Spielbewegungen von Musikinstrumenten und deren Bedeutung für das Klangergebnis - Ein experimenteller Zugang durch Motion Tracking klassischer Orchesterinstrumente und Auralisation der Bewegungsdaten

Masterarbeit

im Fachgebiet Audiokommunikation

vorgelegt von: Dominik Steger, cand. M.Sc., B.Sc.

[redacted] [redacted]

Erstgutachter: Prof. Dr. phil. Stefan Weinzierl

Betreuer: Dr. phil. Hauke Egermann M.A.

© 2014

Danksagung

Da das Thema dieser Arbeit gemeinsam entwickelt wurde und nicht zuvor ausgeschrieben war, möchte ich mich zunächst bei Prof Dr. Stefan Weinzierl dafür bedanken, die Möglichkeit der Ausarbeitung dieser Arbeit bekommen zu haben. Ebenfalls möchte ich mich für die regen Diskussionsrunden, in welchen gemeinsam die nächsten Schritte besprochen wurden und die somit einen Leitfaden im Verlauf der Arbeit darstellten, bedanken. Ich danke meinem Betreuer Dr. Hauke Egermann für die ständige Erreichbarkeit, die Beantwortung unzähliger E-Mails sowie die zahlreichen und jedes Mal aufschlussreichen Treffen und Besprechungen.

Für die Assistenz beziehungsweise die Mitarbeit bei der Messung der Spielbewegung der Instrumente möchte ich Marten Seedorf, Alexander Förstel sowie Alexander Fuß meinen Dank aussprechen. Ohne eure Mitarbeit wäre die Messung nicht durchführbar gewesen.

Insbesondere Danke an meine Eltern für die grenzenlose Unterstützung wärend meiner Studienzeit sowie an meinen Bruder und Mitbewohner, der für mich im Verlauf dieser Arbeit ein ständiger Ansprechpartner war und oft mit mir mitgedacht und diskutiert hat.

Eidesstattliche Erklärung

Ich, Dominik Steger, cand. M.Sc., B.Sc., Matrikel-Nr. 335151, versichere hiermit, dass ich meine Diplomarbeit mit dem Thema

> *Spielbewegungen von Musikinstrumenten und deren Bedeutung für das Klangergebnis -*
> *Ein experimenteller Zugang durch Motion Tracking klassischer Orchesterinstrumente und Auralisation der Bewegungsdaten*

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, wobei ich alle wörtlichen und sinngemäßen Zitate als solche gekennzeichnet habe. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Berlin, den

Dominik Steger, cand. M.Sc., B.Sc.

Kurzfassung

Die vorliegende Studie geht der Frage nach, inwieweit sich die Bewegung von Musikern und ihrer Instrumente bei der Live-Darbietung klassischer Musik auf den Klangeindruck beim Hörer auswirken. Um dies empirisch zu überprüfen, wurde die Position und die Orientierung von 11 klassischen Orchesterinstrumenten bei einem Live-Auftritt unter konzertähnlichen Bedingungen durch ein Motion Tracking System aufgenommen. Insgesamt 20 Musiker spielten sowohl stehend als auch sitzend je drei Stücke unterschiedlichen Charakters. Auf der Grundlage vorhandener Richtcharakteristiken für jedes der Instrumente und auf der Grundlage einer statistischen Analyse der Bewegungsbereiche wurden sowohl für den Direktschall als auch für das Schallfeld in einer typischen Konzertsaal-Situation Impulsantworten für verschiedene Orientierungen der Schallquelle simuliert. Die in einer Software zur raumakustischen Simulation berechneten Impulsantworten wurden durch ein Terzbankfilter an diskreten Frequenzstützstellen ausgewertet. Die so prädizierten Abweichungen pro Frequenzband lassen sowohl für den Direktschall und den nachhallbehafteten Fall als auch für den stehenden und sitzenden Fall eine hörbare Modulation des Klangeindrucks durch die typischen Bewegungen von Musikern erwarten. Die Ergebnisse dieser technischen Analyse legen nahe, dass das Fehlen der bei raumakustischen Simulationen typischerweise nicht berücksichtigten Bewegungen musikalischer Schallquellen für eine häufig bemängelte „Lebendigkeit“ von Auralisationen mitverantwortlich sein könnte. Hörversuche zum Ende der Arbeit, in welchen jeweils eine Auralisation eines sich bewegenden Musikinstruments mit einer unbewegten Aufführung des Instruments durch einen ABX-Test miteinander verglichen wurden (Trompete, Oboe, Violine), haben gezeigt, dass tatsächlich ein Unterschied zwischen der Simulation mit und ohne Bewegung hörbar ist (elf (11) Veruchspersonen, zwanzig (20) Durchgänge, insgesamt sechs (6) ABX-Test bei drei (3) Instrumenten und zwei (2) Räumen). Die Ergebnisse dieser Studie legen Nahe, dass künftig in der virtuellen Akustik die Spielbewegung klassischer Musikinstrumente Berücksichtigung finden sollte.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung **4**

Abbildungsverzeichnis **IV**

Tabellenverzeichnis **VIII**

1 Einleitung **1**
1.1 Ziel der Arbeit 1
1.2 Stand der Forschung 2

2 Grundlagen **6**
2.1 Lokalisation von Schallquellen 6
2.2 Abstrahlverhalten von Musikinstrumenten 6
2.3 Prinzip der Auralisation 11
2.3.1 Spiegelschallquellenmethode (Image Source Model) 12
2.3.2 Strahlverfolgung (Ray Tracing) 13
2.3.3 Hybride Verfahren 14

3 Methode **16**
3.1 Auswahl des Motion Tracking Systems 16
3.1.1 Vergleich des optischen und des elektromagnetischen Trackings 16
3.1.2 Vorstellung des Bewegungserfassunssystems - OptiTrack . . . 18
3.2 Messung der Bewegungsdaten und Audioaufnahme der Orchesterinstrumente 20
3.2.1 Messaufbau 20
3.2.1.1 Audioaufnahme 20
3.2.1.2 Aufnahme der Bewegungsdaten 22
3.2.2 Versuchspersonen 22
3.2.3 Versuchsdurchführung 24
3.2.3.1 Kalibrierung des Kamerasystems 24
3.2.3.2 Instruktion der Versuchspersonen 26
3.2.3.3 Vorbereitung 26
3.2.3.4 Aufnahme 28
3.3 Bearbeitung der Messdaten 34
3.3.1 Import der Messdaten in Matlab 34
3.3.2 Synchronisation der Audioaufnahme mit den Bewegungsdaten 37
3.3.3 Vermeidung von Gimbal Lock in der Eulerdarstellung 39

3.3.4 Bereinigung von Messfehlern 42
3.3.5 Berechnung Relativer Bewegungsdaten 47
3.3.6 Transformation der Eulerwinkel in Richtungsvektoren 48
3.3.7 Translation der Rigid-Body-Position 50

4 Ergebnisse **53**
4.1 Analyse der Bewegungsdaten 53
4.2 Auswertung und Auralisation 59
4.2.1 Akustik-Simulationssoftware Raven 59
4.2.2 Simulation von Impulsantworten für verschiedene Orientierungen der Quelle 61
4.2.2.1 Virtuelle Umgebung - 3D Modell 61
4.2.2.2 Simulationsparameter 64
4.2.3 Vergleich der simulierten Impulsantworten 64
4.2.3.1 Vergleich der natürlichen Spielhaltung mit Extremorientierungen anhand des Amplitudenfrequenzganges 64
4.2.3.2 Terzbankfilterung der Impulsantworten 65
4.2.3.3 Darstellung der Ergebnisse 67
4.2.4 Auralisation der Live-Auftritte 72

5 Hörversuch **74**
5.1 Methode 74
5.2 Versuchspersonen 74
5.3 Stimuli 75
5.4 Versuchsdurchführung 76
5.5 Ergebnisse 76

6 Fazit **79**

7 Ausblick **81**

Literaturverzeichnis **82**

A Anhang **i**

B Grafische Darstellung der Ergebnisse **x**

Abbildungsverzeichnis

2.1 Abstrahlcharakteristik einer Klarinette bei einer Frequenz von 1250 Hz - links: Fontalansicht, rechts: Seitenansicht. 10
2.2 Abstrahlcharakteristik einer Klarinette bei einer Frequenz von 5000 Hz - links: Fontalansicht, rechts: Seitenansicht. 10

3.1 Triangulation - Berechnung der 3D Koordinaten des Punktes P durch Berechnung des Schnittpunkts der Vektoren *(pl - Cl)* und *(pr - Cl)* [3]. 17
3.2 Kamera des Tracking-Systems (siehe Anhang A) 19
3.3 Software Motive:Tracker (siehe Anhang A) 19
3.4 AKG C417, DPA Klipp und Mikrofonhalterung exempalrisch für die Posaune. 21
3.5 Messaufbau im Curt-Sachs-Saal. 23
3.6 Messaufbau im Hauptgebäude der Technischen Universität Berlin. . 24
3.7 Calibration Square: Definition des Nullpunkts an mit rotem Pfeil gekennzeichneter Stelle. X-Richtung nach rechts (grüner Pfeil), negative Z-Richtung zum Publikum hin (blauer Pfeil), Y-Richtung nach oben. 25
3.8 Dokumentation der Lage des Rigid-Bodies auf dem Instrument und auf der Starterklappe. Oben - Fagott, zweites von oben - Oboe, zweites von unten - Querflöte, unten - linke Seite der Starterklappe. 29
3.9 Musiker während der Aufnahme. Oben Fagott, unten Oboe. 32
3.10 Musiker während der Aufnahme. Oben Querflöte, unten Violoncello. 33
3.11 Datenstruktur in Matlab. Für jedes Instrument zunächst eine Unterteilung in die verschiedenen Aufnahmen. 35
3.12 Exemplarische Darstellung der Bewegungsinformationen der ersten Aufnahme im Sitzen. 36
3.13 Darstellung der Informationen eines Rigid-Bodies exempalrisch für die erste Aufnahme im Sitzen. 36
3.14 Euklidischen Distanz zwischen der rechten und der linken Seite der Starterklappe. 39
3.15 Bezugsrichtung beziehungsweise Ausgangslage zur Interpretation der Eulerwinkel [2]. 40
3.16 Eulerwinkel der zweiten Aufnahme der Querflöte1 im Stehen (siehe Tabelle 3.1) ohne Nachbearbeitung. Pitch und Roll nehmen hierbei unrealistische Werte an. 41

3.17 Eulerwinkel für das zweite Stück der Querflöte1 (siehe Tabelle 3.1) im Stehen gespielt nach der Rotation des Kamerakoordinatensystems um 45 Grad in Yaw. 42
3.18 Eulerwinkel der dritten Aufnahme der Posaune1 im Stehen (siehe Tabelle 3.2). Sprung bei in etwa 28 Sekunden erkennbar. 43
3.19 Eulerwinkel der dritten Aufnahme der Posaune1 im Stehen (siehe Tabelle 3.2) nach der linearen Interpolation. 44
3.20 Eulerwinkel der dritten Aufnahme der Posaune1 im Stehen (siehe Tabelle 3.2) nach Filterung nach dem Prinzip des gleitenden Durchschnitts. 45
3.21 Relative Positionswerte der Oboe1 bei der dritten Aufnahme im Stehen (siehe Tabelle 3.1). 48
3.22 Relative Eulerwinkel der Oboe1 bei der dritten Aufnahme im Stehen (siehe Tabelle 3.1). 49
3.23 Relativet Vorwärts-Vektor der Oboe1 bei der dritten Aufnahme im Stehen (siehe Tabelle 3.1). 51
3.24 Relativer Oben-Vektor der Oboe1 bei der dritten Aufnahme im Stehen (siehe Tabelle 3.1). 52
3.25 Positionswerte der Querflöte1 bei der zweiten Aufnahme im Stehen (siehe Tabelle 3.1) vor (grün) und nach (blau) der Translation der Rigid-Body-Position auf dem Instrument. 52

4.1 3D-Computermodell (SketchUp). 63
4.2 3D-Computermodell aus Sicht des Empfängers (SketchUp). 63
4.3 Frequenzgang der simulierten Impulsantwort (Concertgebouw) der ersten Oboe im Stehen für die natürliche Spielhaltung. Rot vor und blau nach der spektralen Glättung. 65
4.4 Amplitudenfrequenzgang der simulierten Impulsantworten verschiedener Quellorientierungen (Trompete 2, stehende Aufführung im Konzertsaal). 67
4.5 Trompete 2: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, zweites von Unten: RAR stehend, unten: RAR sitzend. 68

B.1 Kontrabass 1: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, unten: RAR stehend (RAR: Q5=Q10=Q25 und Q75=Q90=Q95). x
B.2 Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Cello 1: Oben: Concertgebouw sitzend, 2. von oben: RAR sitzend, Cello 2 : 2. von unten: Concertgebouw sitzend, unten: RAR sitzend.(RAR: Q5=Q10=Q25 und Q75=Q90=Q95). xi

B.3 Viola 1: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw sitzend, unten: RAR sitzend (RAR: Q75=Q90=Q95). xii
B.4 Viola 2: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend, unten: RAR sitzend. xiii
B.5 Violine 1: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend, unten: RAR sitzend. . xiv
B.6 Violine 2: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend, unten: RAR sitzend. . xv
B.7 Oboe 1: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend, unten: RAR sitzend (hier Q5=Q10 und Q90=Q95). xvi
B.8 Oboe 2: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend, unten: RAR sitzend. xvii
B.9 Klarinette 1: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend, unten: RAR sitzend. . xviii
B.10 Klarinette 2: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend, unten: RAR sitzend (RAR: Q90=Q95). xix
B.11 Fagott 1: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend (hier Q75=Q90), unten: RAR sitzend. xx
B.12 Fagott 2: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend (hier Q5=Q10 und Q25=Q75), unten: RAR sitzend (hier Q5=Q10 und Q25=Q75=Q90). xxi
B.13 Querflöte 1: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend, unten: RAR sitzend. . xxii

B.14 Querflöte 2: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend (hier Q90=Q95), unten: RAR sitzend. xxiii
B.15 Trompete 1: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend (hier Q90=Q95), unten: RAR sitzend (hier Q5=Q10). xxiv
B.16 Trompete 2: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend, unten: RAR sitzend. . xxv
B.17 Posaune 1: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend, unten: RAR sitzend (hier Q10=Q25). xxvi
B.18 Horn 1: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend, unten: RAR sitzend (RAR: Q5=Q10). xxvii
B.19 Horn 2: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend (hier Q90=Q95), unten: RAR sitzend (hier Q5=Q10 und Q75=Q90). xxviii

Tabellenverzeichnis

3.1 Darstellung der in der Messreihe gespielten Stücke. 30
3.2 Darstellung der in der Messreihe gespielten Stücke. 31
3.3 Darstellung der Anzahl an Interpolationen sowie der Interpolationsdauer. Informationen zu den gespielten Stücken können den Tabelle 3.1 und 3.2 entnommen werden. 46
3.4 Darstellung derjenigen Instrumente, deren Orientierungsdaten nach dem Prinzip des gleitenden Durchschnitts gefiltert wurden. 47

4.1 Durchschnittsgeschwindigkeit (Motion Index) mit der ein Instrument bewegt wurde. 55
4.2 Interquantilabstand Q_5 - Q_{95} der Eulerwinkel. Sortierung der Werte nach Yaw (siehe Abbildung 3.16). 57
4.3 Interquantilabstand Q_5 - Q_{95} der Eulerwinkel. Sortierung der Werte nach Pitch (siehe Abbildung 3.16). 58
4.4 Nachhallzeit nach Eyring im unbesetzten Konzertsaal (Concertgebouw). 62
4.5 Dartsellung der mittleren Abweichung sowie des Maximalwertes über alle Instrumente betrachtet. 70
4.6 Darstellung der Ergebnisse im Konzertsaal (Concertgebouw). 71

5.1 Orientierung der Instrumente in der unbewegten Auralisation. 75
5.2 Darstellung der Anzahl an korrekten Antworten pro Instrument und Raum. 77

A.1 Interquantilabstand Q_{10} - Q_{90} für die Eulerwinkel. iii
A.2 Interquantilabstand Q_{25} - Q_{75} für die Eulerwinkel. iv
A.3 Quantilwerte der Eulerwinkel bei stehender Aufführung (Yaw, Pitch, Roll [°]). v
A.4 Quantilwerte der Eulerwinkel bei stehender Aufführung (Yaw, Pitch, Roll [°]). vi
A.5 Quantilwerte der Eulerwinkel bei sitzender Aufführung (Yaw, Pitch, Roll [°]). vii
A.6 Quantilwerte der Eulerwinkel bei sitzender Aufführung (Yaw, Pitch, Roll [°]). viii
A.7 Darstellung der Ergebnisse im reflexionsarmen Raum (RAR). ix

1 Einleitung

In diesem Kapitel wird zunächst das Thema sowie die Motivation der Arbeit beschrieben. Anschließend wird ein Überblick über bisherige Studien zum Thema Musik und Bewegung gegeben.

