallleistungspegel der untersuchten Doppelpedalharfe sind in Abb. 34 dargestellt. Ferner sind die berechnete Pegeldifferenz zwischen Spitzenpegel und Einsatz der späten Nachklingphase sowie anfängliche und spätere Ausklingzeit in Abb. 35 abgebildet. Hinsichtlich der Extremwerte sind für die Harfe 54 dB (*pp*) und 98 dB (*ff*) anzugeben. Im *pp* werden in tiefer Lage und hoher Lage im Mittel 58 dB, ferner in Ausnahmen über 60 dB ermittelt. Auffallend ist im Bereich F3 / F#3 die Steigerung um 12 dB auf den Maximalwert von 68 dB in dieser Dynamikstufe. Im *ff* hingegen wird bereits in tiefer Lage innerhalb von etwas mehr als einer Oktave eine Steigerung der Pegel von anfänglich 73 dB auf 93 dB festgestellt. In Mittellage wird wiederum innerhalb eines Tonumfanges von etwas mehr als einer halben Oktave eine Zunahme der Pegelwerte um 16 dB, somit das Erreichen des Maximalwertes des oberen Dynamikumfanges und zu höchsten Lagen hin tendenziell ein Absinken um 18 dB ermittelt. Infolge der Hauptresonanzen [7, S. 95] lassen sich besonders für Töne der ungeradzahligen D*n* / D#*n* in Mittellage lokale Minima ferner für geradzahlige D*n* / D#*n* Maxima feststellen. Hinsichtlich der Dynamikspanne in ein und demselben Ton werden annähernd über den gesamten Tonumfang Werte von über 25 dB erreicht. Besonders in Mittellage ergeben sich die höheren Werte. In dieser Lage kann für einzelne Töne eine maximale Dynamikspanne von 40 dB angegeben werden.

Ergänzend zu den vorangestellten Angaben der Schallleistungspegel sind im Hinblick auf die Klangeigenarten der Doppelpedalharfe, im Besonderen die zeitliche

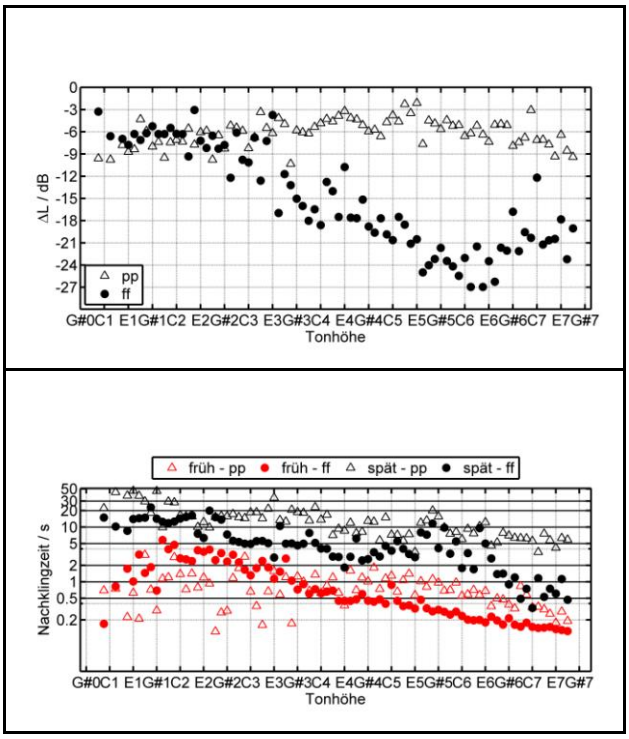

Abbildung 35: Pegeldifferenz zwischen Spitzenpegel und Einsatz der späten Nachklingphase (oben) sowie anfängliche (rot) und spätere (schwarz) Ausklingzeit (unten) in chromatischer Skalierung einer modernen Doppelpedalharfe.

Feinstruktur des Ausklingvorganges, die ermittelten Pegeldifferenzen zwischen Spitzenpegel und Einsatz der späten Nachklingphase, ferner anfängliche und spätere Ausklingzeiten – Kap. IV, Berechnung der Abklingzeiten [7, S. 91] – in Abb. 35 dargestellt. Für Töne in tiefster Oktave werden Werte bezüglich der frühen Abklingphase von 6 s bis unter 2 s, ferner um 14 s vereinzelt über 20 s für die spätere Ausklingzeit ermittelt. In dieser Lage erfolgt der Einsatz der späten Abklingphase auf einem hohen Pegelniveau. Ausgehend von Werten um 2 s wird für die höheren Tonlagen, bis über die Mittellage hinaus, eine Verringerung der frühen Abklingzeit, um den Faktor 2 pro Oktave, sowie im *ff* ein Absinken des Einsatzes der späteren Abklingzeit festgestellt. In der höchsten Oktave steigt die Pegeldifferenz zwischen Spitzenpegel und Einsatz der späten Nachklingphase deutlich an.

Im Hinblick auf die dargestellte spätere Ausklingzeit wird, wiederum besonders in der höchsten Oktave, eine Verringerung auf einen Wert von 0,5 s ermittelt. In mittlerer Lage wird eine Ausklingzeit im Mittel von 5 s angegeben. In Bezug auf die im vorangegangenen Absatz beispielhaft beschriebene Charakteristik der lokalen Extrema, z.B.: D4 / D5, der Schallleistungen, lässt sich hinsichtlich der Maxima eine Verringerung respektive bei Minima eine Zunahme der späteren Abklingzeit feststellen. Weiterhin werden im Tonbereich der höchsten Schallleistungen, G3 - G4, und Hauptresonanzen [7, S. 95] charakteristisch geringere spätere Abklingzeiten im Vergleich zu den Werten der entsprechend tieferen oder höheren Oktave ermittelt.

K. Gitarre

Hinsichtlich der erzeugten Extremwerte der Konzertgitarre sind im *pianissimo* 62 dB und im *fortissimo* 90 dB anzugeben, Abb. 36. Bemerkenswert ist ein von der Dynamikstufe unabhängiger und von der Tonhöhe abhängiger charakteristischer Verlauf der Pegelwerte. Beispielhaft hierfür werden 75 dB (*pp*) sowie 90 dB (*ff*), als Maximalwerte der entsprechenden Dynamikstufe, im Ton A#3 ermittelt. Daneben wird ein Anstieg der Pegelwerte im Tonbereich E3 - A#3 von 11 dB (*pp*) und 13 dB (*ff*), ferner mit verminderter Ausprägung des Anstiegs der Werte der entsprechenden Töne der höheren Oktaven festgestellt. Diese Steigerung entspricht annähernd der ermittelten maximalen Pegeldifferenz zwischen den Extremwerten, 13 dB (*pp*) und 15 dB (*ff*), der Töne einer Dynamikstufe. Folglich werden im jeweiligen Tonintervall für die entsprechenden Halbtöne ebenfalls die höheren Differenzen der Pegelwerte angrenzender Töne festgestellt. Bezüglich der Dynamikspanne in ein und demselben Ton erreicht die Konzertgitarre in tiefer und hoher Lage minimal 8 dB und tendenziell für Töne in mittlerer Lage maximal 20 dB.

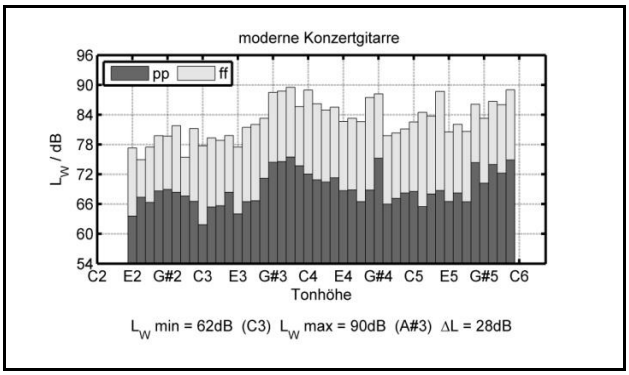

Abbildung 36: unbewertete Schallleistungspegel in chromatischer Skalierung einer modernen Konzertgitarre (Standard - Stimmung).