1.1 Ziel der Arbeit

Bei einer musikalischen Live-Aufführung wird je nach Musiker das Instrument mehr oder weniger bewegt. Dabei nimmt die visuelle Information bei einem Live-Auftritts Einfluss auf die Wahrnehmung der Aufführung durch den Zuschauer ([19], [27], [18]). Wird eine Schallquelle bei einem Live-Auftritt bewegt, so kann diese Bewegung jedoch auch zu einem neuen Klangergebnis führen, welches nicht nur durch die Position und die Orientierung der Schallquelle sowie des Zuhörers, sondern auch von der spezifischen Richtwirkung der Quelle und dem Raum, in dem man sich befindet, beeinflusst wird (siehe Abschnitt 2). Es stellt sich die Frage, ob, und wenn ja, bei welchen Musikinstrumenten die Bewegung des Instruments hörbar ist. Ziel dieser Arbeit ist es also, den Einfluss der Bewegung eines Musikinstruments in einer Auffühung auditiv zu untersuchen. Der Bereich der virtuellen Akustik beschäftigt sich unter anderem mit der Simulation von musikalischen Aufführungen. Nachdem in der virtuellen Akustik die Spielbewegung bisher typischerweise nicht modelliert wird, und da in Auralisationen (künstliche Hörbarmachung) häufig das Fehlen von „Lebendigkeit“ bemängelt wird, hat diese Studie zum Ziel, die Frage, ob die Bewegung eines bestimmten Musikinstruments künftig in akustischen Simulationen Berücksichtigung finden sollte, zu beantworten.
In einem experimentellen Zugang durch Motion-Tracking werden Bewegungsdaten der klassischen Orcheterinstrumente wärend eines Live-Auftritts von professionellen Musikern aufgezeichnet. Sowohl für den Fall einer stehenden Aufführung, als auch für den sitzenden Fall werden die Bewegungsdaten hinsichtlich typischer Werte der Orientierung eines Instruments statistisch analysiert. In einer Akustiksimulationssoftware können anschließend unter Rücksichtnahme der Abstrahlcharakteristik eines Instruments für die verschiedenen Quellorientierungen Impulsantworten simuliert werden. Durch einen Vergleich des Amplitudenfrequenzganges dieser Impulsantworten kann eine technische Auswertung des Einflusses der Bewegung auf das Klangergebnis für jedes Instrument vorgenommen werden. Zum Ende der Arbeit wird für diejenigen Instrumente, bei denen die größte Veränderung des Klangbildes erwartet wird, eine Auralisation der Live-Aufführungen durchgeführt [1]. Um die

Hörbarkeit der Bewegung in einem Live-Auftritt perzeptuell zu untersuchen, wird auf Grundlage der gemessenen Bewegungdaten je eine Auralisation mit und ohne Bewegungssimulation erstellt. Das bewegte Signal kann anschließend mit der unbewegten Variante in einem ABX-Test verglichen werden um herauszufinden, ob ein Unterschied zwischen den Stimuli hörbar ist.

1.2 Stand der Forschung

In diesem Abschnitt werden verschiedene Arbeiten zum Thema Musik und Bewegung vorgestellt.
In den letzten Jahren wurden viele Studien zum Thema Musik und Bewegung durchgeführt. Dabei hatten zahlreiche Arbeiten zum Ziel die Bewegungen eines Musikers zu analysieren (beispielsweise Erkennung von Bewegungsmustern oder Bewegungsspielraum) und einen Zusammenhang zwischen der musikalischen Expressivität des Musikers zu seinen Bewegungen und zu den zum Zuhörer transportierten Emotionen zu erforschen. Es wurde herausgefunden, dass gerade die visuelle Information großen Einfluss auf die Wahrnehmung eines Live-Auftritts nimmt ([27],[18],[19]). In dieser Arbeit wird hingegen die visuelle Information außer Acht gelassen und untersucht, welche Auswirkung die Spielbewegung bei einem bestimmten Instrument auf das Klangergebnis nimmt.
Wanderley et al haben den Einfluss der Bewegung eines Musikers auf den produzierten Klang eines akustischen Instruments (Klarinette) erforscht sowie eine Modellierung des durch Bewegung hervorgerufenen akustischen Effekts vorgenommen [16]. Es wurde gezeigt, dass die Bewegung eines Instruments, hervorgerufen durch Gesten, welche nicht zwingend zum Spielen eines Instruments benötigt werden (sogenannte ancillary gestures), nicht nur eine visuelle Bedeutung bei der Wahrnehmung einer Aufführung haben, sondern auch Einfluss auf den Klang, der beim Spielen einer Klarinette erzeugt wird, nehmen. So kann die Bewegung der Klarinette zu starken Klangmodulationen führen, die als Phaser-Effekt (phasing effect) oder als Schwebungs-Effekt (beating effect) wahrgenommen werden. Durch Analyse und durch Messungen wurde herausgefunden, dass die Klangmodulationen zu großen Teilen von den Gesten des Musikers und der Raumakustik, insbesondere von den frühen Reflexionen durch den Boden, bestimmt werden. Ebenso wurde festgestellt, dass nicht die Geschwindigkeit, in der das Instrument bewegt wird, sondern die Orientierung der Klarinette im Raum bei der Simulation des Klanges eine große Rolle spielt, besonders bei der Anregung von frühen Bodenreflexionen. Die Studie von Wanderley et al hat also gezeigt, dass bei einer Klarinette unter bestimmten raumakustischen Bedingungen ein Unterschied im Klangergebnis aufgrund von Bewegung vorliegt. Es macht also Sinn, diesen Unterschied nicht nur für die Klarinette,

sondern auch für die restlichen klassischen Orchesterinstrumente zu erforschen und eine Beurteilung, wie stark der Einfluss der Bewegung bei einem bestimmten Musikinstrument ist, vorzunehmen.
Rindel und Otondo haben ebenfalls eine unterschiedliche Orientierung eines Instruments hinsichtlich einer Klangveränderung untersucht [23]. In dieser Arbeit wurden zunächst nachhallfreie Aufnahmen einer Klarinette und eines Pianos mit fünf (5) und mit dreizehn (13) gleichmäßig verteilten Mikrofonen aufgezeichnet. In der Akustiksimulationssoftware Odeon wurde eine Quelle definiert, welche aus mehreren, den verschiedenen Kanälen der nachhallfreien Aufnahmen entsprechenden, höchst gerichteten Quellen zusammengesetzt wurde. Durch diese Herangehensweise konnten Variationen in der Schallabstrahlung des Instruments, beispielsweise verursacht durch eine Veränderung der Lautstärke oder durch die Bewegung des Musikinstruments während der Aufnahme, reproduziert und mit Raumakustik kombiniert werden. Dabei wurde zur Simulation ein 3D-Raummodell einer Konzerthalle, genauer der Queens Hall in Kopenhagen, verwendet. Sowohl für die Klarinette, als auch für das Piano wurden drei verschiedene Quellenpositionen mit jeweils zwei verschiedenen Quellenorientierungen simuliert. Als Zuhörerposition wurde eine feste und immer gleichbleibende Position festgelegt. Für die verschiedenen Quellenpositionen wurden jeweils Auralisationen durchgeführt sowie Ergebnisse in Form von relativen Schalldruckpegeln an der Zuhörerposition dargestellt. Es wurde festgestellt, dass unterschiedliche Orientierungen der Quelle auf der Bühne die Gesamtlautstärke veränderte, der Hauptunterschied jedoch war eine Veränderung der Balance zwischen den Abstrahlrichtungen, welche kleine Veränderungen der Klangfarbe zur Folge hat. Wurde die Klarinette um 90 Grad gedreht oder das Piano um 180 Grad, so war der Einfluss auf die Balance zwischen den Abstrahlrichtungen so groß, dass Veränderungen der Klangfarbe auch in der Auralisation hörbar waren. Die Studie von Rindel und Otondo hat gezeigt, dass unterschiedliche Orientierungen einer Klarinette und eines Pianos auf der Bühne zu einer Veränderung der Klangfarbe sowie der Balance und der Lautstärke führen können. Rindel und Otondo betrachteten dabei jeweils diskrete und feste Quellpositionen und ließen die Frage außer Acht, in wie fern ein fließender Positionswechsel aufgrund der Bewegung hörbar ist. Teil dieser Studie ist die Auralisation der Spielbewegung eines Live-Auftritts, in der der gesamte Bewegungsverlauf Berücksichtigung findet. Anschließend wird untersucht, ob dieser Bewegungsverlauf hörbar ist.
Schon im Jahr 2001 haben Lokki and Järveläinen eine Studie durchgeführt, in der ein Vergleich einer realen Aufnahme mit einer Auralisation einer dynamischen Szene an Hand eines AB-Tests durchgeführt wurde [15]. Mit Hilfe zweier, in der Nähe des Trommellfells einer Versuchsperson platzierter Mikrofone wurden nachhallfreie Stimuli, welche über einen CD Spieler in einem Seminarraum abgespielt wurden, aufgenommen. Es wurden mehrere solcher binauraler Aufnahmen für verschiede-

ne Stimuli (Klarinette, Gitarre, kuntinuierliches Trommeln der Snare-drum, Sängerin) aufgezeichnet, die als Abbild der Realität in dem AB-Test dienten. Mit Hilfe des Auralisationssystems Diva [13] wurden zu jeder realen Aufnahme entsprechende Simulationen berechnet. Es wurde zunächst ein 3D-Modell des Seminarraums erstellt und anschließend die Schallquelle entsprechend der Position des CD-Spielers an einen festen Ort im Modell platziert. Zur Auralisation wurde zwischen verschiedenen Empfängerpositionen unterschieden: Zwei statische Positionen, zu jeder statischen Position jeweils Orientierungen des Empfängers zu beiden Seiten, sowie zwei Pfade, welche der Empfänger dynamisch entlang ging. Um eine möglichst realistische Simulation zu erhalten wurde die Abstrahlcharakteristik der verschiedenen Quellen mit in die Auralisation einbezogen. In den folgenden Hörversuchen sollte die Lokalisation der Quelle, die Externalisierung, das Gefühl für den Raum sowie die Klangfarbe bewertet werden. Dabei wurde herausgefunden, dass die realen Stimuli und die Auralisationen, bis auf die Snar-Drum (breitbandiges Signal, welches anfällig für Modellierungsfehler ist), als 'ziemlich gleich' oder 'geringfügig unterschiedlich' bewertet wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass es möglich ist, eine natürlich klingende virtuelle Umgebung mit einem sich dynamisch bewegenden Empfänger in einem physik-basierten Raumakustik-Modell zu erstellen. Lokki and Järveläinen haben mit ihrer Studie jedoch nicht die Bewegung einer Schallquelle und deren Auswirkung auf das Klangergebnis untersucht.

Perez et al haben in ihrer Arbeit zunächst beschrieben wie die Abstrahlcharackteristik einer Violine gemessen und berechnet werden kann [6]. Die Vorgehensweise bestand darin eine Übertragungsfunktion zwischen dem Anregesignal (Glissando), das mit einem Piezomikrofon direkt an der Violine abgenommen wurde und dem abgestrahlten Schall, welcher in einem reflexionsarmen Raum mit 21 kugelförmig angeordneten Mikrofonen aufgenommen wurde, zu berechnen. Die Impulsantwort der Violine wurde durch Entfaltung des Anregesignals und der Mikrofonaufnahmen berechnet. Eine realistische Simulation des Klangs der Violine wurde dadurch erzielt, dass eine Faltung eines Quellsignals, das entweder synthetisiert oder mit einem Piezomikrofon abgenommen wurde, mit der Impulsantwort der Violine vorgenommen wurde. Da die Bewegung eines Musikers bei einem Live-Auftritt zu einer ständigen Veränderung der Position und Orientierung der Violine führt, nimmt der Zuhörer den abgestrahlten Schall aus einer durchgehend veränderten Richtungen wahr. Diese Bewegung wurde zum Ende der Arbeit simuliert, indem framebasiert die Position des Zuhörers in Bezug auf die Position der Violine berechnet und die dieser Richtung entsprechende Impulsantwort der Violine verwendet wurde. Hierzu diente eine Datenbank an Aufführungen von Violinisten als Grundlage. Hörbeispiele dieses Projekts können im Internet gefunden werden [7]. Am Beispiel der Violine haben Perez et al eine technische Umsetzung der Auralisation von Spielbewegung eines Musikinstruments demonstriert und dabei vorausgesetzt, dass die Spielbewegung den Klang

wahrnehmbar verändert. Teil dieser Studie hingegen ist unter Anderem, den Einfluss der Spielbewegung unter verschiedenen Instrumenten zu quantifizieren.

2 Grundlagen

2.1 Lokalisation von Schallquellen

Schallsignale, welche über die Luft die beiden Trommelfelle erreichen, werden als Ohrsignale bezeichnet. Der Mensch ist in der Lage, aus Luftdruckschwankungen an den beiden Trommelfellen, beziehungsweise aus Unterschieden in den beiden Ohrsignalen räumliche Informationen zu rekonstruieren und daraus auditorische Parameter wie Richtung und Entfernung der Schallquelle zu folgern. Die Ohrsignale werden bevor sie am Trommelfell anliegen durch ein System bestehend aus Kopf, Rumpf und Ohren linear verzerrt. Dieses System kann dabei als eine Art bewegliche Antenne für Schallsignale angesehen werden, die eine richtungs-, entfernungs- und frequenzabhängige Richtcharakteristik aufweist. Treffen Schalle von einer Schallquelle auf den Kopf, so werden diese in ihrem Amplituden- und Phasenspektrum jeweils spezifisch für den Ort der Schallquelle verändert. Neben der visuellen Information und Peilbewegungen durch den Kopf dienen interaurale Ohrsignalmerkmale der Lokalisation einer Schallquelle. So werden Unterschiede der beiden Ohrsignale bezüglich ihres Schalldruckpegels (interaurale Pegeldifferenz) sowie bezüglich des Zeitpunktes ihres Eintreffens (interaurale Laufzeitdifferenzen) zur Lokalisation der Schallquelle ausgewertet und verarbeitet. Die sogenannte Lokalisationsunschärfe beschreibt hierbei die kleinste Änderung eines Schallereignismerkmals, die zu einer Änderung des Hörereignisortes führt. Diese beträgt in seitlicher Abweichung von der Vorne-Richtung in etwa $\pm 4°$, für eine Abweichung von der Vorne-Richtung nach oben beziehungsweise nach unten beträgt diese in etwa $\pm 10°$ [4]. Wird nun die Bewegung eines Musikinstruments während eines live-Auftritts auralsiert, so sollte eine unterschiedliche Position und Orientierung des Musikinstruments auch aufgrund der Lokalisationsfähigkeit des Menschen zu einem wahrnehmbar veränderten Klang führen. Am Ende dieser Arbeit wird durch Hörversuche perzeptuell untersucht, ob ein Unterschied zwischen einer bewegten und einer unbewegten Schallquelle, vielleicht auch aufgrund der Lokalisationsfähigkeit des menschlichen Gehörs, wahrnehmbar ist.

2.2 Abstrahlverhalten von Musikinstrumenten

Eine wichtige klangliche Eigenschaft eines Musikinstruments ist das Abstrahlverhalten beziehungsweise die Richtcharakteristik eines Instruments. Darunter versteht man eine je nach Schallquelle mehr oder weniger stark ausgeprägte Richtungsabhängigkeit der Schallabstrahlung. Diese frequenzabhängige Richtwirkung ist bedingt

durch die Bauart eines Instruments und kann auf unterschiedlich schwingende Bereiche im Instrument zurückgeführt werden, die zu spezifischen Überlagerungen von Schallwellen führen. Eine kugelförmige Richtcharakteristik, also eine allseitig gleichmäßige Schallabstrahlung, findet nur statt, wenn die gesamte Oberfläche einer Schallquelle beziehungsweise eines Instruments gleichphasig schwingt und somit einer „atmenden Kugel“ ähnelt, oder bei der Abstrahlung tiefer Frequenzen, bei der die Abmessung der Schallquelle klein im Verhältnis zur Wellenlänge ist [17]. Das Abstrahlverhalten einer Schallquelle kann unter anderem mit dem Einzahlwert des statistischen Richtfaktors charakterisiert werden. Dieser gibt das Verhältnis des in einer bestimmten Richtung im Freifeld gemessenen Schalldrucks zu demjenigen Schalldruck, der in gleicher Entfernung bei einer kugelförmigen Schallabstrahlung mit gleicher Schallleistung erwartet werden würde. Ein Wert des statistischen Richtfaktors von eins (1) bedeutet also, dass die Abstrahlintensität derjenigen einer Schallquelle mit kugelförmiger Richtcharakteristik entspricht, Werte größer eins (1) deuten auf eine übermäßig starke, Werte kleiner eins (1) auf eine abgeschwächte Abstrahlung in diese Richtung hin. Möchte man nun diese Information durch den Schalldruckpegel ausdrücken, so lässt sich der statistische Richtfaktor, wie in Gleichung 2.1 zu sehen, in das sogenannte Richtwirkungsmaß umrechnen.

$$D = 20 \cdot log\Gamma_{st} \tag{2.1}$$

Dieses Richtwirkungsmaß gibt an, um wie viel dB der Schalldruckpegel in einer bestimmten Richtung von dem Schalldruckpegel einer Schallquelle mit kugelförmiger Abstrahlung abweicht.
Bei den Blechblasinstrumenten (Trompete, Posaune, Tuba, Horn) liegtBündelung stärkster Schallabstrahlung größtenteils in Richtung der Trichterachse vor. Die Form und die Größe des Schalltrichters sowie der anschließende Konusverlauf bestimmen hier zu weiten Teilen das Abstrahlverhalten. Im tiefen Frequenzbereich, in dem die Wellenlänge der abgestrahlten Frequenzen groß gegenüber dem Durchmesser des Trichters ist, findet eine kugelförmige Abstrahlung statt. Anschließend sinkt der Hauptabstrahlungswinkel innerhalb einer Oktave auf in etwa 90°, komplizierte Phasenfronten charakterisieren diesen Bereich. Hohe Frequenzen werden bei Blechblasinstrumenten stark gerichtet ausgestrahlt, so dass ein statistischer Richtfaktor Werte über sechs (6) annehmen kann. So liegt bei der Trompete bei $15kHz$ der größte statistische Richtfaktor aller Blechblasinstrumente von 6.6 entsprechend einem Richtwirkungsmaß von $16.4dB$ vor [17].
Rohrblattinstrumenten (Oboe, Klarinette, Fagott) strahlen den Schall nicht nur durch das offene Ende aus, sondern auch durch die Seitenlöcher, sofern diese geöffnet sind. Für den mittleren Frequenzbereich hat dies zur Folge, dass die Richtung

stärkster Abstrahlung senkrecht zur Hauptachse des Instruments liegt, die Abstrahlung in Richtung der Instrumentenachse ist hier minimal. Je mehr die Frequenz anschließend ansteigt, desto mehr nähert sich die Hauptabstrahlrichtung der Hauptachse des Instruments an, so dass für hohe Frequenzen die Abstrahlrichtung fast ausschließlich in Richtung der Instrumentenachse liegt. Bei keiner anderen Instrumentengruppe wird die Richtungsabhängigkeit der Schallabstrahlung mehr durch die Abschattung des Schalls durch den Körper des Musikers beeinflusst als bei dieser. Die Bündelung der Schallabstrahlung der Rohrblattinstrumente ist nicht so extrem ausgebildet wie bei den Blechblasinstrumenten, nichts desto trotz liegt beispielsweise bei der Klarinette bei $5kHz$ ein statistischer Richtfaktor von 4.5 vor, so dass sich hier eine Bündelung der Schallabstrahlung in Richtung der Instrumentenachse mit einem Richtwirkungsmaß von $13dB$ ergibt [17].
Bei den Flöten findet die Schallabstrahlung an dem ersten, sofern geöffneten, Grifflloch sowie an dem Mundloch statt, so dass diese beiden Bereiche als zwei Quellen angesehen werden können beziehungsweise die Schallabstrahlung als die eines Dipolstrahlers interpretiert werden kann. Die Richtcharakteristik für alle nichtüberblasenen Grundtöne ist hier gleich und zeichnet sich durch eine Hauptabstrahlrichtung senkrecht zur Instrumentenachse aus, wobei die Abstrahlung in Richtung der Instrumentenachse minimal ist. Für die überblasenen Grundtöne hingegen liegt die Hauptabstrahlrichtung in einem Winkel von in etwa 35° links und rechts zur Blickrichtung. Die Abstrahlung senkrecht zu und in Richtung der Instrumentenachse ist hier minimal. Für hohe Frequenzen findet wiederum eine Hauptabstrahlung in Richtung der Instrumentenachse statt. Der Dipolcharakter der Flöten hat zur Folge, dass Rückwand und Deckenreflexionen für diese günstig sind, wobei Seitenwandreflexionen eine untergeordnete Rolle spielen. Flöten erreichen einen statistischen Richtfaktor von maximal 2 bei $6kHz$ entsprechend einem Richtwirkungsmaß von $6dB$. Auch hier findet die Hauptabstrahlung in Richtung der Instrumentenachse statt [17].
In der Gruppe der Streichinstrumente (Violine, Viola, Violoncello, Kontrabass) entsteht die Schallabstrahlung durch Schwingung von Decke und Boden, beziehungsweise durch Schwingungen von Teilbereichen auf Decke und Boden mit unterschiedlicher Amplitude und Phasenlage. Die Bauweise und das verwendete Holz eines Streichinstruments bestimmen die Resonanzen des Korpus, so dass die Richtcharakteristik sich von Instrument zu Instrument leicht unterscheidet. Für den tiefen Frequenzbereich wirken auch die ff-Löcher an der Schallabstrahlung mit, die Richtcharakteristik in diesem Bereich ist kugelförmig. Für die Violine und für die Viola unterscheiden sich zwar die jeweiligen Frequenzbreiche und Öffnungswinkel der Hauptabstrahlung, man kann jedoch für beide Instrumente festhalten, dass nach der kugelförmigen Abstrahlung tiefer Frequenzen ein Frequenzbereich folgt, in dem die Abstrahlung zur rechten und zur linken Seite des Spielers in etwa gleichmäßig ist. Darauf folgt ein Frequenzbereich mit der stärksten Bündelung in senkrechter Richtung zur Decke

der Violine (1000-1250Hz) beziehungsweise der Viola (800-1000Hz), hohe Frequenzen werden ebenfalls verstärkt in senkrechter Richtung zur Decke, jedoch mit einer etwas geringeren Bündelung ausgestrahlt. Das Violoncello stößt Schallwellen bis in etwa 100Hz kugelförmig ab, anschließend liegt eine breite Abstrahlung bis in etwa 300Hz vor, in der sich die Vorzugsrichtung zwischen vorne und hinten immer wieder abwechselt. Die stärkste Bündelung mit einer Vorzugsrichtung senkrecht zur Decke liegt hier im Bereich von etwa 350-500Hz vor. Im Frequenzbereich von 1000-1250Hz strahlt das Violoncello verstärkt nach oben, anschließend strahlt dieses Instrument ab in etwa 2kHz mit einem schmalen Öffnungswinkel senkrecht nach oben sowie flach gegen den Boden. Die Richtcharakteristik des Kontrabass ähnelt der des Violoncellos, wobei der Frequenzbereich der typischen Schallkonzentration um etwa eine Oktave niedriger liegt. Den größten Wert für das Richtwirkungsmaß unter den Streichinstrumenten erreicht das Violoncello mit einem statistischen Richtfaktor von 3.0 bei 3kHz entsprechend einem Richtwirkungsmaß von 9,3dB [17].

Um die Spielbewegung von Musikinstrumenten auf die Bedeutung für das Klangergebnis zu untersuchen und um eine möglichst realistische Auralisation zu erzeugen, muss, da auch die räumliche Wirkung eines Musikinstruments von dem Abstrahlverhalten beeinflusst wird, diese mit in die Simulation einbezogen werden [28]. Sogenannte Balloon-Daten bieten die Möglichkeit, das Abstrahlverhalten einer Schallquelle in dreidimensionaler Form darzustellen. Des Weiteren dienen Balloon-Daten als Datenbasis für Simulationsprogramme. Die Balloon-Daten erhält man dadurch, dass in einem Kugelrasternetz mit einer bestimmten Winkelauflösung um die Schallquelle herum Mikrofone platziert werden und eine Messung eines Anregesignals der Schallquelle mit diesen Mikrofonen durchgeführt wird [12]. Eine derartige Messung des Abstrahlverhaltens beziehungsweise der Richtcharakteristik für alle Musikinstrumente eines Symphonieorchesters wurde in einem Gemeinschaftsprojekt der TU Berlin (Fachgebiet Audiokommunikation und -technologie) und der RWTH Aachen (Institut für technische Akustik) durchgeführt [21]. Insgesamt wurde die Richtcharakteristik für zweiundvierzig (42) Instrumente, sowohl für moderne, als auch für historische Musikinstrumente, gemessen. Bei dieser Messung kam ein Mikrofon-Kugel-Array bestehend aus zweiunddreirßig (32) Mikrofonen, welches am Institut für technische Akustik der RWTH Aachen entwickelt wurde, zum Einsatz. Die Messung fand im reflexionsarmen Raum der TU Berlin statt, so dass im Freifeld gemessen wurde. Jeder Musiker nahm bei der Messung eine natürliche Spielhaltung des jeweiligen Instruments ein. Für das nachhallfreie Quellsignal wurde das sich in Frontalrichtung zum Musiker befindliche Mikrofon als Referenzpunkt gewählt. Da jedoch bei vielen Instrumenten in manchen Frequenzbändern nur wenig Energie genau nach vorne in Richtung des Referenzmikrofons abgestrahlt wird, und somit bei diesen Instrumenten die Referenzierung des Frontalmikrofons in der Auralisation

zu unschönen Effekten führen kann, wurde eine Referenzierung des Balloondatensatzes so vorgenommen, dass die diffus abgestrahlte Energie frequenzkonstant normiert ist (Diffusfeld-entzerrte-Balloondaten). In den Abbildungen 2.1 und 2.2 ist die diffusfeld-entzerrte Abstrahlcharakteristik einer Klarinette in Form von Balloondaten exemplarisch für eine Frequenz von 1250 Hz (siehe Abbildung 2.1) und für eine Frequenz von 5000 Hz (siehe Abbildung 2.2) jeweils aus einer Frontal- und einer Seitenansicht dargestellt. Betrachtet man die Balloondaten für eine Frequenz von 1250 Hz, so fällt auf, dass die Maximalrichtung der Klarinette für diesen mittleren Frequenzbereich im Raum gegenüber der Horizontalen leicht aufwärts beziehungsweise abwärts geneigt ist. Betrachtet man hingegen die Abstrahlcharakteristik der Klarinette im hohen Frequenzbereich (siehe Abbildung 2.2) so lässt sich in den Ballondaten für eine Frequenz von 5000 Hz eine starke Bündelung der Hauptabstrahung in Richtung der Instrumentenachse ablesen. Auch der Einfluss der Abschattung des abgestrahlten Schalls durch den Musiker selbst, der bei Rohrblattinstrumenten am größten ist, lässt sich in der Seitenansicht von Abbildung 2.2 gut erkennen.

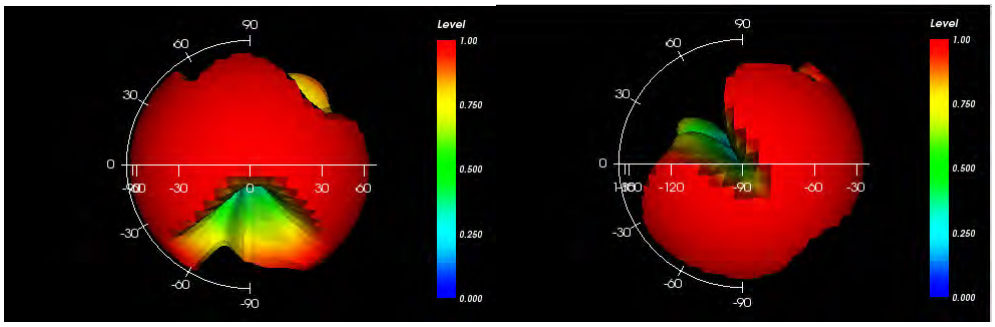

Abbildung 2.1: Abstrahlcharakteristik einer Klarinette bei einer Frequenz von 1250 Hz - links: Fontalansicht, rechts: Seitenansicht.

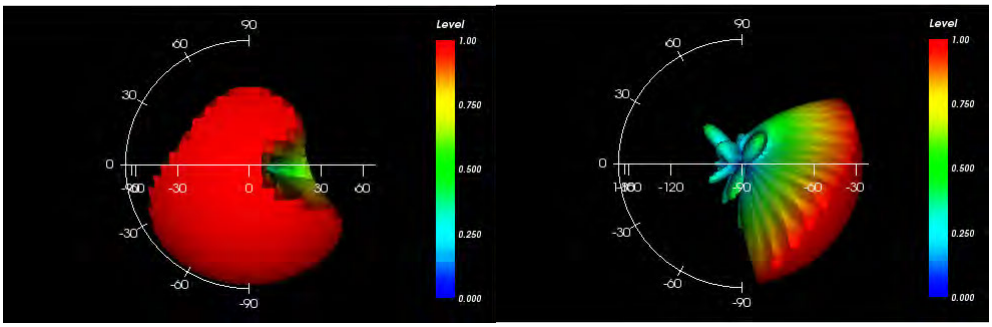

Abbildung 2.2: Abstrahlcharakteristik einer Klarinette bei einer Frequenz von 5000 Hz - links: Fontalansicht, rechts: Seitenansicht.

2.3 Prinzip der Auralisation

Raumakustische Simulationsverfahren haben unter anderem zum Ziel, akustische Parameter wie beispielsweise die Nachhallzeit, die Verteilung des Schalldruckpegels im Raum, das Klarheitsmaß oder den Sprachverständlichkeitsindex (STI) in einem Computermodel vorherzusagen [1]. Insbesondere versteht man unter raumakustischer Simulation eine physikbasierte Simulation der Schallausbreitung in einer virtuellen Umgebung mit möglichst realistischem Verhalten. Ist ein 3D-Raummodell am Computer erstellt, so ermöglicht das Verfahren der Auralisation des Weiteren eine Hörbarmachung der virtuellen akustischen Szene für eine vordefinierte Schallquellen- und Empfängerposition. Hierbei wird vorausgesetzt, dass das gesamte Schallübertragungssystem von der Schallquelle hin zu dem Empfänger einem linearen und zeitinvarianten System (LTI-System) entspricht, das durch die sogenannte Impulsantwort charakterisiert werden kann [20]. Ein LTI-System lässt sich im Zeitbereich mit Formel 2.2 beziehungsweise im Frequenzbereich mit Formel 2.3 beschreiben. Sind die Impulsantwort *h(t)* und das Eingangssignal *s(t)* bekannt, so kann das Ausgangssignal *g(t)* nach Formel 2.2 berechnet werden.

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau)h(t-\tau)d\tau = s(t) * h(t) \tag{2.2}$$

$$\underline{G}(f) = \underline{S}(f) \cdot \underline{H}(f) \tag{2.3}$$

In Formel 2.3 stellt $\underline{H}(f)$ die sogenannte Übertragungsfunktion des Systems dar und beschreibt die binaurale Übertragungsfunktion des Raumes. $\underline{S}(f)$ entspricht dem trockenen Eingangssignal im Frequenzbereich und $\underline{G}(f)$ gleicht dem modifizierten Eingangssignal am Trommelfell des Zuhörers. Die binaurale Raumübertragungsfunktion kann als aus einer Vielzahl von Übertragungsfunktion verschiedenener LTI-sub-Sytemen bestehend angesehen werden. Eine Beschreibung der Quelle fließt über die Richtcharakteristik der Quelle beziehungsweise deren Übertragungsfunktion mit ein. Die Impulsantwort des Raumes wird durch die Raumgeometrie beziehungsweise durch alle Bauteile oder Konstruktionselemente im Raum und deren Absorptionsverhalten, sowie von der Übertragungsfunktion, welche die Luftabsorbtion im Raum beschreibt, bestimmt. Ein Empfänger kann durch eine binaurale kopfbezogene Übertragungsfunktion beschrieben werden. Ist nun die aus vielen Sub-Systemen bestehende binaurale Raumübertragungsfunktionen bekannt, so lässt sich diese in den Zeitbereich zu der binauralen Raumimpulsantwort transformieren und mit einem trockenen Eingangssignal falten. Ist die binaurale Raumimpulsantwort exakt,

so wird das Ausgangssignal identisch zur Realität klingen [24]. In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Verfahren zur Berechnung von Impulsantworten bei simulierter Schallabstrahlung aus dem Bereich der geometrischen Akustik beschrieben. Im Speziellen wird die Spiegelshallquellenmethode und die Strahlenverfolgung vorgestellt.

2.3.1 Spiegelschallquellenmethode (Image Source Model)

Die Spiegelschallquellenethode ist das bekanntestes Verfahren zur Berechnung von Impulsantworten bei simulierter Schallabstrahlung und gilt als exakte und deterministische Methode. Für eine feste Empfänger- und Quellenpositionen werden hierbei alle Reflexionen an den Raumbegrenzungsflächen durch sogenannte Spiegelschallquellen nachgeahmt. Die Konstellation "Quelle - Raumoberfläche - Empfänger" wird also zurückgeführt auf die Konstellation "Quelle - Spiegelschallquelle - Empfänger". Nach dem einfachen geometrischen Prinzip "Einfallswinkel = Ausfallswinkel" werden in dieser Mehode also zunächst rekursiv sämtliche Spiegelschallquellen bis zu einer bestimmten Ordnung (Anzahl an verfolgten Reflexionen) ermittelt, diffuse Reflexionen oder Streuung an Oberflächen im Raum werden in der klassischen Spiegelschallquellenmethode nicht betrachtet. Die Schallimmission einer Spiegelschallquelle kann anschließend auf direktem Wege von dieser Quelle zu dem Zuhörer wie im Freifeld berechnet werden, wobei meist die Annahme getätigt wird, dass die Spiegelschallquelle einer Punktquelle mit einem Schalldruckpegel nach dem Abstandsgesetz von $1/r^2$ gleicht [25]. Die Rechenzeit zur Bestimmung der Spiegelschallquellen ist dabei proportional zu N^i wobei N der Anzahl an Wandflächen und i der Ordnung entspricht. Mit zunehmender Anzahl an Wandflächen und Ordnung nimmt die Rechenzeit also exponentiell zu, so dass die Spiegelschallquellenmethode als sehr rechenintensiv angesehen werden kann [1]. Neben der Ermittlung der Spiegelschallquellen intensiviert des Weiteren die Überprüfung, ob eine Spiegelschallquelle am Empfangsort überhaupt hörbar ist, die Rechenzeit. Beispielsweise könnte es sein, dass zwischen einer Spiegelschallquelle und der Empfängerposition eine weitere, nicht an der Spiegelung beteiligte Wand liegt, die den Schalleinfall beim Zuhörer unterbricht. Es müssen alle konstruierten Spiegelschallquellen (einer jeden Ordnung) auf "Sichtbarkeit" vom Empfängerort aus überprüft werden, da es ebenso sein kann, dass eine von der Empfängerposition aus unsichtbare Spiegelschallquelle eine Spiegelschallquelle als "Nachkommen" hat, welche wiederum sichtbar ist. Wurden alle Spiegelschallquellen bis zu einer bestimmten Ordnung ermittelt und auf Hörbarkeit am Empfängerort überprüft, so erhält man die Raumimpulsanwort recht einfach. Eine jede Reflexion einer bestimmten Ordnung entspricht einer Dirac-Funktion, die um die Laufzeit von der Spiegelschallquelle hin zu der Hörerposition verzögert ist und durch die Wandabsorption bei den Reflexionen sowie der Luftabsorption, welche wiederum

von der Distanz zwischen Spiegelschallquelle und Hörer beeinflusst wird, gedämpft wird. Wenn zusätzlich Informationen zur Richtcharakteristik der Schallquelle sowie des Empfängers vorliegen, so kann diese Information ebenso in die Berechnung der Raumimpulsantwort miteinfließen [24]. Die Spiegelschallquellenmethode gilt als exakte, jedoch ineffiziente Methode.