Hinsichtlich der erzeugten Extremwerte der Konzertgitarre sind im *pianissimo* 62 dB und im *fortissimo* 90 dB anzugeben. Bemerkenswert ist ein von der Dynamikstufe unabhängiger und von der Tonhöhe abhängiger charakteristischer Verlauf der Pegelwerte. Beispielhaft hierfür werden 75 dB (*pp*) sowie 90 dB (*ff*), als Maximalwerte der entsprechenden Dynamikstufe, im Ton A#3 ermittelt. Daneben wird ein Anstieg der Pegelwerte im Tonbereich E3 - A#3 von 11 dB (*pp*) und 13 dB (*ff*), ferner mit verminderter Ausprägung des Anstiegs der Werte der entsprechenden Töne der höheren Oktaven festgestellt. Diese Steigerung entspricht annähernd der ermittelten maximalen Pegeldifferenz zwischen den Extremwerten, 13 dB (*pp*) und 15 dB (*ff*), der Töne einer Dynamikstufe. Folglich werden im jeweiligen Tonintervall für die entsprechenden Halbtöne ebenfalls die höheren Differenzen der Pegelwerte angrenzender Töne festgestellt. Bezüglich der Dynamikspanne in ein und demselben Ton erreicht die Konzertgitarre in tiefer und hoher Lage minimal 8 dB und tendenziell für Töne in mittlerer Lage maximal 20 dB.

Die ermittelten Pegeldifferenzen zwischen Spitzenpegel und Einsatz der späten Nachklingphase, ferner anfängliche und spätere Ausklingzeiten [7, S. 91] der Konzertgitarre sind in Abb. 37 dargestellt. In Anbetracht der Pegeldifferenz zwischen dem Spitzenwert und der Knickstelle – Kap. IV, Schallenergiepegel – zwischen frühem und späterem Nachklingen wird ein Einsatz der späten Nachklingphase in tiefer Tonlage auf relativ hohem Pegelniveau und besonders im *ff* ein Absinken der Pegeldifferenz bis in die Mittellage festgestellt. Zu hohen Tonlagen hin ist ein leichtes Ansteigen des Pegelniveaus erkennbar. Im *pp* wird tendenziell ein Absinken des Pegelniveaus über den gesamten Tonumfang ermittelt. In hoher und tiefer Lage sind die Pegeldifferenzen mit denen im *ff* vergleichbar. Ferner sind andererseits für Töne in Mittellage Unterschiede bezüglich des Einsatzes der späten Nachklingphase und deshalb eine Abhängigkeit zwischen den Dynamikstufen erkennbar. In Bezug auf die anfängliche Ausklingzeit reduziert sich der Wert nahezu unabhängig von der Dynamikstufe zu höheren Lagen hin um einen Faktor 2 pro Oktave. In tiefer Lage ergibt sich ein Mittelwert von 2 s, in Ausnahmen werden hierfür 5 s ermittelt. Für Töne in Mittellage werden Werte um 1 s, sowie in oberster Oktave Anfangsnachklingzeiten zwischen 1 s und 0,3 s festgestellt. Im Kontrast zur frühen Abklingzeit ist eine Abhängigkeit der späteren Abklingzeit von der Dynamikstufe etwa über die obere Hälfte des Ton-

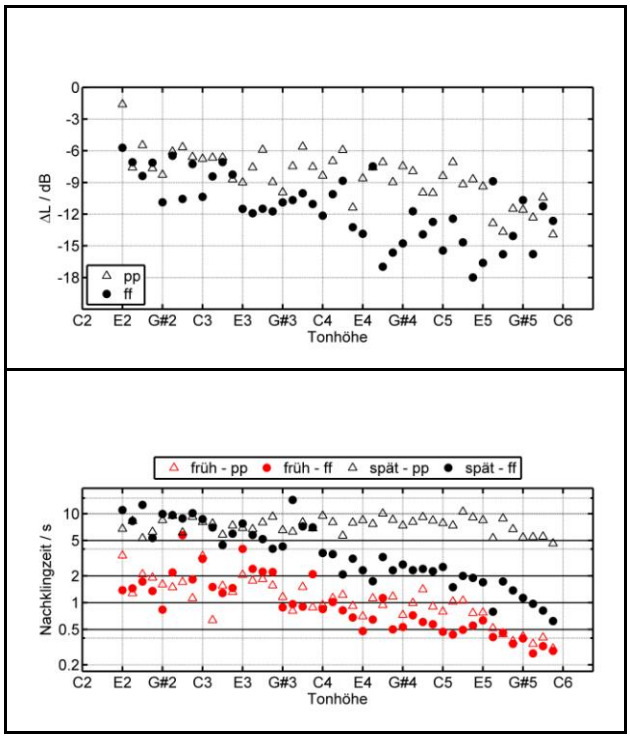

Abbildung 37: Pegeldifferenz zwischen Spitzenpegel und Einsatz der späten Nachklingphase (oben) sowie anfängliche (rot) und spätere (schwarz) Ausklingzeit (unten) in chromatischer Skalierung einer modernen Konzertgitarre.

umfanges auffallend. Im *pp* werden in diesem Bereich Abklingzeiten von deutlich über 5 s ermittelt. Eine Verringerung lässt sich in dieser Dynamikstufe nur für Töne der oberen Terz feststellen. Demgegenüber werden im *ff* für die spätere Ausklingzeit in tiefer Lage des Tonumfanges im Mittel Werte um 8 s festgestellt, wobei einzelne Töne in Ausnahmen eine Nachklingzeit von mehr als 10 s erreichen. Zu höheren Lagen hin verringert sich der Wert wiederum um den Faktor 2. Somit werden in Mittellage spätere Abklingzeiten um 4 s, sowie in höchster Oktave Werte zwischen 2 s und 0,6 s ermittelt.

L. Pauke

In einem Vergleich der Schallleistungen der Pauken verschiedener Epochen, Abb. 38, wird zunächst ein geringfügiger Unterschied hinsichtlich der Dynamikspanne, aufgrund des geringeren *pp*-Wertes der historischen Pauke, festgestellt. Andererseits erreichen beide untersuchten Instrumente einen identischen *ff*-Pegelwert. Darüber hinaus ist zu bemerken, dass für beide Instrumente die Spanne der Dynamik verschiedener Schlägeltypen, dessen ungeachtet nahezu demselben Ton erzeugend, abgebildet ist.

Für das historische Instrument ist zusätzlich die Position des Schlagflecks variiert, eine Handbreite vom Rand entfernt, entsprechend der Position des Schlagflecks des modernen Instrumentes, sowie einer Position direkt am Rand. Bei der Position des Schlagflecks direkt am Rand werden, dennoch der Spielanweisung folgend „so laut wie möglich, ohne dass der Ton unschön klingt“ respektive „so leise wie möglich, ohne dass der Ton abreißt“ [42], somit in dieser Darstellung als Dynamikstufen *ff* und *pp* bezeichnet, charakteristisch geringere maximale entsprechend partiell höhere minimale Pegelwerte ermittelt. Im Hinblick auf die verwendeten Schlägeltypen, Holz bzw. Leder, des historischen Instrumentes sowie der mit dem modernen Instrument vergleichbaren Position des Schlagflecks, eine Handbreite von Rand entfernt, sind angesichts der erzeugten Ext-

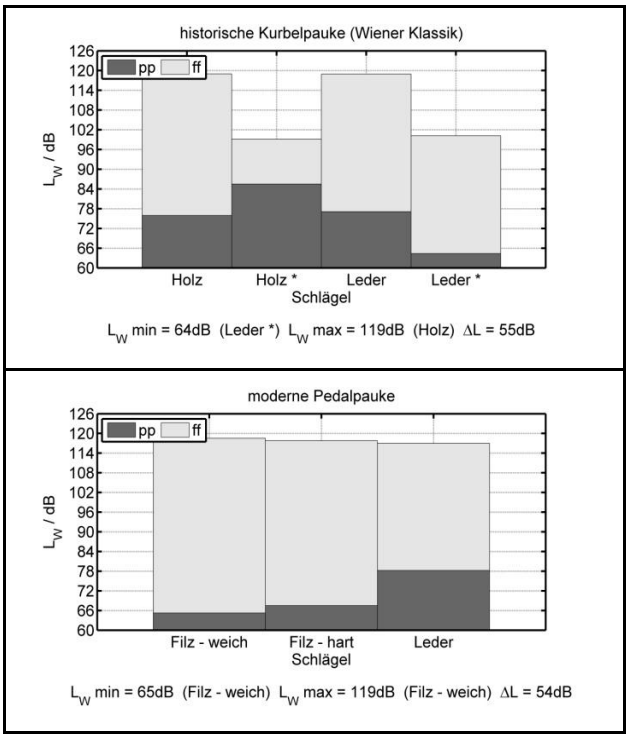

Abbildung 38: unbewertete Schallleistungspegel desselben Tones, D2 (73 Hz), jedoch unterschiedlicher Schlägeltypen und Position des Schlagflecks (direkt am Rand mit * gekennzeichnet, ansonsten eine Handbreite vom Rand entfernt) einer für die Zeit um 1800 typischen Kurbelpauke (oben) und modernen Pedalpauke (unten).

remwerte geringfügige Abweichungen, aufgrund des etwas geringeren *pp*-Wertes von 76 dB des Holzschlägels und ein identischer *ff*-Wert von 119 dB festzustellen. Unter Verwendung eines Lederschlägels wird ein *pp*-Wert von 77 dB erzeugt. In Bezug auf die Position des Schlagflecks, direkt am Rand, wird einerseits ein verminderter *pp*-Wert, Lederschlägel, und andererseits ein höherer *pp*-Wert von 86 dB, Holzschlägel, ermittelt. Demgegenüber sind die erzeugten Maximalwerte verschiedener Schlägeltypen unter Benutzung des Schlagflecks direkt am Rand als geringfügig abweichend zu erachten. Somit lässt sich vor allem eine Erweiterung der unteren Grenze der Dynamikspanne in Abhängigkeit von Schlägeltyp und Position des Schlagflecks folglich eine maximale Dynamikspanne von 55 dB für das historische Instrument ermitteln.

Im Fall der modernen Pauke sind die entsprechenden Schallleistungen unter Verwendung einer festen Position des

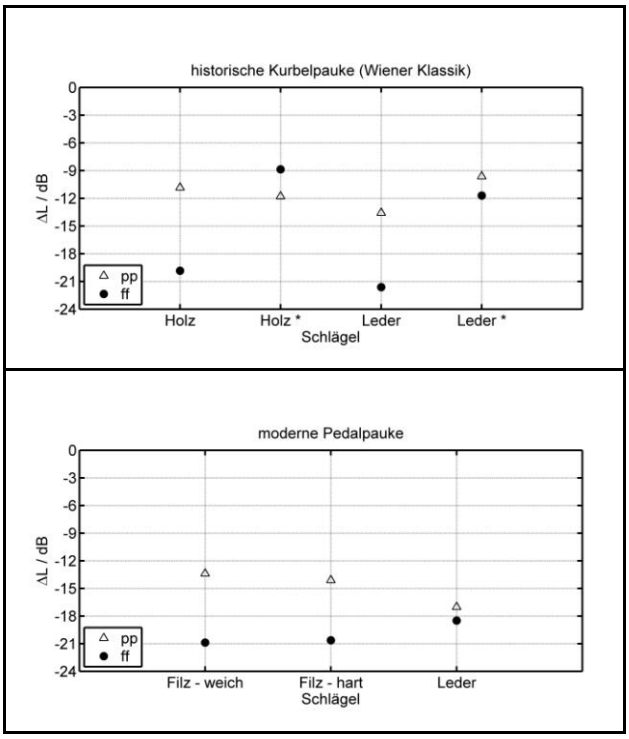

Abbildung 39: Pegeldifferenz zwischen Spitzenpegel und Einsatz der späten Nachklingphase desselben Tones, D2 (73 Hz) in den Dynamikstufen *pp* und *ff*, unterschiedlicher Schlägeltypen und Position des Schlagflecks (direkt am Rand mit * gekennzeichnet, ansonsten eine Handbreite vom Rand entfernt) einer für die Zeit um 1800 typischen Kurbelpauke (oben) und modernen Pedalpauke (unten).

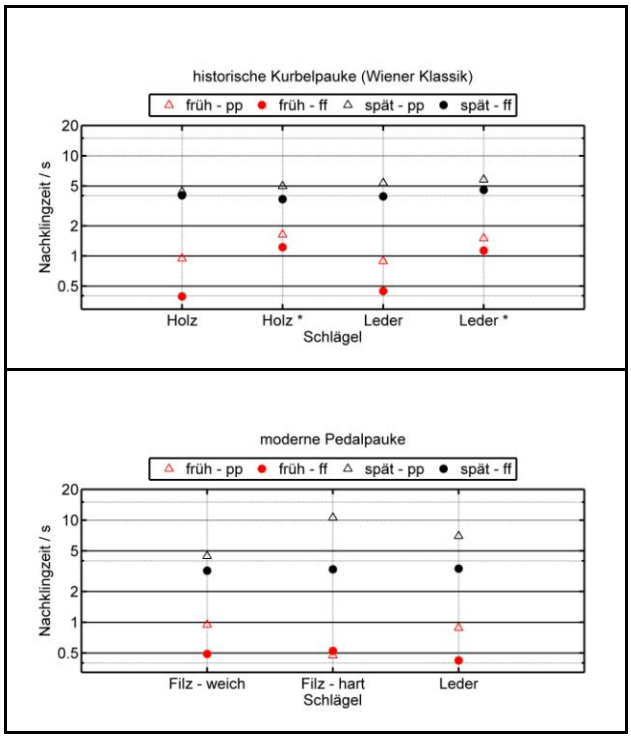

Abbildung 40: anfängliche (rot) und spätere (schwarz) Ausklingzeit desselben Tones, D2 (73 Hz), in den Dynamikstufen *pp* und *ff*, unterschiedlicher Schlägeltypen und Position des Schlagflecks (direkt am Rand mit * gekennzeichnet, ansonsten eine Handbreite vom Rand entfernt) einer für die Zeit um 1800 typischen Kurbelpauke (oben) und modernen Pedalpauke (unten).

Schlagflecks, eine Handbreite vom Rand entfernt, wohl aber verschiedener Schlägeltypen, Filz hart bzw. weich und Leder, erzeugt. Für das moderne Instrument wird wiederum eine deutliche Abhängigkeit der unteren Grenze der Dynamikspanne vom Schlägeltyp festgestellt. Unter Verwendung der dargestellten Schlägeltypen wird eine maximale Differenz der Pegelwerte von 2 dB (*ff*) sowie 13 dB (*pp*) ermittelt. Ferner wird eine Dynamikspanne von maximal 54 dB und minimal von 39 dB der modernen Pauke angegeben. Basierend auf den vorangestellten Ergebnissen der Schallleistungen, insbesondere unter Verwendung eines Lederschlägels, lässt sich somit, aufgrund der höheren *ff*- bzw. geringeren *pp*-Werte, für die Historische ein geringfügig größerer Dynamikumfang von 42 dB im Vergleich zur modernen Variante mit 39 dB feststellen.

Bezüglich der Pegeldifferenz zwischen Spitzenwert und Einsatz der späteren Abklingphase, Abb. 39, ferner der früheren und späteren Ausklingzeiten, Abb. 40, gleicher Dynamikstufe und Position des Schlagflecks sind minimale systematische Unterschiede zwischen den Pauken verschiedener Epochen ersichtlich. In einem Vergleich des Pegelniveaus der Knickstelle, bei Verwendung eines Lederschlägels zur Tonerzeugung, erfolgt der Einsatz der späteren Nachklingphase des modernen Instrumentes auf einem tendenziell etwas höheren Pegelniveau. In der Analyse der Pegeldifferenzen zwischen Spitzenpegel und Einsatz der späteren Abklingphase der verwendeten Schlägel wird eine geringere Spanne zwischen den Dynamikstufen *pp* und *ff* für das moderne Instrument ermittelt. Deutlich erkennbar sind im Fall der Daten des historischen Instrumentes die Abhängigkeit des Pegelniveaus der Knickstelle sowie der anfänglichen Nachklingzeit von

der Position des Schlagflecks. Hierbei sollte die eingangs beschriebene Problematik der erzeugten, charakteristisch geringeren, maximalen Pegelwerte des Schlagflecks am Rand beachtet werden. Gleichwohl werden für diese Schlagposition und entsprechenden Schlägel längere frühere Abklingzeiten in beiden Dynamikstufen beobachtet.

Betreffend der früheren respektive der späteren Ausklingzeit sind geringfügig kürzere Abklingzeiten für die moderne Pauke zu bemerken, Abb. 40. Ebenso wird für das moderne Instrument in der Dynamikstufe *pp* eine Abhängigkeit der Ausklingzeiten vom Schlägeltyp beobachtet. Dieser Zusammenhang ist hinsichtlich der Ähnlichkeit der Oberflächenstruktur der Schlägel des historischen Instrumentes, sowie der *ff*-Daten des modernen Instrumentes, infolge einer Nivellierung der charakteristischen Oberflächenstruktur des Schlägels durch den Schlagimpuls, nicht erkennbar.