2.3.2 Strahlverfolgung (Ray Tracing)

Bei dem Verfahren der Strahlenverfolgung wird die Ausbreitung eines Impulses einer Schallquelle durch Schallteilchen oder Strahlen nachgeahmt, welche auf der Oberfäche der Quelle möglichst gleichmäßig verteilt sind und in alle Raumrichtung möglichst gleichmässig ausgestossen werden. Jeder dieser Strahlen erhält zu Beginn eine gewisse Menge an Energie und wird mit Schallgeschwindigkeit, die von der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit sowie von dem Luftdruck im Raum leicht verändert wird, entsendet. Eine Richtwirkung der Schallquelle kann durch die Definition unterschiedlicher Energiezustände eines Strahls zu Beginn und durch eine gezielte Variation der Abstrahldichte in bestimmte Richtungen simuliert werden [25]. Während sich ein Strahl ausbreitet verliert dieser aufgrund von Luftabsorption sowie Reflexionen an den Begrenzungsflächen Energie. Im Gegensatz zu der Spiegelschallquellenmethode können bei der Strahlenverfolgung neben der geometrischen Reflexion auch diffuse Reflexionen verfolgt werden. Der Energieverlust eines Strahls wird hier von den materialabhängigen Absorptions- beziehungsweise Streugraden der Oberfläche bestimmt. Die diffuse Reflexion wird bei der Strahlenverfolgung als perfekt diffus interpretiert und mit der Wahrscheinlichkeitsverteilung nach dem Lambertschen Gesetz berechnet. Demnach ist die Intensität eines diffus reflektierten Schallteilchens unabhängig von dem Einfallswinkel des Strahls. Die Wahrscheinlichkeitsdichte des Ausfallwinkels δ auf den Raumwinkel bezogen ist proportional zu $cos\delta$ [24]. Jeder Strahl oder jedes Schallteilchen wird solange verfolgt, bis eine vorgegebene Simulationsdauer überschritten ist oder ein Grenzwert für das Minimum an Energie eines Schallteilchens unterschritten wird. Bei der Strahlenverfolgung entsprechen die Empfänger sogenannten Detektoren, die entweder ein Volumen oder eine Oberfläche darstellen. Typische Formen von Detektoren sind die Kugel, der Zylinder oder eine einfache Fläche. Wann immer ein Schallteilchen einen Detektor trifft, wird dessen Energie, der Einfallswinkel sowie die Laufzeit in ein Schallteilchen-Histogramm gespeichert, welches als die Hüllkurve der Energie der Raumimpulsantwort interpretiert werden kann. Dieses Schallteilchen-Histogramm ist unterteilt in Zeitfenster der Größe Δt wobei die Größe des Fensters der zeitliche Auflösung des menschlichen Gehörs entsprechend im Bereich weniger Millisekunden liegen sollte. Da die Materialeigenschaften (Absorptions- und Streugrade), die Richtcharakteristik der Schallquelle und die Dämpfung aufgrund von Luftabsorption stark frequenzabhängig sind,

kann die Strahlenverfolgung nur für eine bestimmte Frequenz durchgeführt werden und muss somit mehrmals für die Mittenfrequenz der Oktav- oder Terzbänder wiederholt werden. Bei der Strahlenverfolgung können für einen einmalig berechneten Strahl ohne größeren Mehraufwand mehrere Detektoren beziehungsweise Empfänger eingesetzt werden, so dass dieses Verfahren im Falle mehrerer Empfänger wesentlich effizienter als die Spiegelschallquellenmethode ist. Mit Hilfe vorberechneter bandpassgefilterter Dirac-delta Sequenzen, die raumabhängig sind und zu einer Gewichtung der simulierten Hüllkurve der Energie der Raumimpulsantwort eingesetzt werden, kann eine Monaurale Raumimpulsantwort in Echtzeit berechnet werden. Die Berechnung der binauralen Raumimpulsantwort aus der simulierten Hüllkurve der Energie der Raumimpulsantwort ist etwas komplexer, da hier die kopfbezogene Impulsantwort des Empfängers mit in Betracht gezogen werden muss. Grundsätzlich entspricht hier der Detektor einer Kugel, deren Oberfläche in m diskrete, sogenannte Directivity Groups unterteilt wird. Abhängig von dem Einfallswinkel eines Strahls auf der Kugel wird die Energie dieses Strahls oder Schallteilchens in die entsprechende Directivity Group eingeteilt, so dass man m Histogramm, entsprechend der m Directivity Groups erhält (näheres zur Berechnung der Impulsantworten unter [24]). Die Rechenzeit des Verfahrens der Strahlenverfolgung setzt sich aus einem Anteil der Teilchenverfolgung und aus einem Anteil der Teilchendetektion zusammen. Die Rechenzeit der Teilchenverfolgung ist dabei proportional zu dem Produkt aus der Anzahl der entsendeten Teilchen, der Anzahl an Reflexionen sowie der Anzahl an im Modell vorhandenen Wänden. Die Rechenzeit für die Detektion der Teilchen ist proportional zu der Anzahl an Empfängern. Eine erhöhte Menge an ausgesendeten Strahlen oder Schallteilchen erhöht die Genauigkeit, hat jedoch eine erhöhte Berechnungsdauer zur Folge. Nichtsdestotrotz ist die Rechenzeit bei diesem Verfahren proportional und nicht exponentiell zu der Anzahl an Wänden, wie es bei der Spiegelquellenmethode der Fall ist [25]. Im Bereich der Strahlenverfolgung kann zwischen verschieden Methoden, die dieses Verfahren umsetzen, unterschieden werden. So kann das Cone Tracing sowie das Pyramid Tracing als spezielle Methoden der Strahlenverfogung genannt werden, bei denen eine Bindung der Strahlen jeweils zu einem Konus beziehungsweise zu einer Pyramide zu einer schnelleren Verfolgung der Strahlen führt [1].

2.3.3 Hybride Verfahren

Unter einem Hybriden Verfahren versteht man eine Kombination der Vorteile der Spiegelschallquellenmethode (exakte Ergebnisse) und des Verfahrens der Strahlenverfolgung (effizient, diffuse Reflexionen möglich). So wird das Ray Tracing verwendet, um die sichtbaren Spiegelschallquellen zu finden. Die Rechenzeit wird dadurch drastisch vermindert. Die Spiegelschallquellenmethode wird bis zu einer bestimmten

Ordnung, die noch im Rahmen einer ausreichend kurzen Rechenzeit liegt, ausgeführt und eine entsprechende Raumimpulsantwort, welche, aufgrund der geringen Ordnung, den Direktanteil beziehungsweise den Direktschall repräsentiert, berechnet. In diesem Bereich muss die Strahlenverfolgung nur für diejenigen Reflexionen, die rein diffus sind oder geometrisch sind, jedoch eine diffuse Vergangenheit haben, verwendet werden. Alle rein geometrischen Reflexionen bis zu einer bestimmten Ordnung werden also durch die Spiegelschallquellenmethode abgedeckt. Ist diese Reflexionsordnung überschritten, so werden alle weiteren Berechnungen durch das Verfahren der Strahlenverfolgung durchgeführt. Die durch die Strahlenverfolgung berechnete Raumimpulsantwort enthält also alle Reflexionen, welche diffus sind oder eine diffuse Vergangenheit haben sowie all diejenigen Reflexionen, die die Ordnung der Spiegelschallquellenmethode überschreiten. Um die Raumimpulsantwort des hybriden Verfahrens zu erhalten, können die durch das Spiegelschallquellenmodell und durch die Strahlenverfolgung berechneten Raumimpulsantworten einfach addiert werden. Die Raumimpulsantwort des hybriden Verfahrens wird also aus verschiedenen Teilen aufgebaut, einem frühen Teil mit einer raschen Berechnung der Spiegelschallquellen und dem Nachhallschwanz aus den Ergebnissen der Strahlenverfolgung [24].

3 Methode

In diesem Kapitel werden zunächst zwei verschiedene Tracking-Verfahren vorgestellt sowie Vor- und Nachteile dieser Ansätze erläutert. Anschließend wird das zur Messung der Bewegungsdaten der Instrumente verwendete Motion Capture System vorgestellt. In Abschnitt 3.2 wird die Messung der Position und Orientierung der Musikinstrumente bei einem Live-Auftritt im Curt-Sachs-Saal des Musikinstrumentenmuseums in Berlin beschrieben (siehe Anhang A).

3.1 Auswahl des Motion Tracking Systems

Unter Motion Capture beziehungsweise Bewegungserfassung versteht man ein Tracking-Verfahren, also ein Verfahren der Verfolgung von bewegten Objekten, welches es ermöglicht sowohl die Position, als auch die Orientierung eines Objekts im physikalischen Raum zu messen und in ein am Computer lesbaren Format aufzuzeichnen. Grundsätzlich kann man zwischen zwei Hauptverfahren der Bewegungserfassung unterscheiden, die zur Umsetzung des Projekts in Frage kommen: Die optische und die elektro-magnetische Bewegungserfassung [11].

3.1.1 Vergleich des optischen und des elektromagnetischen Trackings

Beim optischen Tracking werden sogenannte Marker, welche an dem zu erfassenden Objekt oder der zu erfassenden Person angebracht werden, von Kameras verfolgt. Hierbei wird zwischen aktiven Markern und passiven Markern unterschieden: Aktive Marker emmitieren Energie, die von einem Sensor detektiert wird, bei passiven Markern hingegen wird von den Kameras selbst Energie emittiert, welche von den Markern reflektiert und durch den Sensor aufgenommen wird. In beiden Fällen wird die dreidimensionale Information über die Markerposition durch den Prozess der Triangulation berechnet. Wenn die Position und die Orientierung der beim Tracking verwendeten Kameras bekannt ist, so können die dreidimensionalen Koordinaten der Marker berechnet werden, sofern die relative Position der Marker gegenüber mehreren (mindedstens zwei) Kameras bekannt ist [3]. Triangulation beschreibt hierbei also den Prozess dreidimensionale Welt-Koordinaten eines Objekts (Markers) aus den zweidimensionalen Ansichten mehrerer Kameras zu bestimmen. Wie in Abbildung 3.1 zu sehen, können die dreidimensionalen Koordinaten eines Punktes P durch Berechnung des Schnittpunkts zweier Vektoren ermittelt werden.

Da beim optischen Tracking die Marker kabellos sind, können sich die Versuchspersonen frei bewegen. Ein weiterer Vorteil des optischen Verfahrens liegt darin, eine Vielzahl von Markern und somit mehrere Personen oder Objekte gleichzeitig verfolgen zu können. Je nach Anzahl der Kameras und je nach Kameratyp kann beim optischen Tracking ein großes Volumen abgedeckt werden. Die Bewegungsdaten, die beim optischen Tracking gesammelt werden, gelten als detailliert. Als ein Nachteil des optischen Trackings kann die Anfälligkeit für Lichtinterferenzen genannt werden. Zusätzlich müssen bei dem optischen Verfahren die Marker immer im Blickfeld von mindestens zwei Kameras liegen, um die Auflösung der Position mittels Triangulation zu gewährleisten. Werden also Marker durch den Aufführenden selbst oder durch Objekte verdeckt, so können für diesen Zeitraum keine Daten aufgezeichnet werden [11].

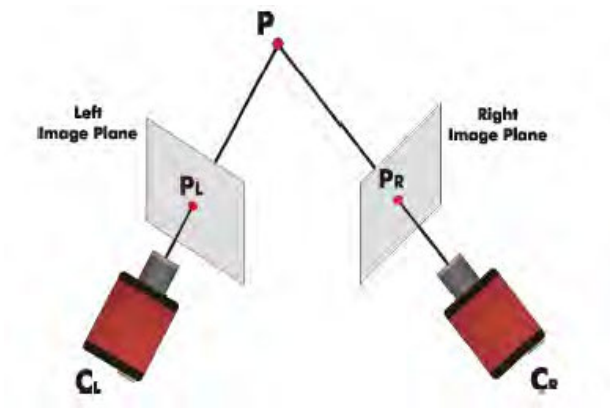

Abbildung 3.1: Triangulation - Berechnung der 3D Koordinaten des Punktes P durch Berechnung des Schnittpunkts der Vektoren *(pl - Cl)* und *(pr - Cl)* [3].

Elektromagnetische Trackingverfahren basieren auf dem Prinzip der magnetischen Induktion: Wird ein zu einer Spule aufgewickelter Draht in einem magnetischen Feld bewegt, so wird in der Spule eine elektrische Spannung fließen. Dabei ist die Größe der induzierten Spannung proportional zur Distanz zwischen der Quelle des magnetischen Feldes und der Spule. Beim magnetischen Tracking wird ein Sender verwendet, welcher drei orthogonale (den Raumkoordinaten entsprechende) magnetische Felder erzeugt. Als Marker wird hierbei ein Sensor eingesetzt, der wiederum aus drei orthogonal zu einander stehenden Spulen besteht. Hierdurch kann sowohl die Position, als auch die Orientierung des Sensors verlässlich aufgezeichnet werden [3]. Beim elektromagnetischen Tracking spielt die Verdeckung von Markern keine Rolle. Die verfolgten Sensoren müssen nicht im Blickfeld von Kameras, sondern nur in dem Sendebereich des magnetischen Transmitters liegen. Bei diesem Verfahren tritt also kein Datenverlust aufgrund von Verdeckung auf. Als weiterer Vorteil kann der im Vergleich zu optischen Systemen geringere Preis genannt werden. Der größte

Nachteil des elektromagnetischen Trackings liegt in der Anfälligkeit für Interferenzen von anderen magnetischen Feldern. Die Anwesendheit von metallischen Oberflächen oder Objekten, sowie Computer Monitoren, Verkabelungen und Ähnlichem kann beim Einsatz eines elektromagnetischen Tracking-Systems also zu verrauschten beziehungsweise verfälschten Bewegungsdaten führen. Vigliensoni und Wanderley haben in einer Studie verschiedene Trackingsysteme hinsichtlich von Parametern wie beispielsweise statische Genauigkeit und Präzision sowie update-Rate miteinander verglichen [26]. Auch hier ist auffällig, dass das elektromagnetische Tracking-System von magnetischen Interferrenzen beeinlusst wird und nur bei dem optischen Verfahren genaue Ergebnisse erzielt werden. Zusätzlich wurde festgestellt, dass bei dem elektromagnetischen Tacking-Verfahren mit zunehmender Distanz des magnetischen Senders zu dem magnetischen Sensor die Genauigkeit der Positionserfassung abnimmt.

3.1.2 Vorstellung des Bewegungserfassunssystems - OptiTrack

Nach Rücksprache mit dem Fachbereich Audiokommunikation und -technologie wurde der Entschluss getroffen ein optisches Bewegungserfassungsystem zur Durchführung der Studie zu verwenden. Das optische Motion Capture Sysem kann an jedem Ort eingesetzt werden, da es nicht von magnetischen Interferenzen gestört wird und bietet im Vergleich zum magnetischen Tracking gleichzeitig eine erhöhte Präzision. Des Weiteren ist das Volumen, in dem die Bewegungen erfasst werden können beim optischen Tracking größer, ebenso kann dieses System durch den Zukauf weiterer Kameras in Zukunft erweitert werden. Auch die Tatsache, dass beim optischen Tracking eine Vielzahl von Markern verfolgt werden kann, erweitert das Einsatzgebiet des Trackingsystems für zukünftige Projekte am Fachbereich.
Im speziellen wurde ein optisches Trackingsystem (OptiTrack) der Firma Naturalpoint eingesetzt. Dieses System umfasst acht (8) Kameras (Flex 13), welche mit einem LED Ring bestehend aus 28 LEDs ausgestattet sind und Infrarotstrahlen im Bereich von 850 nm sowohl kontinuierlich, als auch durch regelmäßig wiederholte Impulse ausstrahlen kann. Es kommen passive Marker zum Einsatz, die die von den aktiven Kameras emittierte Energie reflektieren. In Abbildung 3.2 ist eine Flex13-Kamera dargestellt. Diese Kamera bietet eine Auflösung von 1.3 Megapixel (1280 x 1024) bei einer Frame Rate von 120 Frames pro Sekunde und einer daraus resultierenden Latenz von 8,33 Millisekunden. Die Aufnahme der Positionsdaten erfolgt mit einer räumliche Auflösung von in etwa 1 mm. Das Hardwaresystem wird komplettiert durch zwei 6-port USB-Hubs (Optihub 2S) und entsprechender Verkabelung, die die Verbindung zwischen den Kameras und dem bei der Messung verwendeten Computer gewährleisten.

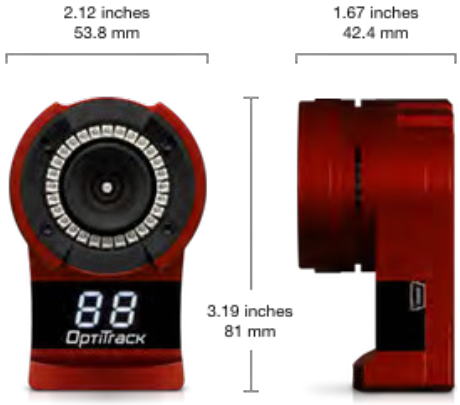

Abbildung 3.2: Kamera des Tracking-Systems (siehe Anhang A)

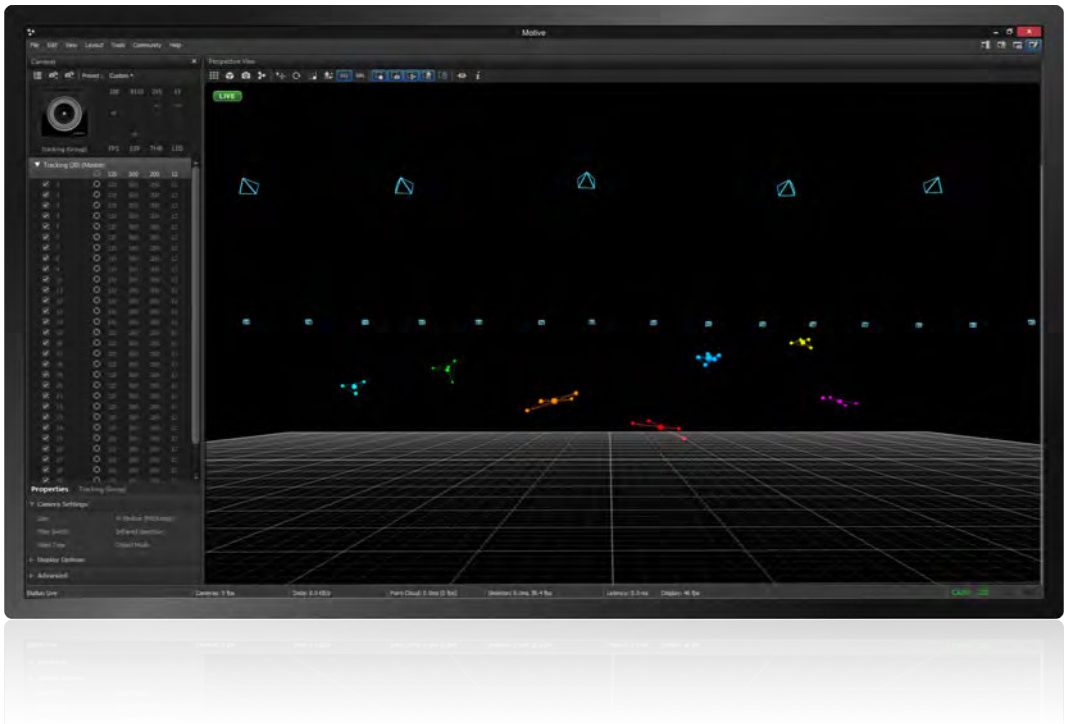

Abbildung 3.3: Software Motive:Tracker (siehe Anhang A)

Die Software Motive Tracker ermöglicht es die 3D-Koordinaten der Marker, sowie sechs Freiheitsgrade eines sogenannten Rigid Bodies, einem Verbund bestehend aus mindestens drei Markern, aufzuzeichnen und diese Daten optional als CSV-Datei zu exportieren. In Abbildung 3.3 ist ein Bildschirmfoto der Messsoftware dargestellt. Um eine Anpassung an die Lichtverhältnisse am Messort durchzuführen, können in der Messsoftware verschiedenen Parameter jusiert werden: Die Anzahl an Frames, die pro Sekunde aufgezeichnet werden, Exposure (Zeitdauer in der die Blende der Kamera geöffnet ist), Threshold (minimale Helligkeit, die ein Marker einnehmen muss, bevor dieser von der Kamera als potentiell gültiger Marker angesehen wird) und LED (Anzahl an aktiven LEDs). Dieses Trackingsystem kann durch den Zukauf weiterer Kameras künftig erweitert werden. Ebenso kann das Blickfeld (Field of View) einer Kamera durch einen Austausch der Linse variiert werden.

3.2 Messung der Bewegungsdaten und Audioaufnahme der Orchesterinstrumente

In diesem Kapitel wird die Messung der Bewegungsdaten sowie die Audioaufahme der elf klassischen Orchesterinstrumente beschrieben.

3.2.1 Messaufbau

Die Messung der Spielbewegung der klassischen Orchesterinstrumente sollte unter möglichst realistischen, also konzertähnlichen Rahmenbedingungen stattfinden. Zu diesem Zweck wurde die Messung im Curt-Sachs-Saal des Musikinstrumentenmuseums in Berlin durchgeführt (siehe Anhang A). Dieser Konzertsaal bietet Platz für 198 Personen und hat eine Nachhallzeit von etwa 1.2 Sekunden. Die Messung im Curt-Sachs-Saal wurde mit einer Videokamera, die im hinteren Publikumsbereich des Konzertsaals positioniert wurde, dokumentiert. Sofern von dem Musiker erwünscht wurde ein Notenständer auf der Bühne platziert. Da ein Musiker den Messtermin krankheitsbedingt absagen musste wurde diese Messung verschoben und an der Technischen Universität Berlin in der sogenannten Cave im Hauptgebäude vollzogen.

3.2.1.1 Audioaufnahme

Die Audioaufnahme im Curt-Sachs-Saal wurde mit einem professionellen Miniatur-Kondensator-Mikrofon mit kugelförmiger Richtcharakteristik, dem AKG C417, durchgeführt, welches vom Musikinstrumentenmuseum zur Verfügung gestellt wurde (sie-

he Anhang A). Für die Messung an der TU Berlin kam das Sennheiser MKE1 Mikrofon zum Einsatz (siehe Anhang A). Das Mikrofon wurde mit einem geringen Abstand direkt am Instrument befestigt und in Richtung des akustischen Zentrums des Instruments ausgerichtet. Je nach Instrument kamen verschiedene Mikrofonhalterungen der Firma DPA zum Einsatz (Klipp für das Cello, Klipp für die Trompete, Klipp für die Violine, Universal-Klipp) (siehe Anhang A). Das Mikrofon selbst wurde mit einem Klebestreifen an einer Halterung angebracht, die wiederum an dem entsprechenden DPA-Klipp mit einer Klemme befestigt wurde. In Abbildung 3.4 ist das AKG-Mikrofon, ein DPA-Klipp und die Mikrofonhalterung exemplarisch für die Posaune dargestellt. Das Mikofonkabel wurde bei jedem Instrument so verlegt, dass es den Musiker nicht in seinen Bewegung eingeschränkt oder beeinflusst hat. Die Schnittstelle zwischen Computer und Mikrofon bildete das USB-Audio-Interface Scarlett 8i6 der Firma Focusrite (siehe Anhang A). Hierbei wurde der dreipolige XLR-Stecker des Mikrofons mit dem ersten Mikrofoneingang der Audio Schnittstelle verbunden und die Phantomspeisung aktiviert. Das Audio-Interface wurde über ein USB-Kabel an einem Laptop (Macbook 13-inch, late 2009) angeschlossen. Zur Audioaufnahme wurde an dem Computer der freie Audioeditor und -rekorder Audacity verwendet (siehe Anhang A).

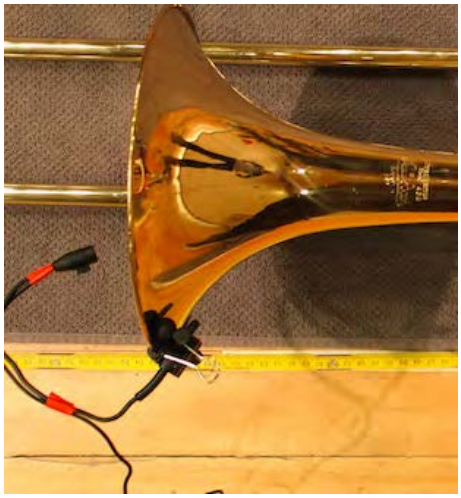

Abbildung 3.4: AKG C417, DPA Klipp und Mikrofonhalterung exempalrisch für die Posaune.

Durch den geringen Abstand des Mikrofons zu dem Musikinstrument und die niedrige Nachhallzeit des Konzertsaals (1.2 Sekunden) wurde ein von der Raumakustik wenig beeinflusstes Audiosignal aufgezeichnet. Da das Mikrofon direkt am Instrument befestig wurde, und dieses einen durchgehend gleichbleibenden Abstand und eine unveränderte Orientierung zum Instrument aufwies, kann das aufgenommene

Audiosignal als nahezu nachhallfrei und unbewegt im Sinne der Auralisation angesehen werden.

3.2.1.2 Aufnahme der Bewegungsdaten

Ein reflektierender Marker wird dann erkannt und korrekt verfolgt, wenn er im Blickfeld von mindestens zwei Kameras des Motion-Capture-Systems liegt. Zur Messung der Spielbewegung im Curt-Sachs-Saal wurden acht (8) Kameras so positioniert, dass ein großer Bereich, in dem sich der Musiker hätte aufhalten können von mindestens zwei Kameras abgedeckt wurde. Hierzu wurden zwei Taversensysteme der Firma Millenium bestehend aus vier Stativen und drei Quertraversen aufgebaut. Zur Befestigung der Kameras an dem Traversensystem wurden Rohrklemmen der Firma Manfrotto verwendet. Ein schwenkbarer Stativkopf der Firma Walimex wurde unter Verwendung eines Kamera-Zapfens an der Rohrklemme befestigt. Letztendlich konnten die Kameras auf die schwenkbaren Stativköpfe aufgeschraubt und dem Tracking-Bereich entsprechend ausgerichtet werden. Dabei wurden zwei Kameras des Bewegungserfassungssystems direkt an einem Stativ und die restlichen Kameras an den Quertraversen befestigt. Je vier Kameras wurden über ein USB-Kabel mit den zwei USB-Hubs des Motion-Capture-Systems verbunden. Zwischen den USB-Hubs und einem Laptop der Firma Lenovo, an welchem die Tracking-Software Motive:Tracker ausgeführt wurde, wurde ebenfalls eine Verbindung durch ein USB-Kabel hergestellt. In Abbildung 3.5 ist der Messaufbau im Curt-Sachs-Saal vom Publikum aus zu sehen.
Eine letzte Messung eines Kontrabassisten wurde im Hauptgebäude der Technischen Universität Berlin durchgeführt nachdem der Musiker den ursprünglichen Termin im Curt-Sachs-Saal krankheitsbedingt absagen musste. Da davon auszugehen war, dass der Bewegungsspielraum des Kontrabass vergleichsweise klein ist, wurde hier darauf verzichtet, das gesamte Traversensystem aufzubauen. So wurden wie in Abbildung 3.6 zu sehen zwei Stative aufgestellt, an die jeweils drei Kameras angebracht wurden.

3.2.2 Versuchspersonen

Da es in dieser Arbeit um die Bewegungen von Solo-Musikern geht und die Audioaufnahmen als Grundlage für Auralisationen mit anschließenden Hörversuchen verwendet werden, wurden Versuchspersonen eingeladen, welche fortgeschrittene Studierende im Hauptfach oder bereits ausgebildete Profimusiker sind. Insgesamt nahmen 20 Musiker (11 m, 9 w) an der Messreihe teil: Je zwei Vertreter für Violine, Viola, Violoncello, Querflöte, Oboe, Klarinette, Fagott, Horn, und Trompete. Für die

Abbildung 3.5: Messaufbau im Curt-Sachs-Saal.

Abbildung 3.6: Messaufbau im Hauptgebäude der Technischen Universität Berlin.

Posaune und für den Kontrabass gab es jeweils eine Versuchsperson. Zehn Versuchsteilnehmer wurden durch eine Musikagentur aus Berlin vermittelt. Die restlichen Teilnehmer wurden direkt engagiert.

3.2.3 Versuchsdurchführung

Im Folgenden wird die Versuchsdurchführung der Messung der Spielbewegung beschrieben. Die Messreihen im Curt-Sachs-Saal fand über einen Zeitraum von sechs Tagen statt. Am ersten Tag wurde das Messsystem wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben aufgebaut.

3.2.3.1 Kalibrierung des Kamerasystems

Zu Beginn eines jeden Messtages wurde das Kamerasystem neu kalibriert, damit sichergestellt wurde, dass das Motion Capture System korrekte Werte aufzeichnet und nicht durch eine Verschiebung oder Bewegung der Kameras fehlerhafte Daten liefert. Der Prozess der Kalibrierung des Motion Capture Systems OptiTrack von Naturalpoint konnte dabei in zwei Teilprozesse unterteilt werden. Zunächst musste ein Vorgang namens Wanding durchgeführt werden. Hierbei wurde ein Kalibrierungs-Staab, an dessen Ende sich drei (3) reflektierende Marker befanden, im Sichtbereich der Kameras bewegt. Bei diesem Vorgang wurden Werte aufgezeichnet, die zur Berechnung der Triangulationen (siehe Abschnitt 3.1.1) dienten. In der Software Motive:Tracker konnte der Fortschritt an abgetasteten Werten beobachtet werden.

Des Weiteren lieferte die Software eine Rückmeldung, sobald genügend Werte (ca. 10000) erfasst wurden. In einem zweiten Prozess wurde die Triangulation der abgetasteten Werte in der Software durchgeführt. Die Software führte eine Optimierung des Tracking-Volumens durch und erstellte eine Kalibrierungs-Datei (.cal), welche lokal gespeichert wurde und zu einem späteren Zeitpunkt wieder abgerufen werden konnte. Der Vorgang der Kalibrierung wurde durch die Definition eines Nullpunktes für das Koordinatensystem der Bewegungsdaten mit Hilfe der sogenannten „Calibration Square“(siehe Abbildung 3.7) abgeschlossen. Diese Vorrichtung zur Definition des Koordinatensystems wurde in etwa mittag auf der Bühne platziert und der Software kenntlich gemacht. Um das erstellte Koordinatensystem auch später identifizieren zu können, wurde die Lage der Calibration Square, insbesondere der definierte Nullpunkt sowie die x-Achse und die z-Achse mit Hilfe eines Klebestreifens am Boden makiert. Das Koordinatensystem wurde so festgelegt, dass die negative z-Achse von der Bühne aus nach vorne in Richtung des Publikums sah, die x-Achse sah nach rechts und die y-Achse zeigte nach oben. Insgesamt dauerte der Vorgang der Kalibrierung in etwa 15 Minuten. Nachdem die Kalibrierung abgescholssen wurde, wurde in einem letzten Schritt eine Anpassung der in Abschnitt 3.1.2 beschriebenenen Messparameter des Kamerasystems wie Exposure und Threshold an die Lichtverhältnisse im Curt-Sachs-Saal beziehungsweise in der Cave vollzogen.

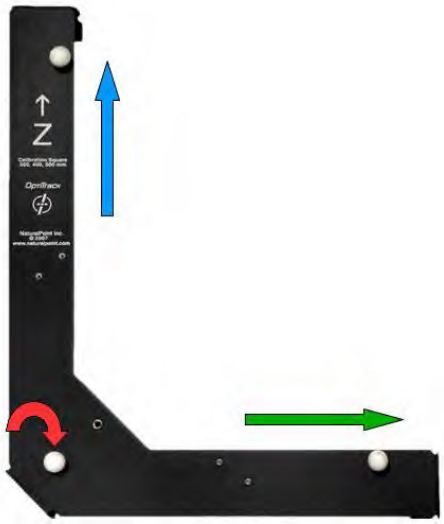

Abbildung 3.7: Calibration Square: Definition des Nullpunkts an mit rotem Pfeil gekennzeichneter Stelle. X-Richtung nach rechts (grüner Pfeil), negative Z-Richtung zum Publikum hin (blauer Pfeil), Y-Richtung nach oben.