VI. DISKUSSION

Einschließlich einer Einführung in die Grundlagen der Tonerzeugung der Blasinstrumente, sind die seit etwa dem 18. Jh. wesentlichen Modifikationen im Aufbau und die einhergehenden Auswirkungen auf die Klangausbildung dargestellt. Hierfür sind, in einer umfangreichen Messreihe im reflexionsarmen Vollraum erzeugte, entsprechend dem Hüllflächenverfahren ermittelte, Schallleistungspegel typischer Instrumente des klassisch-romantischen Symphonieorchesters und verschiedener Stadien instrumentenbaulicher Entwicklung aufgeführt. Für die Instrumente sind sowohl die maximalen (*ff*) und minimalen (*pp*) Schallleistungen für Einzeltöne als auch diatonischer Tonleitern und darüber hinaus der *forte*-Schallleistungspegel ($L_{W\ f}$) [36] berechnet. Zusätzlich sind dieser Arbeit die implementierten Methoden zur Bestimmung des relevanten Tonanteils, früheren und späteren Abklingzeiten einzelner Schallimpulse der, für die Aufführungspraxis repräsentativen, Zupfinstrumente moderner und eines Schlaginstrumentes für die Zeit um 1800 typischen und modernen Bauweise zu entnehmen.

Hinsichtlich der Konsistenz und ergänzend zu den Ausführungen zur Schallleistung der modernen Streichinstrumente [1] weichen die vorliegenden Werte der modernen Varianten der Blas-, Schlag- und Zupfinstrumente im *ff* von denen von Jürgen Meyer mit dem Hallraumverfahren gemessenen bzw. ergänzten [7], mit Ausnahme der Werte der Tuba, nur geringfügig ab. Demgegenüber werden für die Blasinstrumente bis zu 10 dB höhere *pp*-Werte gemessen. Die resultierenden früheren Abklingzeiten der Schlag- und Zupfinstrumente sind, sowohl im *ff*, als auch im *pp*, ungeachtet des, teilweise im *pp*, sehr geringen SNR der Rohdaten, im Vergleich zu den Angaben [7, S. 95–96], charakteristisch und annähernd unabhängig von der Dynamikstufe und somit als hinreichend, in Verbindung mit dem ermittelten Toneinsatz, zur Bestimmung der Schallleistung anzusehen. Die beschriebenen Abweichungen der Schallleistungen moderner Instrumente sind einerseits auf eine unterschiedliche Umsetzung der Spielanweisung für das *pp* „so leise wie möglich…“ in verschiedenen akustischen Umgebungen, Hallraum vs. reflexionsarmer Raum [1], [42], und andererseits auf eine Abhängigkeit von den physiologischen Voraussetzungen des Musikers und Instrumentes bei der Umsetzung der Spielanweisung für das *ff* – „so laut wie möglich…“ – zurückzuführen. Gleichwohl der aufgeführten Einwände und der geringen Stichprobe hinsichtlich der Musiker bzw. verwendeten Instrumente [1], erweisen sich die ermittelten *ff*-Werte bzgl. des verwendeten Messverfahrens als relativ unabhängig und sind somit systematisch für die Ergebnisse der Untersuchung zutreffend.

In einem Vergleich von typischen Vertretern verschiedener Epochen sind infolge der instrumentenbaulichen Entwicklung der Blasinstrumente im Hinblick auf die erzeugten Schallleistungen systematische Unterschiede festzustellen. Grundsätzlich sind angesichts der ermittelten Pegelwerte der Blasinstrumente moderner Bauweise

die Bestrebungen ein homogenes Klangbild über den Tonumfang des Instrumentes und ferner der Instrumente verschiedener Stimmlagen zu erkennen. Hinsichtlich der Entwicklungen im Blasinstrumentenbau wird zudem eine Erweiterung insbesondere der oberen Grenze des Dynamikumfanges festgestellt. Die *ff*-Werte der modernen Variante sind unter Einbeziehung der gemessenen Werte der Instrumente der frühesten Epoche deutlich höher, wenngleich die Differenz zwischen den *ff*-Pegelwerten besonders im Fall der Hörner und Oboen ferner der Instrumente der Wiener Klassik und Moderne teilweise unwesentlich ist. In Anbetracht der *pp*-Werte und unter Berücksichtigung der erwähnten Einschränkungen sind für die modernen Varianten der Holz-, mit Ausnahme der Klarinette, tendenziell höhere, sowie für Blechblasinstrumente geringere Werte und folglich vorwiegend für letztgenannte eine Erweiterung der unteren Grenze des Dynamikumfanges vorliegend. Des Weiteren sind für die Pauken verschiedener Bauweise nahezu identische Pegelwerte, allerdings für das moderne Instrument, eine tendenziell kürzere Abklingzeit festzustellen.

Im Hinblick auf aufführungspraktische Aspekte werden im Zusammenhang mit den berechneten mittleren forte-Pegeln der Blas- und Streichinstrumente für eine mit modernen und historischen Instrumenten übereinstimmende Orchesterbesetzung einerseits, die Klangbalance zwischen den drei Instrumentengruppen betreffend, eine Verschiebung zugunsten der Bläser einer modernen Besetzung beobachtet. Andererseits wird, basierend auf einer Addition der Schallleistungen im forte somit einer Hochrechnung für eine unter obiger Bedingung der übereinstimmenden Besetzung mit modernen respektive historischen Instrumenten, eine geringe Differenz ermittelt [42]. Bezugnehmend auf die Eingangsthese kann eine unterschiedlich wahrgenommene Klangcharakteristik moderner und mit historischen Instrumenten besetzter Orchester somit nur mit der unterschiedlichen Klangbalance zwischen den Instrumentengruppen und ferner mit Unterschieden in der spektralen Verteilung der Instrumentenklänge begründet werden. Darüber hinaus sollte beachtet werden, dass der gleichzeitig auftretende Verlust an raumakustischer Verstärkung durch die Vergrößerung der Konzerträume und Zuschauerzahl lediglich in geringem Umfang durch die Entwicklungen im Instrumentenbau kompensiert wird.

[1] KRÄMER, J.: *Sound power of modern and historical orchestral instruments Part I: String instruments*. Berlin, Technische Universität, Institut für Sprache und Kommunikation. Magisterarbeit. 2011

[2] BAINES, A.: *Woodwind Instruments and their History*. 1. Aufl. New York : W W NORTON & COMPANY INC., 1957

[3] SACHS, C.: *Real-Lexikon der Musikinstrumente zugleich ein Polyglossar für das gesamte Instrumentengebiet*. Berlin : Julius Bard, 1913

[4] WELCH, C.: *History of the Boehm flute: with Dr. von Schafhäutl's life of Boehm, and an examination of Mr. Rockstro's version of the Boehm-Gordon controversy*. 3. Aufl. London : Rudall, Carte & CO., 1896

[5] GEIRINGER, K.: *Instruments in the history of Western music*. 3. Aufl. : Oxford University Press, 1978

[6] WOLFE, J. ; SMITH, J. ; FLETCHER, N. ; MCGEE, T.: *The Baroque and Classical flutes and the Boehm revolution*. In: *Proc. International Symposium on Musical Acoustics* (2001), S. 505–508

[7] MEYER, J.: *Akustik und musikalische Aufführungspraxis* : *Leitfaden für Akustiker, Musiker, Instrumentenbauer und Architekten*. 4. überarbeitete Auflage. Frankfurt am Main : Erwin Bochinsky, 1999

[8] HELMHOLTZ, H.: *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*. Braunschweig : F. Vieweg, 1863

[9] FLETCHER, N.H. ; ROSSING, T.D: *The physics of musical instruments*. 2. Aufl. New York, London : Springer, 1998

[10] DICKENS, P.A: *Flute acoustics: measurement, modelling and design*. Sydney, University of New South Wales, School of Physics. Dissertation. 2007

[11] WOLFE, J. ; CHEN, J.M. ; SMITH, J.: *The acoustics of wind instruments – and of the musicians who play them*. In: *Proceedings of 20th International Congress on Acous-* (2010)

[12] STEVENSON, S.D.F.: *Experimental Investigations of Lip Motion in Brass Instrument Playing*. Edinburgh, University of Edinburgh, Acoustics and Audio Group. PhD thesis. 2009

[13] WOLFE, J.: *Grundformen des Resonanzrohres (idealisiert)* : *Verlauf von Schalldruck und Schallschnelle*. URL http://www.phys.unsw.edu.au/jw/pipes.html

[14] CHEN, J.M. ; SMITH, J. ; WOLFE, J.: *Saxophone acoustics: introducing a compendium of impedance and sound spectra*. In: *Acoustics Australia* (2009), Nr. 37, S. 18–23. URL http://www.phys.unsw.edu.au/jw/reprints/ChenetalAA.pdf