3.2.3.2 Instruktion der Versuchspersonen

Die Musiker wurden beim Pförtner des Musikinstrumentenmuseums abgeholt und in den Curt-Sachs-Saal geführt. Zu Beginn gab es für jeden Musiker eine kurze Einführung in das Forschungsprojekt. Es wurde den Musikern mitgeteilt, dass die Position und die Orientierung ihres Instruments mit Hilfe des Kamerasystems sowie eine Audioaufnahme der Live-Performance aufgezeichnet wird und hierzu zu Beginn der Messung entsprechende Marker für das Kamerasystem sowie ein Mikrofon zur Audioaufnahme am Instrument befestigt werden. Des Weiteren wurden die Versuchspersonen darüber informiert, dass im Anschluss an diese Messung die Bewegungsdaten sowie die Audioaufnahme zur Auralaisation einer sich bewegenden Schallquelle verwendet werden und dass ein Teil des Forschungsprojekts ein Vergleich des Einflusses der Bewegung auf das Klangergebnis unter den elf (11) klassischen Orchesterinstrumenten ist. Die Musiker wurden explizit darauf hingewiesen sich so normal wie möglich zu bewegen. Hierzu wurde den Versuchspersonen ein großer Bereich auf der Bühne, in dem sich die Versuchspersonen in etwa aufhalten sollten, gezeigt. Während der Aufnahmen saß immer mindestens ein Mitarbeiter des Fachgebiets im Publikum. So wurde den Musikern mitgeteilt, den Publikumsbereich zu fokussieren und die Stücke so zu spielen, als ob Sie ein Konzert spielten. Noch vor der eigentichen Messung wurden die Musiker instruiert, je drei Stücke oder Auschnitte aus Stücken unterschiedlichen Charakters von je zwei (2) bis drei (3) Minuten Dauer vorzubereiten. Die Stücke waren frei wählbar und konnten gerne auch Ausschnitte verschiedener Sätze aus dem selben Werk sein. Die Musiker wurden darauf hingewiesen, jedes dieser Stücke zweimal zu spielen, einmal im Sitzen und einmal in Stehen. Ausnahmen bildeten hierbei das Violoncello (alle Aufnahemen im Sitzen) und der Kontrabass (alle Aufnahem im Stehen). Des Weiteren wurde den Musikern mitgeteilt, dass eine Synchronisation der Kameradaten mit der Audioaufnahme durch eine Starterklappe realisiert wird. Die Musiker wurden darauf hingewiesen, dass die Klappe vor und nach dem Spielen einmal geschlossen wird.

3.2.3.3 Vorbereitung

Nachdem das Mikrofon wie in Abschnitt 3.2.1.1 beschrieben direkt an dem Instrument angebracht wurde, musste dessen Pegel für die Audioaufnahme justiert werden. Hierzu wurde jeder Musiker jeweils darum gebeten, die in etwa lauteste Passage, welche vorrausichtlich bei der Messung gespielt werden wird, kurz anzuspielen. Gleichzeitig wurde der Pegel des Mikrofons so eingestellt, dass die Audioaufnahme einen hoch ausgesteuerten Pegel erreichte, ohne dass das Signal übersteuerte. Die Aussteuerungsreserve (Headroom) wurde auf in etwa sechs (6) bis drei (3) dB eingestellt.

In einem nächsten Schritt wurde ein sogenannter Rigid-Body, ein Verbund an reflektierenden Markern, an dem Instrument angebracht. Bei der Violine und bei der Viola bestand dieser Rigid-Body aus reflektierenden Punkten (reflective dots), welche ähnlich wie ein Klebestreifen auf ein kleines Stück Pappe aufgeklebt wurden. Dieses Stück Pappe wiederum wurde mit einer zweiten Mikrofonhalterung an der Oberfläche der Violine beziehungsweise der Viola so befestigt, dass es den Musiker beim Spielen nicht störte und gleichzeitig von den Kameras gesehen werden konnte. Da die Musiker einen sehr behutsamen Umgang mit ihrem Instrument pflegten wurde darauf verzichtet, die Marker direkt auf das Instrument zu kleben. Bei den übrigen Instrumenten bestand der Rigid-Body aus reflektierenden Kügelchen, die an einer sogenannten Marker-Base besfestigt wurden. Diese Maker-Base konnte über einen Klettverschluss an einem Klettband angeheftet werden, welches an einer geeigneten Stelle am Instrument angebracht wurde. Da die Posaune stark glänzend beziehungsweise reflektierend war wurden von dem Kamerasystem neben dem eigentlichen Rigid-Body eine vielzahl zusätzlicher Marker erkannt, welche eigentlich nicht existierten, jedoch trotzdessen von der Messsoftware verarbeitet wurden. Um die Messoftware nicht zu überlasten, wurde die Posaune mit Tüchern abgedeckt, so dass die Anzahl an zusätzlich erkannten Markern durch das Kamerasystem deutlich reduziert wurde.
Die Marker, die an den Instrumenten befestigt wurden, mussten in der Software Motive:Tracker ausgewählt und zu einem Rigid-Body definiert werden. Dies ist möglich sofern die Marker im Sichtbereich der Kameras liegen. Die Lage des Instruments (und somit des Rigid-Bodies) zum Zeitpunkt der Definition des Rigid-Bodies ist entscheidend für die spätere Interpretation der Orientierungsdaten, da diese den Rotationsursprung bestimmt. Um die Interpretation der Orientierungsdaten im Raum (Curt-Sachs-Saal) zu vereinfachen, wurde jedes Instrument zum Zeitpunkt der Definition des Rigid-Bodies in der Messsoftware an den in Abschnitt 3.7 beschriebenen Klebestreifen-Makierungen am Boden, welche dem Verlauf der x- und z-Achse des Kamerakoordinatensystems entsprachen, ausgerichtet. Des Weiteren wurde für jedes Instrument die Lage des Rigid-Bodies auf dem Instrument mit Fotos dokumentiert. Wie in Abbildung 3.8 zu sehen, wurden ebenfalls entlang der x- und z-Achse des Raumkoordinatensystems je ein Zollstock platziert, die ein Ablesen der Lage der Marker auf dem Instrument zum Zeitpunkt der Definition des Rigid-Bodies ermöglicht. In Abschnitt 3.3.7 wird erklärt, wie diese Information dazu eingesetzt werden kann, eine Translation der Position des Rigid-Bodies auf dem Instrument von der eigentlichen Position des Rigid-Bodies hin zu dem akustischen Zentrum des Instruments durchzuführen.
Eine Synchronisation der Audioaufzeichnung mit der Aufnahme der Bewegungsdaten wurde mit Hilfe einer Starterklappe realisiert. Hierbei wurden an den beiden Öffnungen der Starterklappe jeweils Marker platziert, welche wiederum zu je einem

Rigid-Body definiert wurden (siehe Abbildung 3.8). Ist der Abstand zwischen diesen beiden Rigid-Bodies minimal, so ist die Starterklappe geschlossen. Audioseitig ist dieser Zeitpunkt durch den Knall der beim Schliesßen der Klappe entsteht, in einem großen Peak erkennbar. Durch dieses Vorgehen konnte die optische Aufnahme mit der Audioaufzeichnung synchronisiert werden.

3.2.3.4 Aufnahme

Nach einer kurzen Einspielphase, der Anbringung des Mikrofons und der reflektierenden Marker am Musikinstrument, der Dokumentation der Markerpostion auf dem Instrument sowie dem Einpegeln des Mikrofons begann die eigentliche Messung. Nachdem die Musiker signalisiert haben, bereit zu sein, wurde zunächst die Audioaufnahme und daraufhin schnellstmöglich die Aufnahme der Bewegungsdaten an den beiden Notebooks gestartet. Anschließend wurde die Starterklappe für einen kurzen Zeitraum in den Sichtbereich der Kameras gebracht. Nachdem mit Blick auf die Software zur Bewegungsaufnahme überprüft wurde, ob die Marker der Starterklappe von dem Kamerasystem erkannt werden, wurde diese geschlossen. Dieser Vorgang des Schließens der Starterklappe wurde am Ende jeder Aufnahme nochmal wiederholt, um sicherzustellen, dass die beiden Aufnahmen synchronisiert werden können. In den Tabellen 3.1 und 3.2 kann man sehen, welche Stücke von den verschiedenen Musikern gespielt wurden. In den Abbildungen 3.9 und 3.10 sind exemplarisch verschiedene Musiker während einer Aufnahme zu erkennen.

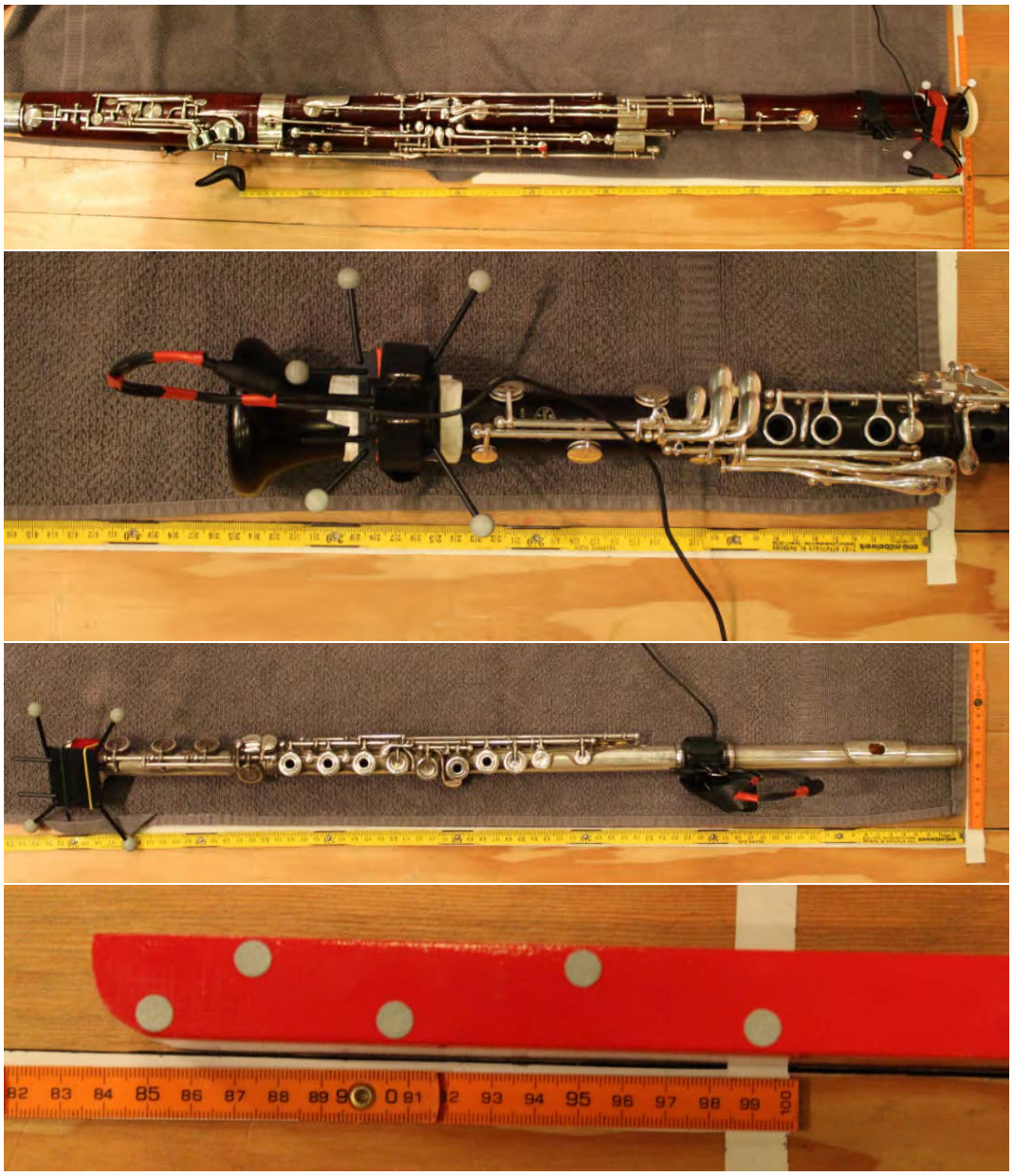

Abbildung 3.8: Dokumentation der Lage des Rigid-Bodies auf dem Instrument und auf der Starterklappe. Oben - Fagott, zweites von oben - Oboe, zweites von unten - Querflöte, unten - linke Seite der Starterklappe.

Tabelle 3.1: Darstellung der in der Messreihe gespielten Stücke.

Instrument	Stück 1	Stück 2	Stück 3
Violine 1	J.S. Bach - Sonate für Violine solo g-moll BWV 1001, 1. Satz adagio	F. Mendelssohn - Violinkonzert e-moll Op. 64, 2. Satz	F. Mendelssohn - Violinkonzert e-moll Op. 64, 3. Satz (ab schnellem Teil, allegretto)
Violine 2	Sibelius - Violinkonzert, 1. Satz	W.A. Mozart - Violinkonzert Nr. 5, 1. Satz	J.S. Bach - Solosonate Nr. 1, 1. Satz
Viola 1	I. Stravinsky - Elegie	Eleni Karaindrou - Der Blick des Odysseus	J.S. Bach - Gigue partita Viola solo
Viola 2	J.S. Bach - Suite V - Giga	Stamitz - Viola Konzert, 1.Satz	Brahms - Viola Sonata Es-Dur, 1. Satz
Violoncello 1	Paul Hindemith - Cellosonate op. 25 Nr. 3, 1. Satz	Paul Hindemith - Cellosonate op. 25 Nr. 3, 2. Satz	Paul Hindemith - Cellosonate op. 25 Nr. 3, 3. Satz
Violoncello 2	J.S. Bach - Prelude aus Cello Suite D-dur	L. Boccherini - Aus der Sonate A-dur, G.4: 1. Satz	L. Boccherini - Aus der Sonate A-dur, G.4: 2. Satz
Kontrabass 1	Karl Ditters von Dittersdorf - Konzert 2, 2. Satz	Serge Koussevitzky - Concerto No. 1, 1. Satz	J.S. Bach - Prelude, Cello Suite No. 2
Querflöte 1	Alfredo Casella - Sicilienne	A. Casella - Burlesqu	J.S. Bach - Allemande von Partita a-moll fÃ¼r Flöte solo
Querflöte 2	Claude Debussy - Syrinx	Edgar Vareses - Density 21.5	J.S. Bach - Allegro anglaise aus Partita a-moll
Oboe 1	W.A. Mozart - Oboenkonzert KV 314, 1. Satz Allegro aperto	W.A. Mozart - Oboekonzert KV 314, 2. Satz Adagio non troppo	Telemann - 12 Fantasien für Oboe Nr. 8 largo

Tabelle 3.2: Darstellung der in der Messreihe gespielten Stücke.

Instrument	Stück 1	Stück 2	Stück 3
Oboe 2	Sonate Carl Philipp Emanuel Bach g-moll	W.A. Mozart - Concerto in C-Major	V. Martini - Concerto for oboe and orchester
Klarinette 1	C. Rose - Adagio	Willson Osborn - Rhapsody	C. Rose - Etüde Nr. 1
Klarinette 2	Bela Kovacs - Hommage a Manuel De Falla	Dani Häusler - Bazooka	Dani Häusler - Pimpel da Besch
Fagott 1	Eugene Bozza - 1. Stück aus Pieces Breves	D. Shostakovich - 9. Symphonie, 4. Satz	I. Stravinsky - Firebird
Fagott 2	Bela Kovacs - Hommage a Manuel De Falla	Telemann - Andante aus 7. Fantasia a-moll	Telemann - Presto aus 9. Fantasia F-Dur
Horn 1	W.A. Mozart - 4. Hornkonzert KV 495 (Exposition 1. Satz)	R. Schumann - Adagio & Allegro (Ausschnitt aus dem Adagio)	R. Schumann: Adagio & Allegro (Ausschnitt aus dem Allegro)
Horn 2	Michael Haydn - Concerto in D,1. Satz Larghetto	Michael Haydn - Concerto in D,2. Satz allegro non troppo	Daniel Schnyder - Le monde miniscule, 2. Teil: Le petit Americain
Trompete 1	Sergei Rachmaninoff - Vocalise op. 34, Nr. 14 (1873-1943)	Jean-Baptiste Lully - Marche (1632-1687)	Otto Ketting - Intrada (1958)
Trompete 2	Hindemith - Sonate, 1. Satz	Haydn - Konzert Es-Dur, 2. Satz	Hindemith Sonate, 3. Satz
Posaune 1	F. David - Concertino Es-dur, 1. Satz	F. David - Concertino Es-dur, 2. Satz	Grøndahl - concerto for trombone

Abbildung 3.9: Musiker während der Aufnahme. Oben Fagott, unten Oboe.

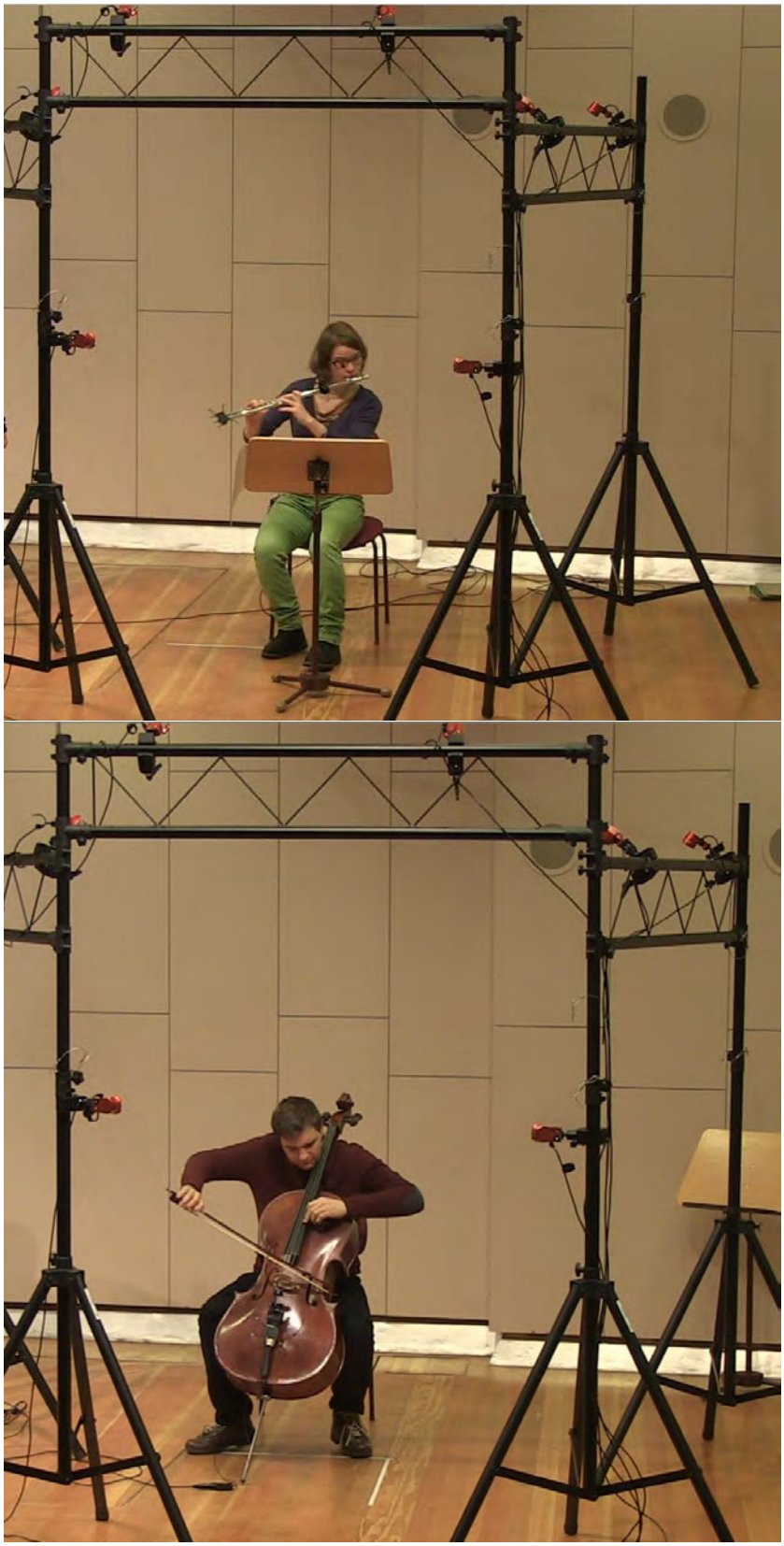

Abbildung 3.10: Musiker während der Aufnahme. Oben Querflöte, unten Violoncello.

3.3 Bearbeitung der Messdaten

In diesem Kapitel wird erklärt, wie die Messdaten in der Software Matlab (siehe Anhang A) bearbeitet wurden, um diese Daten zur Simulation in der Akustiksoftware Raven verwenden zu können. Es wird zunächst beschrieben wie die Messdaten in Matlab geladen und anschließend weiterbearbeitet wurden. Es wird gezeigt, wie die Synchronisation der Audioaufnahme mit den Bewegungsdaten realisiert wurde und welche Schritte notwendig waren, um Messfehler aus den Bewegungsdaten zu bereinigen. Am Ende des Kapitels wird die Transformation der in Euler-Winkeln vorliegenden Orientierungsdaten hin zu Richtungsvektoren, die zur Simulation in der Akustiksoftware Raven benötigt werden, beschrieben.

3.3.1 Import der Messdaten in Matlab

In der Software des Bewegungserfassungssystems Motive:Tracker können die Bewegungsaufnahmen in einer Software-eigenen Projektstruktur gespeichert werden. Es ist unter anderem möglich, die einzelnen Aufnahmen in dieser Software zu betrachten sowie Interpolationen von fehlenden Messdaten durchzuführen, die durch Verdeckung des Blickfeldes der Kameras, oder dadurch, dass sich die verfolgten Marker außerhalb des Tracking-Volumens befanden, entstehen konnten. So wurde für je]de Aufnahme, sofern Lücken in den Messdaten erkennbar waren, eine lineare Interpolation dieser Lücken durchgeführt. Anschließend wurden die Bewegungsdaten eines jeden Instruments als CSV-Datei exportiert. Hierbei wurde jeweils eine Version der unbearbeiteten Aufnahmen sowie eine Version, in welcher die Bewegungsdaten interpoliert wurden, erstellt. Für den Import der CSV-Dateien in Matlab diente eine Matlab Funktion, die von Andrew Pullin programmiert wurde, als Grundlage [22]. Diese Funktion realisiert den Import einer Optitrack-CSV-Datei in Matlab und liefert eine Datenstruktur zurück, in welcher sämtliche Informationen zur Bewegungsaufnahme enthalten sind. Da diese Funktion im Jahr 2012 programmiert wurde und sich die Ausgabe beziehungsweise der Inhalt einer von Optitrack exportierten CSV-Datei seit jeher verändert hat, musste diese Funktion an einigen Stellen verändert und der neuen Ausgabe-Struktur der CSV-Datei angepasst werden. In Abbidung 3.12 ist exemplarisch für die Oboe die erste Ebene der Datenstruktur in Matlab dargestellt. Auf dieser Ebene kann jeweils eine der verschiedenen Aufnahmen ausgewählt werden. In den Aufnahmen 'sitzend1' und 'stehend1', 'sitzend2' und 'stehend2' sowie 'sitzend3' und 'stehend3' wurde jeweils das selbe Stück vom Musiker gespielt.

In Abbildung 3.12 ist die nächste Ebene der Datenstruktur, im Speziellen der Inhalt der ersten Aufnahme im Sitzen, zu sehen. Unter 'Comments' kann Information in

Oboe1Raw <1x1 struct>

Field	Value
sitzend1	<1x1 struct>
sitzend2	<1x1 struct>
sitzend3	<1x1 struct>
stehend1	<1x1 struct>
stehend2	<1x1 struct>
stehend3	<1x1 struct>

Abbildung 3.11: Datenstruktur in Matlab. Für jedes Instrument zunächst eine Unterteilung in die verschiedenen Aufnahmen.

Textform zur Interpretation des Inhalts der CSV-Datei gefunden werden. 'Handedness' gibt an, ob das bei der Messung verwendete Koordinatensystem als rechtshändig oder linkshändig definiert wurde und dient somit der korrekten Interpretation der aufgenommenen Positions- und Orientierungswerte. 'FrameCount' gibt die Anzahl an aufgezeichneten Frames an, 'NumRigidBody' beschreibt die Anzahl an in der Messung beteiligten Rigid-Bodies. Unter 'RigidBody' kann zu jedem in der Messung verfolgten Marker-Verbund Information über Name, ID, Anzahl an Markern sowie Position der Marker innerhalb des Marker-Verbunds gefunden werden. In 'Frame' findet man unter anderem zu jedem Frame Auskunft über den Frame-Index und dessen Timestamp (Zeitpunkt seit Beginn der Aufnahme), die Anzahl an in diesem Frame verfolgten Markern, deren IDs sowie Positionen. In der Strukur mit dem Namen 'Trackables' kann zu jedem Rigid-Body detaillierte Information gefunden werden, welche in Abbildung 3.13 zu sehen ist. Zu jedem Rigid-Body wird Auskunft über die Frames, in welchen der Rigid-Body präsent war ('FramesPresent'), sowie die entsprechenden Zeitwerte ('TrackedTimestamps') gegeben. Neben dem Namen und der ID des Rigid-Bodies ist hier auch Information zu den Markern, welche den Rigid-Body bilden, gegeben. So wird unter anderem die Anzahl an Markern ('MarkerCount'), deren Position ('MarkerLocationAndID') sowie die Qualität oder Genauigkeit bei dem Tracking der einzelnen Marker ('MarkerQuality', 'MeanError') angegeben. Unter 'Position' und unter 'Euler' findet man die wichtigsten Trackinginformationen, und zwar die Positions- und Orientierungsdaten des Rigid-Bodies.

Oboe1Raw.sitzend1 <1x1 struct>

Field	Value	Min	Max
Comments	<40x1 cell>		
Handedness	'right'		
FrameCount	18699	18699	18699
EnumTrackableCount	3	3	3
NumRigidBody	3	3	3
RigidBody	<3x1 struct>		
Frame	<18699x1 struct>		
Trackables	<3x1 struct>		

Abbildung 3.12: Exemplarische Darstellung der Bewegungsinformationen der ersten Aufnahme im Sitzen.

Oboe1Raw.sitzend1.Trackables(3,1) <1x1 struct>

Field	Value	Min	Max
FramesPresent	<18699x1 double>	1	18699
TrackedTimestamps	<18699x1 double>	0	155.8167
Name	'Oboe1'		
ID	3	3	3
FramesSinceLastTracked	<18699x1 double>	0	0
MarkerCount	<18699x1 double>	5	5
MarkerLocationsAndID	<5x4x18699 double>	-0.7704	15
PointCloudMarkers	<1x15x18699 double>	-0.7704	15
MarkerTracked	<1x5x18699 double>	-0.6907	1
MarkerQuality	<1x5x18699 double>	0	1
MeanError	<18699x1 double>	0	1
Position	<18699x3 double>	-0.7218	0.9261
Quaternion	<18699x4 double>	-0.7513	0.9402
Euler	<18699x3 double>	-100.8011	37.2295

Abbildung 3.13: Darstellung der Informationen eines Rigid-Bodies exempalrisch für die erste Aufnahme im Sitzen.

3.3.2 Synchronisation der Audioaufnahme mit den Bewegungsdaten

Die Synchronisation der Audioaufnahme mit den Bewegungsdaten wurde wie in 3.2.3.4 beschrieben mit Hilfe einer Starterklappe realisiert. Nachdem sowohl die Bewegungsdaten, als auch die Audioaufnahmen in Matlab geladen wurden wurde zunächst das Audiosignal analysiert. Die Starterklappe wurde zu Beginn sowie am Ende jeder Aufnahme geschlossen, ein lauter Knall war jeweils wahrnehmbar. Dieser Knall zum Beginn und am Ende der Aufnahme kann in der Wellenform des Audiosignals jeweils als großer Peak erkannt werden. Es wurde also algorithmisch der Maximalwert beziehungsweise derjenige Wert, der gleich 10 (zehn)% des Maximalwerts auf der Flanke hin zu dem Maximalwerts ist, jeweils in der ersten sowie in der zweiten Hälfte des Audiosignals ermittelt und als Zeitpunkte der geschlossenen Starterklappe interpretiert. Anschließend wurde der eigentliche Spielbeginn sowie das Ende des Spielens der Musiker im Audiosignal gesucht. Sobald ein gewisser Schwellwert ab dem Zeitpunkt, an dem die Starterklappe zum ersten Mal geschlossen wurde, von einem Audiosample überschritten wurde, wurde dieses Sample als Spielbeginn detektiert und der diesem Sample entsprechende Zeitwert im Audiosignal berechnet. Der Zeitpunkt des Spielendes wurde auf die gleiche Art und Weise bestimmt, wobei eine Annäherung an den Schwellwert hierbei in umgekehrter Richtung von dem Zeitpunkt aus, an dem die Starterklappe zum zweiten Mal geschlossen wurde, durchgeführt wurde. Für jedes Instrument wurden zu jeder Aufnahme die Zeitpunkte des Spielbeginns und des Spielendes sowie die Zeitpunkte, an dem die Starterklappe zum ersten und zum zweiten Mal geschlossen wurden, gespeichert. Die Audioaufnahmen wurden in gekürzter Form (reine Spielzeit) neu abgespeichert und hinsichtlich eines korrekten Zuschneidens auditiv überprüft.
Um die Bewegungsdaten auf die tatsächliche Spielzeit zu kürzen wurde zunächst die euklidische Distanz, also der Abstand im dreidimensionalen Raum zwischen dem Rigid-Body auf der rechten und dem Rigid-Body auf der linken Seite der Starterklappe wie in Abbildung 3.14 zu sehen, grafisch dargestellt. Man kann in dieser Abbildung erkennen, dass die Starterklappe sich ab in etwa vier (4) Sekunden im Blickfeld der Kameras befand und die Distanz zwischen den Klappenseiten im geschlossenen Zustand in etwa zwei (2) cm betrug. Von in etwa Sekunde acht (8) bis in etwa Sekunde hundertvierunddreißig (134) ist eine konstant steigende Linie erkennbar. In diesem Zeitraum befand sich die Starterklappe außerhalb des Trackingvolumens beziehungsweise des Sichtfeldes der Kameras. Es hat sich herausgestellt, dass nicht notwendigerweise der kleinste Distanzwert zwischen den Klappenseiten dem Zeitpunkt entspricht, an dem die Starterklappe geschlossen war. Vielmehr liegt in den Positionsdaten der Rigid-Bodies, und somit auch in den Abstandswerten zwischen diesen, ein Rauschen im Millimeterbereich vor. So wurden zunächst die minimalen Distanzen der beiden Seiten der Starterklappe für das erste und für das zweite Mal

Klappen berechnet und auf diese Distanzwerte je ein Toleranzwert (im Millimeterbereich) addiert. Anschließend wurden für das erste Mal und für das zweite Mal Klappen sämtlich Zeitpunkte, an wechen die Distanzen minimal waren und im Toleranzbereich lagen, betrachtet, sowie eine Zeitdifferenz der jeweils ersten Zeitpunkte berechnet. Da die genaue Zeitdifferenz zwischen dem ersten und dem zweiten Schließen der Starterklappe durch die Audioaufnahme bekannt ist, konnte ein Vergleich der berechneten Dauer zwischen den beiden mal Klappen auf Seiten der Bewegungsdaten mit der der Audioaufnahme gezogen werden. Ist der Unterschied der errechneten Zeitdifferenz der Audioaufnahme und der Aufnahme der Bewegungsdaten im Bereich von weniger als acht (8) ms (Zeitliche Auflösung der aufgezeichneten Bewegungsdaten) gewesen, so wurden die Zeitpunkte, an welchen die Klappe geschlossen wurde auch in den Motion Capture Daten gefunden. Sollte dieser Unterschied größer als 8 (acht) ms geweisen sein, so musste der Toleranzwert individuell nach Betrachtung der grafischen Darstellung der Distanzen (siehe Abbildung 3.14) verändert und ein neuer Versuch gestartet werden. Sobald die Zeitpunkte der geschlossenen Klappe in den Bewegungsdaten detektiert wurden, wurden diese in einem nächsten Schritt auf die reine Spielzeit der Musiker gekürzt. Die Zeitdifferenz, zwischen Starterklappe war zum ersten Mal geschlossen und Spielbegin, beziehungsweise zwischen Spielende und Starterklappe wurde zum zweiten Mal geschlossen, wurde für jede Audioaufnahme berechnet und konnte nun auf die Bewegungsdaten übertragen werden, so dass diese ebenso in auf die reine Spielzeit des Musikers gekürzter Form vorlagen. Auch für die Bewegungsdaten wurden für jedes Instrument zu jeder Aufnahme die Zeitpunkte des Spielbeginns und des Spielendes sowie die Zeitpunkte, an dem die Starterklappe zum ersten und zum zweiten Mal geschlossen wurden, gespeichert.

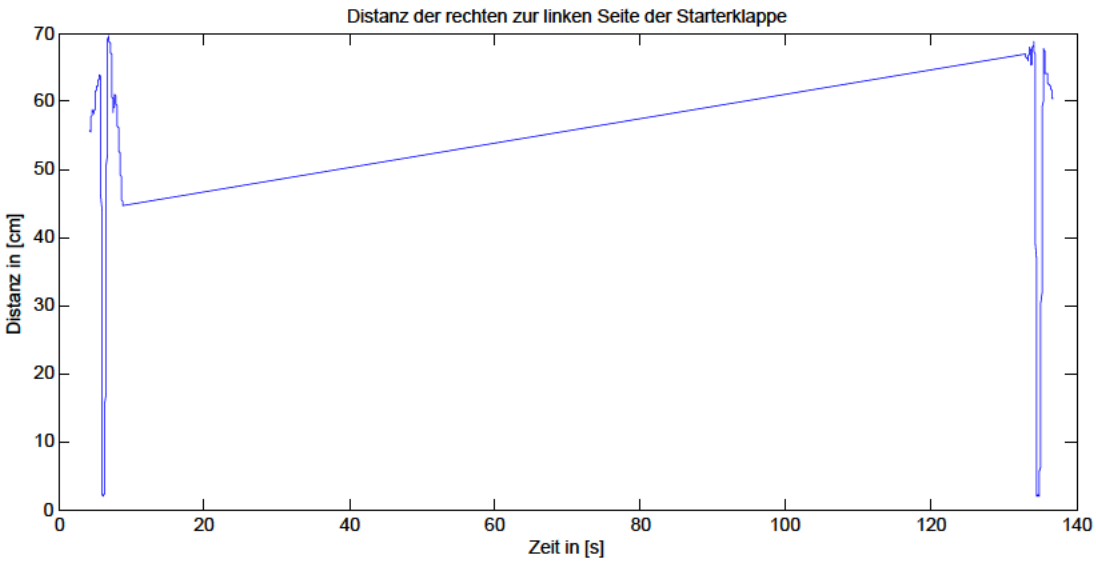

Abbildung 3.14: Euklidischen Distanz zwischen der rechten und der linken Seite der Starterklappe.