[15] SMITH, J. ; WOLFE, J. ; GREEN, M.: *Head joint, embouchure hole and filtering effects on the input impedance of flutes*. In: *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference* (2003), S. 295–298

[16] WOLFE, J.: *Akustische Impedanz (Z) eines Zylinders mit bzw. ohne Mundstück*. URL http://www.phys.unsw.edu.au/jw/clarinetacoustics.html#acousticimpedance

[17] THOMPSON, S.C.: *The effect of the reed resonance on woodwind tone production*. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 66 (1979), Nr. 5, S. 1299–1307

[18] BOUTIN, H. ; FLETCHER, N.H. ; SMITH, J. ; WOLFE, J.: *Lip motion, the playing frequency of the trombone and upstream and downstream impedances*. In: *SMAC* (2013), S. 483–489

[19] HIRSCHBERG, A. ; GILBERT, J. ; MSALLAM, R. ; WIJNANDS, A.P.1.: *Shock waves in trombones*. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 99 (1996), Nr. 3, S. 1754–1758

[20] VSL - VIENNA SYMPHONIC LIBRARY: *Blechblasinstrumente - Akustik*. URL http://www.vsl.co.at/de/70/3139/3140/5392.vsl

[21] CHEN, J.M. ; SMITH, J. ; WOLFE, J.: *Saxophonists tune vocal tract resonances in advanced performance techniques*. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* (2011), Nr. 129, S. 415–427

[22] CHEN, J.M. ; SMITH, J. ; WOLFE, J.: *Do trumpet players tune resonances of the vocal tract?* In: *The Journal of the Acoustical Society of America* (2012), Nr. 131, S. 722–727

[23] FRITZ, C. ; WOLFE, J.: *How do clarinet players adjust the resonances of their vocal tracts for different playing effects?* In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 118 (2005), Nr. 5, S. 3306

[24] WOLFE, J. ; SMITH, J.: *Cutoff frequencies and cross fingerings in baroque, classical, and modern flutes*. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 114 (2003), Nr. 4, S. 2263

[25] BENADE, A. H.: *Fundamentals of Musical Acoustics* : Oxford University Press, 1976

[26] BENADE, A. H.: *Acoustical evolution of wind instruments*. In: *Kursunterlagen, Physics 323, Case Western University, Cleveland, Ohio* (1977)

[27] WOLFE, J.: *Akustische Impedanz (Z) eines Zylinders gleicher effektiver Länge mit bzw. ohne Schallstück*. URL http://www.phys.unsw.edu.au/jw/clarinetacoustics.html#acousticimpedance

[28] JÄGER, M.: *Interferometrische Messungen an Querflötenköpfen* : *Der Einfluss von Wandvibrationen auf den Klang*. Salzburg, Universität Mozarteum, Dirigieren, Komposition und Musiktheorie. Dissertation. 2004

[29] WOLFE, J.: *Akustik der Flöten* : *Daten für die einzelnen Noten und Griffe: akustische Impedanz Spektren, Tondateien*. URL www.phys.unsw.edu.au/music/flute

[30] WOLFE, J. ; SMITH, J. ; TANN, J. ; FLETCHER, N.H.: *Acoustic impedance spetcra of classical and modern flutes*. In: *Journal of Sound and Vibration* (2001), Nr. 243, S. 127–144

[31] FLETCHER, N.H. ; STRONG, W.J. ; SILK, R.K.: *Acoustical characterization of flute head joints*. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* (1982), Nr. 5, S. 1255–1260

[32] WOLFE, J. ; SMITH, J. ; GREEN, M.: *The effects of placement of the head joint stopper on the impedance spectra of transverse flutes*. In: *Proc. Eighth Western Pacific Acoustics Conference* (2003)

[33] WOLFE, J.: *Akustische Impedanz (Z) einer barocken Flöte: Ton D4*. URL http://www.phys.unsw.edu.au/music/flute/baroque/D4.baroque.html

[34] WOLFE, J.: *Akustische Impedanz (Z) einer modernen Querflöte in C: Ton C4*. URL http://www.phys.unsw.edu.au/music/flute/modernC/C4.html

[35] POLLOW, M. ; SCHULTZ, F.: *Musical instrument recording for building a directivity database*. In: *DAGA-Fortschritte der Akustik* (2010), Nr. 36, S. 703–704

[36] MEYER, J.: *Zur Dynamik und Schalleistung von Orchesterinstrumenten*. In: *Acustica* (1990), Nr. 71, S. 277–286

[37] CLARK, Melville ; LUCE, David: *Intensities of Orchestral Instrument Scales Played at Prescribed Dynamic Markings*. In: *J. Audio Eng. Soc* 13 (1965), Nr. 2, S. 151–157

[38] BURGHAUSER, J. ; SPELDA, A.: *Akustische Grundlagen des Orchestrierens*. Regensburg : Gustav Bosse, 1971

[39] BOUHUYS, A.: *Sound-Power Production in Wind Instruments*. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* (1965), Nr. 37, S. 453–456

[40] DIN EN ISO 3745:2003. Mai 2004. *Bestimmung der Schallleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Verfahren der Genauigkeitsklasse 1 für reflexionsarme Räume und Halbräume*

[41] DIN EN ISO 3740. März 2001. *Bestimmung der Schallleistungspegel von Geräuschquellen Leitlinien zur Anwendung der Grundnormen*

[42] DETZNER, E. ; SCHULTZ, F. ; POLLOW, M.: *Zur Schallleistung von modernen und historischen Orchesterinstrumenten II: Holz- und Blechblasinstrumente*. In: *DAGA-Fortschritte der Akustik* (2010), Nr. 36, S. 891–892

[43] POLLOW, M. ; BEHLER, G. ; MASIERO, B.: *Measuring directivities of natural sound sources with a spherical microphone array*. In: *Proc. Ambisonics Symposium* (2009)

[44] MEYER, J.: Musikalische Akustik. In: WEINZIERL, S. (Hrsg.): *Handbuch der Audiotechnik*. Berlin Heidelberg : Springer, 2008, S. 155

[45] SCHROEDER, M.R.: *New Method of Measurlng Reverberation Time*. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* (1965), Nr. 37, S. 409–411

[46] DIN EN ISO 3382. März 2000. *Messung der Nachhallzeit von Räumen mit Hinweis auf andere akustische Parameter*

[47] DIN EN ISO 3382-2. September 2008. *Messung von Parametern der Raumakustik*

[48] INTERNATIONAL MUSIC INFORMATION RETRIEVAL SYSTEMS EVALUATION LABORATORY: *Music Information Retrieval Evaluation eXchange (MIREX)* : *Onset Detection*. URL http://nema.lis.illinois.edu/nema_out/mirex2011/results/aod/

[49] BELLO, J.P ; DAUDET, L. ; ABDALLAH, S. ; DUXBURY, C. ; DAVIES, M. ; SANDLER, M.B: *A tutorial on onset detection in music signals*. In: *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing* 13 (2005), Nr. 5, S. 1035–1047

[50] COLLINS, N.: *A Comparison of Sound Onset Detection Algorithms with Emphasis on Psychoacoustically Motivated Detection Functions*. In: *Audio Engineering Society* 118 (2005). URL http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=13079

[51] DIXON, S.: Onset Detection Revisited. In: *Proc. of the 9th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx))*. Montreal, Canada, 2006, S. 133–137

[52] ANTSALO, P. ; MAKIVIRTA, A. ; VALIMAKI, V. ; PELTONEN, T. ; KARJALAINEN, M.: Estimation of Modal Decay Parameters from Noisy Response Measurements. In: *Proc. of the 110th Audio Eng. Soc. Convention*. Amsterdam, The Netherlands, 2001, S. 867–878

[53] INSTITUT FÜR TECHNISCHE AKUSTIK (ITA), RWTH AACHEN: *ITA Toolbox* : *A MATLAB Toolbox for the needs of acousticians*. URL http://www.ita-toolbox.org/

[54] HOLDSWORTH, J. ; NIMMO-SMITH, I. ; PATTERSON, R. ; RICE, P.: *Implementing a gammatone filter bank*. In: *Annex C of the SVOS Final Report: Part A: The Auditory Filterbank* (1988)

[55] MEYER, J.: *The Sound of the Orchestra*. In: *J. Audio Eng. Soc.* (1993), Nr. 4, S. 203–213

ANHANG

A. Übersicht der Instrumente

1. Holzblasinstrumente

historische Varianten			moderne Varianten	
Flöten				
	Traversflöte	Tutz ~ 2006 Original 415 Hz"	Querflöte	Brannen-Cooper 2002 Original 443 Hz
	Klappenflöte	~ 1850 Original 430 Hz		
Oboen				
	Romantik	Jakob Grundmann 1780 Kopie 430 Hz		Ludwig Frank 2006 Original 443 Hz
	Wiener Klassik	Tulou, Paris 1851 Original 438 Hz	Englischhorn	Ludwig Frank 2007 Original 443 Hz
Klarinetten				
	Bassetthorn	Peter van der Poel 20. Jh. Kopie nach Original Lotz 430 Hz		Herbert Wurlitzer 1990 Original 443 Hz
	Wiener Klassik	Peter van der Poel, Utrecht 20. Jh. Kopie nach Original Grenser 430 Hz	Bassklarinette	Herbert Wurlitzer 1993 Original 443 Hz
Saxophone				
			Altsaxophon	Yanagisawa 2006 Original 442 Hz
			Tenorsaxophon	Yanagisawa 2008 Original 442 Hz
Fagotte				
	Dulzian	Bernhard Junghänel ~ 1600 Kopie nach Meran 440 Hz		Püchner ~ 1990 Original 443 Hz
	Barockfagott	Guntram Wolf ~ 1690 Kopie nach dem Original HKICW 415 Hz	Kontrafagott	Heckel ~ 1990 Original 443 Hz
	Wiener Klassik	Finke 1810 Original grenserartiges Modell 430 Hz		

Abbildung A 1: Übersicht der untersuchten Holzblasinstrumente moderner und historischer Konstruktion mit zusätzlichen Informationen über Herkunft und Stimmfrequenz.

2. *Blechblasinstrumente*

historische Varianten		moderne Varianten	
Hörner			
Inventionshorn	Jungwirth 20. Jh. Kopie Modell: Lausmann 430 Hz	Doppelhorn	Gebrüder Alexander 1994 Original Modell: 103 443 Hz
Trompeten			
Naturtrompete	Rainer Egger 2003 Kopie nach Original 19. Jh. 415 Hz		Vincent Bach Ende 20. Jh. Original Modell: 239 443 Hz
Posaunen			
Bassposaune	Zug: Ewald Meinl 2008 Schallstück: Gerd Kempkes Mundstück: Rainer Egger 2004 Kopie nach Schmied-Pfaffendorf 430 Hz	Bassposaune	Modus, USA Ende 20. Jh. Original 441 Hz
Tenorposaune	Jürgen Voigt Ende 20. Jh. Kopie 430 Hz	Tenorposaune	Bach Ende 20. Jh. Original Modell: 42 G 443 Hz
Altposaune	C. F. Sattler 2008 Kopie nach Original Sattler, 1830 452 Hz		
Tubas			
			B & S Ende 20. Jh. Original Modell: 3100 440 Hz

Abbildung A 2: Übersicht der untersuchten Blechblasinstrumente moderner und historischer Konstruktion mit zusätzlichen Informationen über Herkunft und Stimmfrequenz.

3. *Zupf- und Schlaginstrumente*

historische Varianten		moderne Varianten	
Harfen			
		Doppelpedalharfe	Klaus Horngacher 2005 Original 430 Hz
Gitarren			
		Konzertgitarre	Masaru Kohno 1985 Original Modell: Concert 443 Hz
Pauken			
Kurbelpauke	unbekannt 21. Jh. Kopie nach Original 18 Jh. 430 Hz	Pedalpauke	Hinger ~ 1980 Original 430 Hz

Abbildung A 3: Übersicht der untersuchten Zupf- und Schlaginstrumente moderner und historischer Konstruktion mit zusätzlichen Informationen über Herkunft und Stimmfrequenz.

B. Grafische Benutzeroberfläche

Zur Visualisierung der Ergebnisse der einzelnen Instrumente ist eine grafische Benutzeroberfläche, GUI, **G**raphical **U**ser **I**nterface, Abb. B 1, als Anwendung in MATLAB vom Autor realisiert. Diese Oberfläche ermöglicht einen einfachen Überblick, Zugang und eine erste Analyse der im .mat-Format, MATLAB-Datenformat, gespeicherten Daten. Ferner ist es Hilfsmittel zur konsistenten Abbildung sowie Speicherung der Darstellungen. In den nachstehenden Abschnitten wird folglich ein Leitfaden für die Bedienung der implementierten Software zur Verfügung gestellt. Mithilfe entsprechender Abbildungen ist der für den Arbeitsschritt relevante Bereich rot hervorgehoben und nummeriert dargestellt.

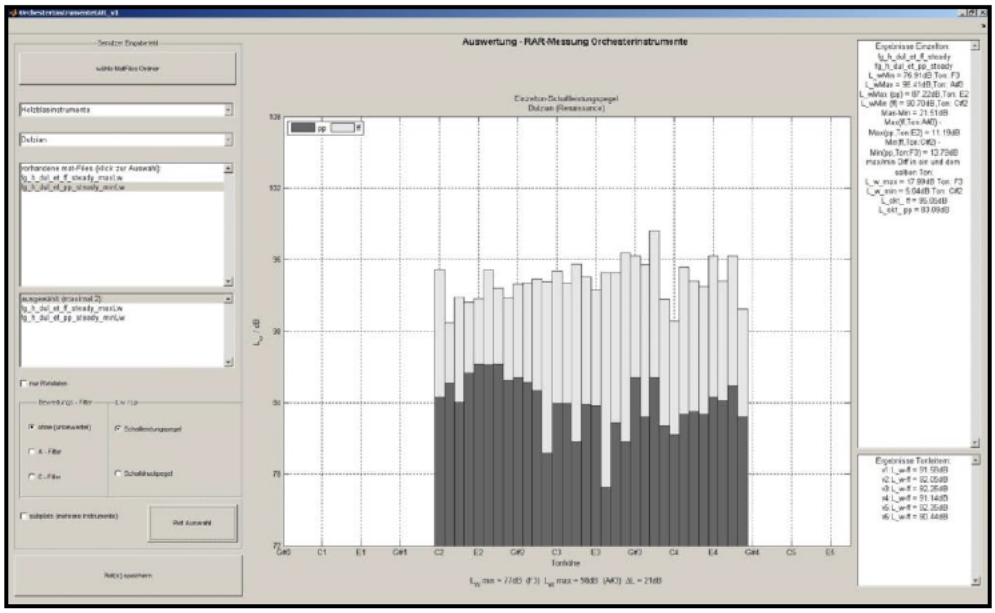

Abbildung B 1: implementierte grafische Benutzeroberfläche, linke Seite: Eingabefeld mit verschiedenen Auswahlmöglichkeiten für den Benutzer, mittig: Darstellung der Pegelwerte, rechte Seite: Analysedaten für Einzeltöne (oben) und Tonleitern (unten).

1. *Programmstart und Benutzereingabe*

Nach dem Start der MATLAB-Umgebung, matlab.exe, wird durch das anschließende Ausführen der Funktion, OrchesterInstrumenteGUI_v1.m, die grafische Benutzeroberfläche gestartet. Durch den Benutzer ist zunächst das Stammverzeichnis der gespeicherten Dateien der Instrumente durch Anklicken des „wähle matfiles Ordner"-Buttons, Abb. B 2, Schritt 1, und Auswahl des entsprechenden Ordners mittels des erscheinenden Dialogfensters anzugeben, Abb. B 2, Schritt 2 und 3.

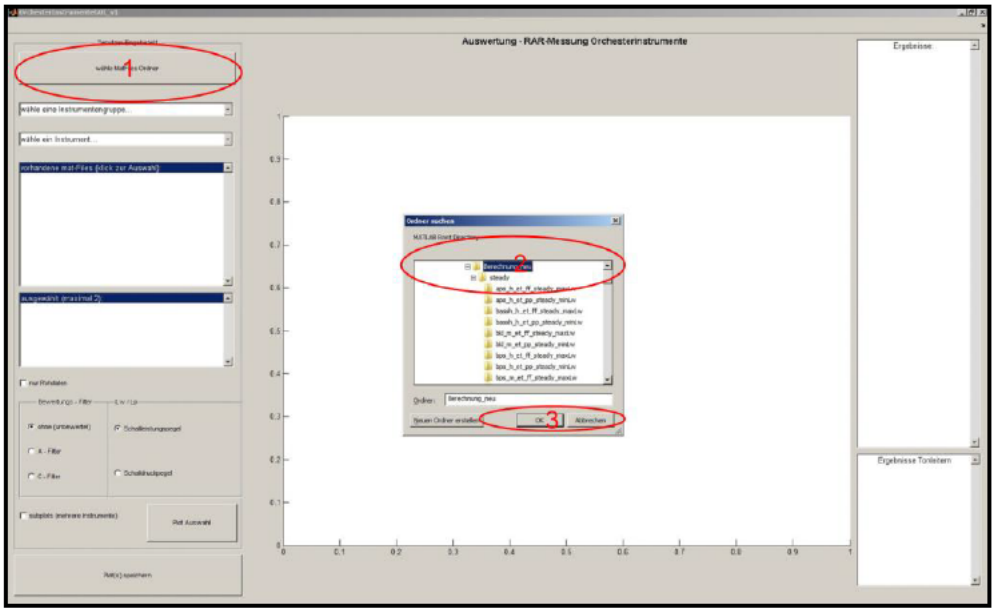

Abbildung B 2: Bestimmung des Stammverzeichnisses der Dateien nach Anklicken des Button (1) erscheint typisches Dialogfenster zum Suchen des Ordners (2) sowie Bestätigen der Auswahl mit Anklicken von Ok (3).

Zur Darstellung der Daten wird zunächst unter Verwendung des Pop-up-Menüs, Abb. B 3, Schritt 1, die Instrumentengruppe des Instrumentes ausgewählt. Anschließend erfolgt die Selektion eines Instrumentes Mithilfe des darunterliegenden Pop-up-Menüs, Abb. B 3, Schritt 2. Nach Auswahl des Instrumentes werden die im Stammordner vorhandenen Dateien des Instrumentes unter Verwendung des Dateinamens im Textfeld, Abb. B 4, Schritt 1, angezeigt. Durch Anklicken des Dateinamens, Abb. B 4, Schritt 1, werden die entsprechenden Daten zur Darstellung ausgewählt. Selektierte Daten werden im nachfolgenden Textfeld abgebildet, Abb. B 4, Schritt 2. Durch Anklicken des Dateinamens in diesem Textfeld können die zuvor selektierten Daten manuell entfernt werden, Abb. B 4, Schritt 2. Des Weiteren können durch Auswahl des entsprechenden Feldes unbewertete, A- bzw. C-bewertete Schallleistungs- oder Schalldruckpegel dargestellt werden, Abb. B 4, Schritt 3.

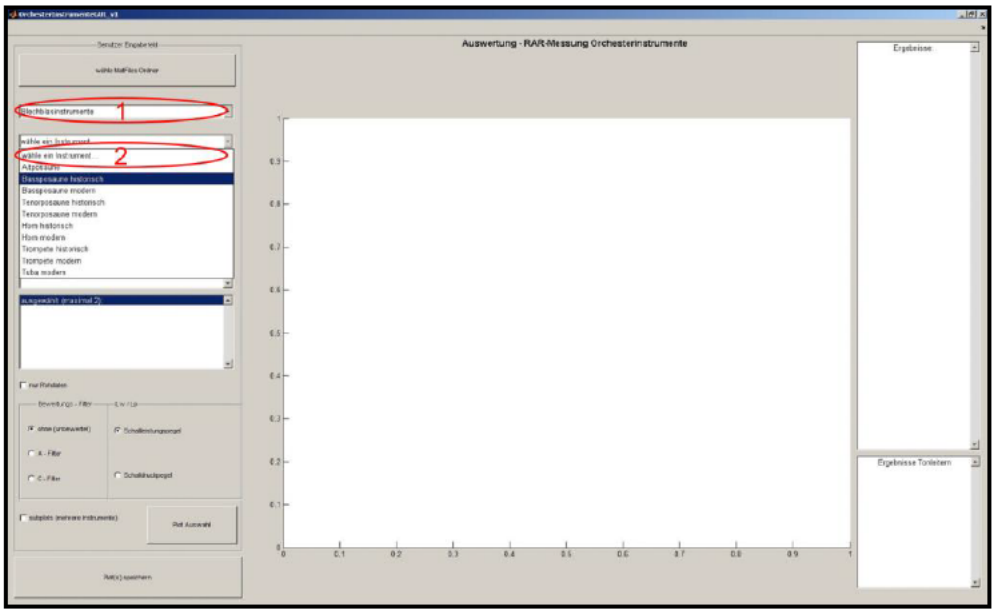

Abbildung B 3: Nutzung entsprechender Pop-up-Menüs zur Auswahl der Instrumentengruppe (1) und des Instrumentes (2).

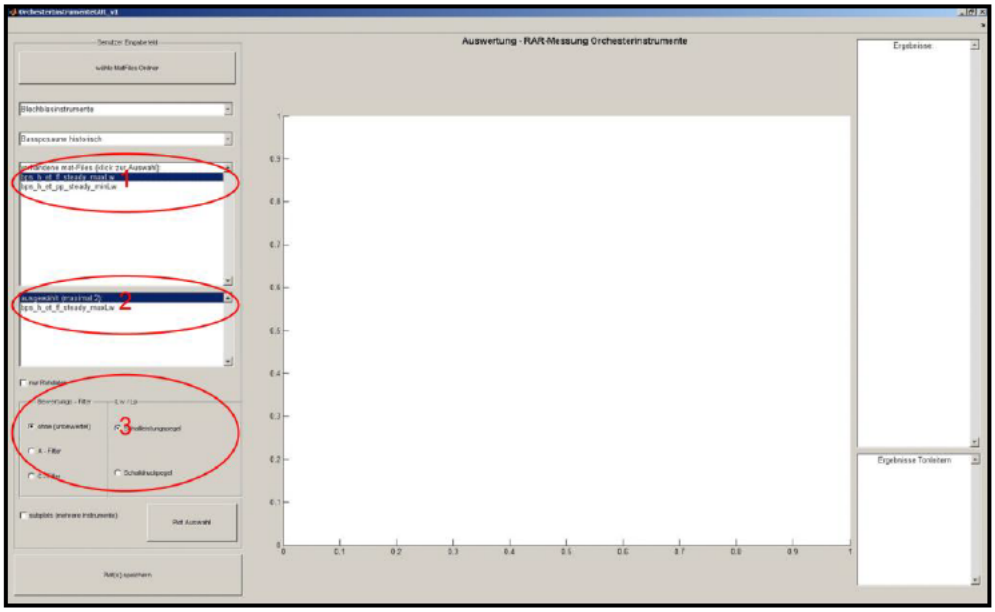

Abbildung B 4: Auswahl der Daten durch Anklicken des Dateinamens (1), Anzeige der ausgewählten Daten sowie Möglichkeit zur Eliminierung (2) und Darstellungsoptionen der basierenden Daten (3).

2. *Darstellung*

Die Darstellung der Daten des Instrumentes erfolgt jeweils erst nach Anklicken des „plot Auswahl“-Buttons, Abb. B 5, Schritt 1. In der Mitte der Oberfläche, Abb. B 5, Schritt 2, werden anschließend die ausgelesenen Werte unter Verwendung eines Balkendiagramms, sowie in den Textfeldern auf der rechten Seite erste Analysedaten, Abb. B 5, Schritt 3, und die entsprechenden Werte der in der Untersuchung eingespielten Tonleitern, Abb. B 5, Schritt 3, abgebildet.

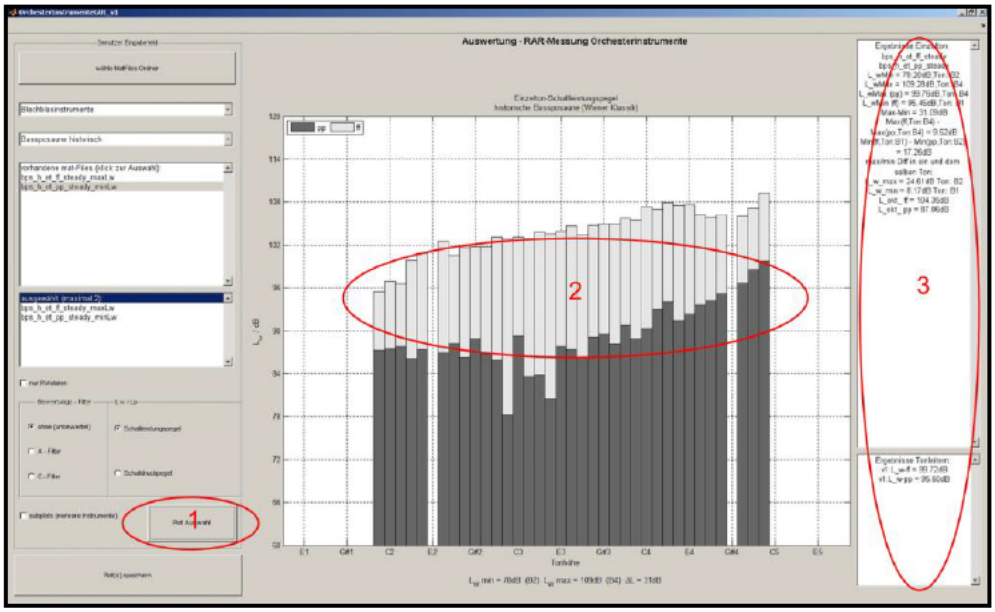

Abbildung B 5: „plot Auswahl“-Button (1), Balkendiagramm (2) und Analysedaten der Einzelton- (3, oben) bzw. Tonleiterdaten (3, unten).

Mithilfe der aktivierten „nur Rohdaten“-Checkbox, Abb. B 6, Schritt 1, werden lediglich die vorhandenen Daten der Datei und der gemittelte Pegelwert der Töne einer Oktave in Mittellage als rote bzw. grüne waagerechte Linie abgebildet, Abb. B 6, Schritt 2. Wird die Checkbox nicht aktiviert, Abb. B 7, Schritt 1, werden die Markierungen des gemittelten Pegelwertes nicht angezeigt. Bei Auswahl einer Datei werden eventuell fehlende, z.B. in einer Dynamikstufe nicht eingespielte, Werte interpoliert, Abb. B 7, Schritt 2. Sind zwei Dateien zur Darstellung selektiert, werden im Fall der nicht aktivierten „nur Rohdaten“-Checkbox nur die Daten der Tonhöhen abgebildet die in beiden Dynamikstufen vorhanden sind. Die Unterschiede der Darstellungen unter der optionalen Verwendung dieser Checkbox sind beispielsweise anhand der Abbildung B 5 und Abbildung B 6 ersichtlich.

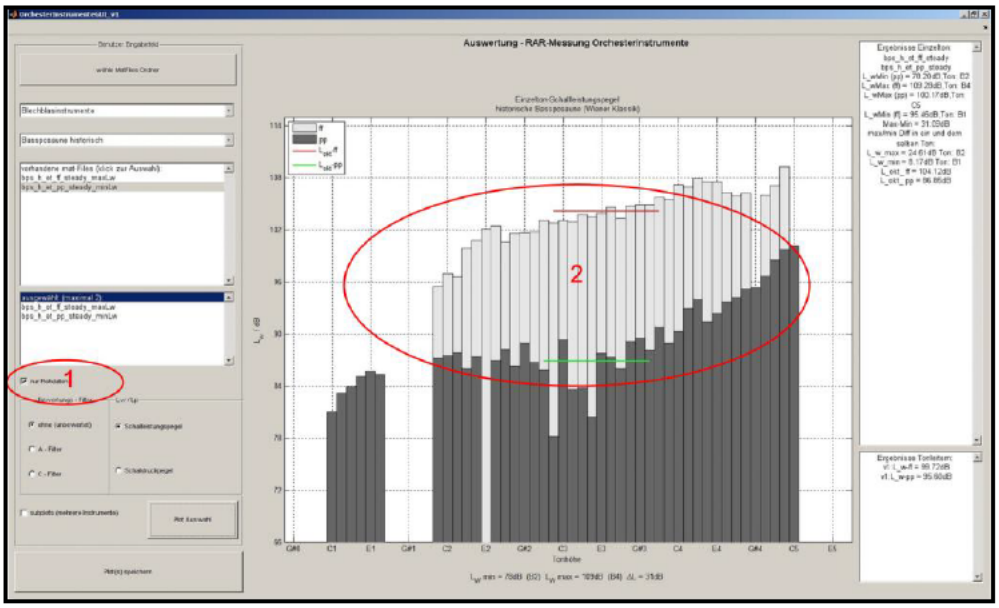

Abbildung B 6: Selektierte Checkbox 1 , Darstellung der „Rohdaten“ und Anzeige des mittleren Pegels der Töne in Mittellage (2).

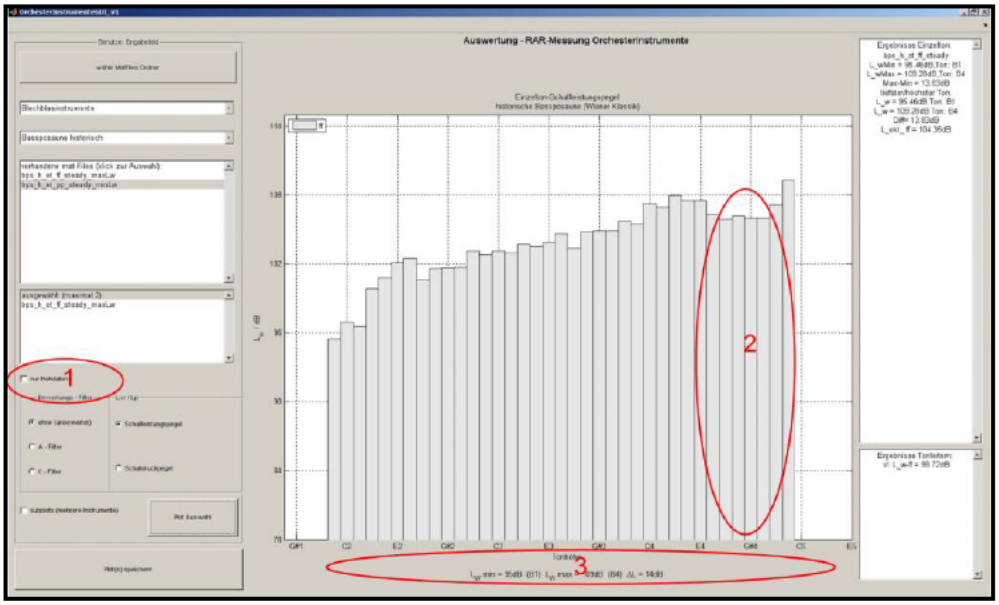

Abbildung B 7: Nicht aktivierte Checkbox (1), fehlende Daten werden durch Interpolation ermittelt (2) sowie Anzeige des Dynamikumfanges der Daten (3).

3. *Speicherung*

Zur konsistenten Darstellung und weiteren Verwendung des Diagrammes, kann dieses durch Anklicken des „plot s speichern“-Buttons, Abb. B 8, Schritt 1, und Ausfüllen des anschließend erscheinenden Dialogfensters in diversen Grafikformaten, Abb. B 8, Schritt 2, im angezeigten Layout gespeichert werden.

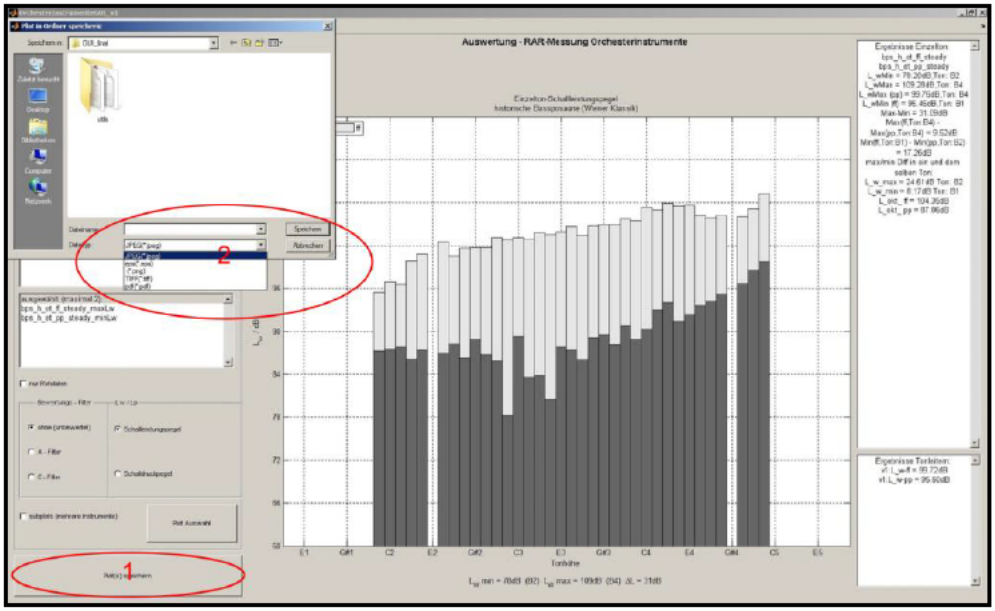

Abbildung B 8: Konsistente Speicherung der Daten durch Anklicken des „plot s Speichern“-Buttons (1) und Eingabe von Dateinamen und Formatauswahl im Dialogfenster (2).