3.3.3 Vermeidung von Gimbal Lock in der Eulerdarstellung

Eulerwinkel werden dazu verwendet auf intuitive Weise die Orientierung eines Objekts im Raum darzustellen. In Abbildung 3.15 ist die Bezugsrichtung im Koordinatensystem entsprechend für Eulerwinkel mit dem Wert Null (0) Grad dargestellt. In der Ausgangslage sieht das Objekt also entlang der negativen z-Achse, die y-Achse zeigt nach oben und die x-Achse nach rechts. Um ein einfaches Verständnis für die Interpretation der Eulerwinkel zu erlangen, kann man sich eine Rotation um den Eulerwinkel Yaw (in der Abbildung als Head bezeichnet) als ein Kopfschütteln ("nein"), eine Rotation um den Pitch Winkel als ein Kopfnicken ("ja") und eine Rotation um den Eulerwinkel Roll als Kippen des Kopfes zur Seite vorstellen. Wichtig hierbei ist die Rotationsreihenfolge, in der die drei (3) verchiedenen Rotationen durchgeführt werden, da eine unterschiedliche Sequenz an Rotationen zu unterschiedlichen Orientierungen im Raum führt. In den meisten Modellierungssystemen sowie in der Software zur Bewegungsaufnahme Motive:Tracker von Optitrack ist diese Rotationsreihenfolge x/y/z (Pitch, dann Yaw, dann Roll) [2].

Nachdem die Bewegungsdaten aller Instrumente in auf die tatsächliche Spielzeit der Musiker gekürzter Form vorlagen, wurden zu jeder Aufnahme sowohl die Positionswerte (x,y,z) als auch die Orientierungsdaten (Yaw, Pitch und Roll) grafisch dargestellt. Dabei fiel bei den Aufnahmen der Querflöten sowie bei den Aufnahmen einer Violine auf, dass diese fehlerhaft zu sein schienen. In Abbildung 3.16 ist der Verlauf

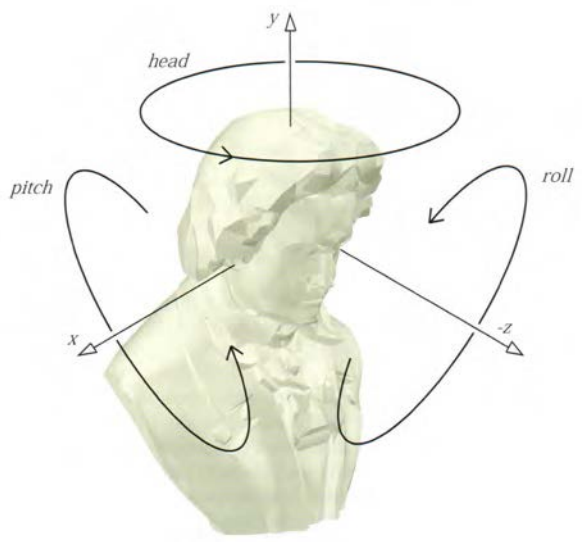

Abbildung 3.15: Bezugsrichtung beziehungsweise Ausgangslage zur Interpretation der Eulerwinkel [2].

der Eulerwinkel exemplarisch für eine Aufnahme einer Querflöte, im Stehen gespielt, dargestellt. Wie zu erkennen ist, sind sowohl die Pitch Werte, als auch die Roll Werte extrem niedrig (an vielen Stellen kleiner als -100 Grad), des Weiteren überschreitet der Yaw Winkel an keiner Stelle den 90 Grad Wert. In dem Koordinatensystem des Kameratrackingssytems, welches während der Kalibrierung wie in Abschnitt 3.2.3.1 beschrieben festgelegt wurde, verläuft die negative z-Achse von der Bühne aus nach vorne in Richtung Publikum, die x-Achse zeigt nach rechts und die y-Achse nach oben. Die Querflöte zeigte zu weiten Teilen während der Aufnahme in Bezug zu diesem Koordinatensystem nach rechts und leicht nach unten. Des Weiteren zeigte das Instrument oft leicht nach hinten so dass auf jeden Fall davon auszugehen ist, dass der Yaw-Winkel den Wert von 90 Grad zu irgendeinem Zeitpunkt während der Aufnahme überschritten haben muss. Eine Orientierung der Querflöte mit einem Pitch- und einem Roll-Wert von weniger als -100 Grad ist ebenso unerklärlich. Es wurde festgestellt, dass diese undurchschaubaren Werte der Eulerwinkel durch ein Phänomen namens "Gimbal Lock", das bei den Aufnahmen der Querflöten und bei den Aufnahmen einer Violine auftrat, entstanden sind. Dieses Phänomen ist eine Art Darstellungsproblem von Euler Winkeln und tritt auf, sobald Rotationen so durchgeführt wurden, dass ein Freiheitsgrad verloren geht. Ist die Rotationsreihenfolge x/y/z (Pitch/Yaw/Roll) und wird als zweite Rotation eine Rotation um die y-Achse von $\pi/2$ durchgeführt, so wird die lokale z-Achse auf die originale x-Achse bewegt, so dass diese beiden Achsen direkt aufeinanderliegen. Die finale Rotation um die z-Achse wird redundant und führt zu keiner weiteren Veränderung der Orientierung [2]. In Probeaufnahmen im Anschluss an die Messungen der Bewegungsdaten

der Musikinstrumente wurde ebenfalls festgestellt, dass die Software des Trackingsystems undurchschaubare Eulerwerte liefert, sobald sich die Yaw-Rotation an die 90 Grad (beginnend ab in etwa 80 Grad) annähert und dass das Trackingsystem tatsächlich keine Yaw Werte größer 90 Grad aufzeichnet.

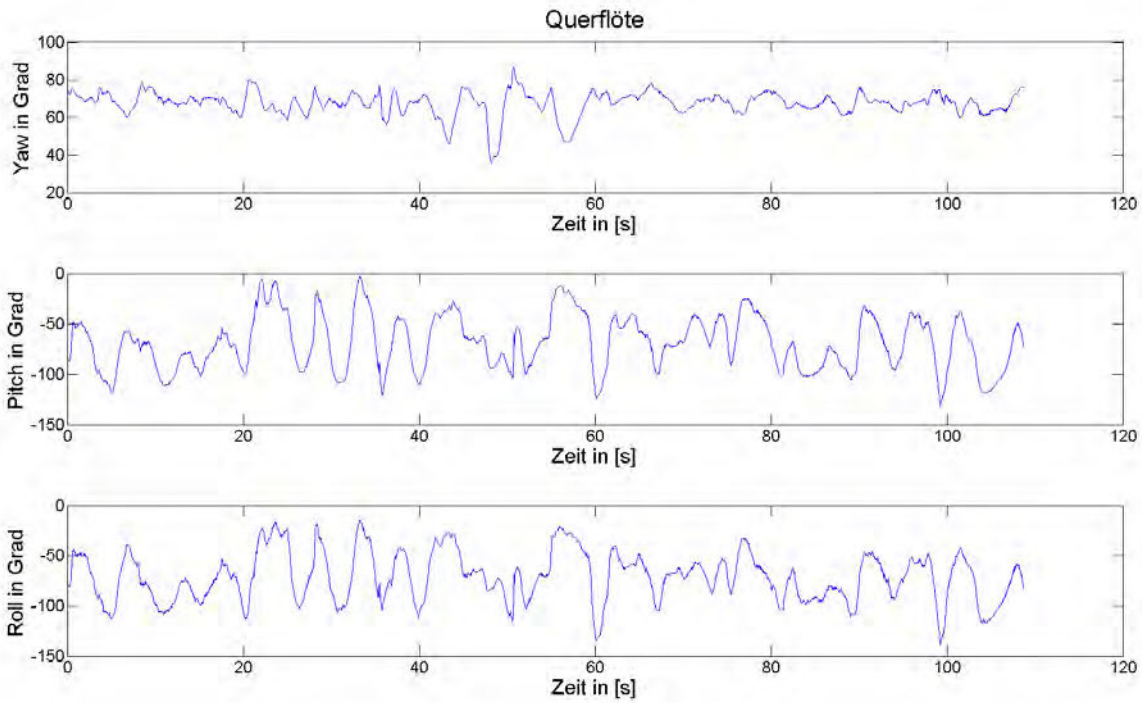

Abbildung 3.16: Eulerwinkel der zweiten Aufnahme der Querflöte1 im Stehen (siehe Tabelle 3.1) ohne Nachbearbeitung. Pitch und Roll nehmen hierbei unrealistische Werte an.

Eine Lösung dieses Darstellungsproblems der Eulerwerte wurde dadurch erzielt, dass in der Software zur Aufzeichung der Bewegungsdaten das Kamerakoordinatensystem für die Aufnahmen der Querflöten sowie für die Aufnahmen einer Violine vor dem Export der Aufnahmen in CSV-Dateien um 45 Grad entlang der y-Achse (Yaw) gedreht beziehungsweise rotiert wurde. Dies hatte zur Folge, dass der Yaw-Winkel zu keinem Zeitpunkt mehr Werte in dem Bereich von 90 Grad annimmt und somit Gimbal Lock vermieden wird. Ebenso nehmen wie in Abbildung 3.17 zu sehen auch die Pitch und die Roll Werte nun nicht mehr extrem kleine, undurchschaubare Werte an und können nun zur korrekten Interpretation der Lage des Instruments im Raum verwendet werden.

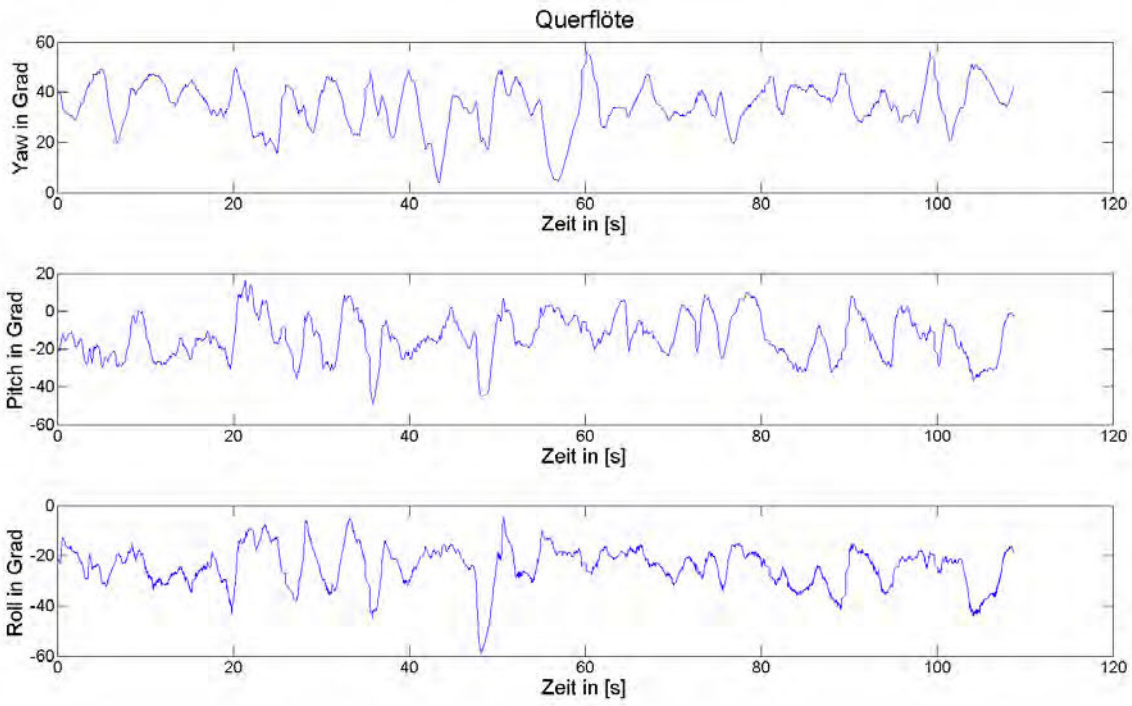

Abbildung 3.17: Eulerwinkel für das zweite Stück der Querflöte1 (siehe Tabelle 3.1) im Stehen gespielt nach der Rotation des Kamerakoordinatensystems um 45 Grad in Yaw.

3.3.4 Bereinigung von Messfehlern

Nachdem die fehlerhafte Darstellung der Euler-Winkel aufgrund von 'Gimbal Lock' in den Aufnahmen der Querflöte und in den Aufnahmen einer Violine entdeckt und eine Lösung zur korrekten Darstellung der Orientierungswerte gefunden und umgesetzt wurde, fiel des Weiteren bei manchen Aufnahmen auf, dass im Verlauf der Eulerwerte an gewissen Stellen für kurze Zeit große Sprünge zu erkennen sind. In Abbildung 3.18 ist exemplarisch der Verlauf der Eulerwinkel für eine Aufnahme einer Posaune dargestellt. Man kann erkennen, dass in etwa bei Sekunde 28 ein plötzlicher Sprung bei allen Eulerwinkel auftritt. Beispielsweise verändert sich der Pitch-Wert von einem Frame zu dem nächsten um mehr als 30 Grad. Da das Instrument sich innerhalb eines Frames sicherlich nicht so schnell bewegt haben kann, dass sich diese Eulerwerte so dramatisch ändern, wurde nach dem Grund dieser Veränderung gesucht. Nach Überpüfung der fehlerhaft zu sein scheinenden Aufnahmen in der Messsoftware Motive:Tracker, wurde festgestellt, dass diese Sprünge aufgrund von Reflexionen entstanden, welche für einen kurzen Zeitraum als Rigid-Body erkannt wurden. Reflexionen am Instrument (oder am Bogen bei der Violine und der Viola) führten also dazu, dass die Messsoftware reflektierende Marker an Orten erkannt

hat, an denen sich kein Rigid-Body befunden hat. So wurde jede Aufnahme eines jeden Instruments erneut hinsichtlich großer Sprünge untersucht. Wurden Sprünge in den Orientierungsdaten oder in den Positionswerten erkannt, so wurde eine lineare Interpolation auf eine von zwei verschiedenen Weisen durchgeführt: Durch explizite Angabe der Frame-Nummer, an welcher die Interpolation startet beziehungsweise endet konnte sozusagen manuell interpoliert werden. Des Weiteren wurde eine Funktion programmiert, mit deren Hilfe Sprünge durch Angabe eines Thresholds automatisiert interpoliert werden können. Überschreitet die Differenz aus dem Wert des nächsten Frames zu dem Wert des aktuellen Frames diesen Threshold, so wird ein Sprung erkannt und von dem aktuellen Frame bis zu demjenigen nächsten Frame, an welchem die Differenz wieder kleiner als der Threshold ist, linear interpoliert. In Abbildung 3.19 ist exemplarisch der Verlauf der Eulerwinkel nach Durchführung der Interpolation zu sehen. Für jedes Instrument wurde des Weiteren falls interpoliert werden musste, die Gesamtinterpolationsdauer innerhalb einer Aufnahme berechnet. Die Anzahl an Interpolationen innerhalb einer Aufnahme eines Instruments sowie die Interpolationsdauer können Tabelle 3.3 entnommen werden.

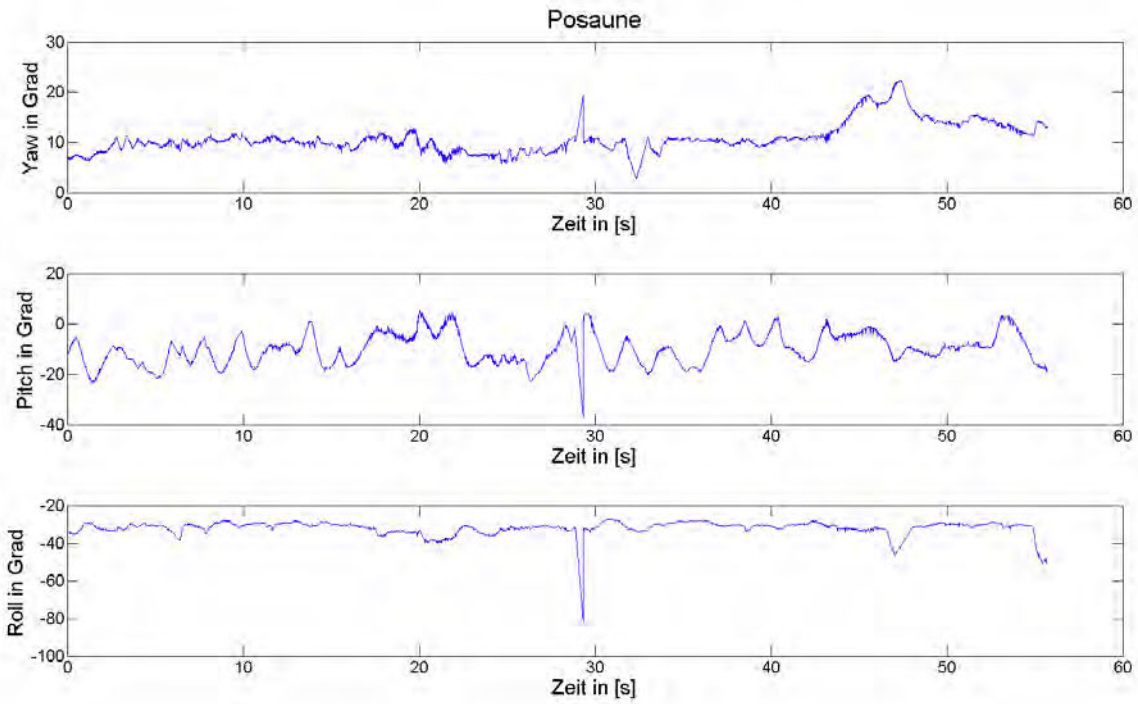

Abbildung 3.18: Eulerwinkel der dritten Aufnahme der Posaune1 im Stehen (siehe Tabelle 3.2). Sprung bei in etwa 28 Sekunden erkennbar.

Grundsätzlich kann man sagen, dass das Kamerasystem zu jeder Aufnahme zuverlässige Positionsdaten aufzeichnet. Die Aufzeichnungen der Orientierungsdaten (Euler-Winkel) hingegen erweisen sich als weniger zuverlässig. Neben den soeben

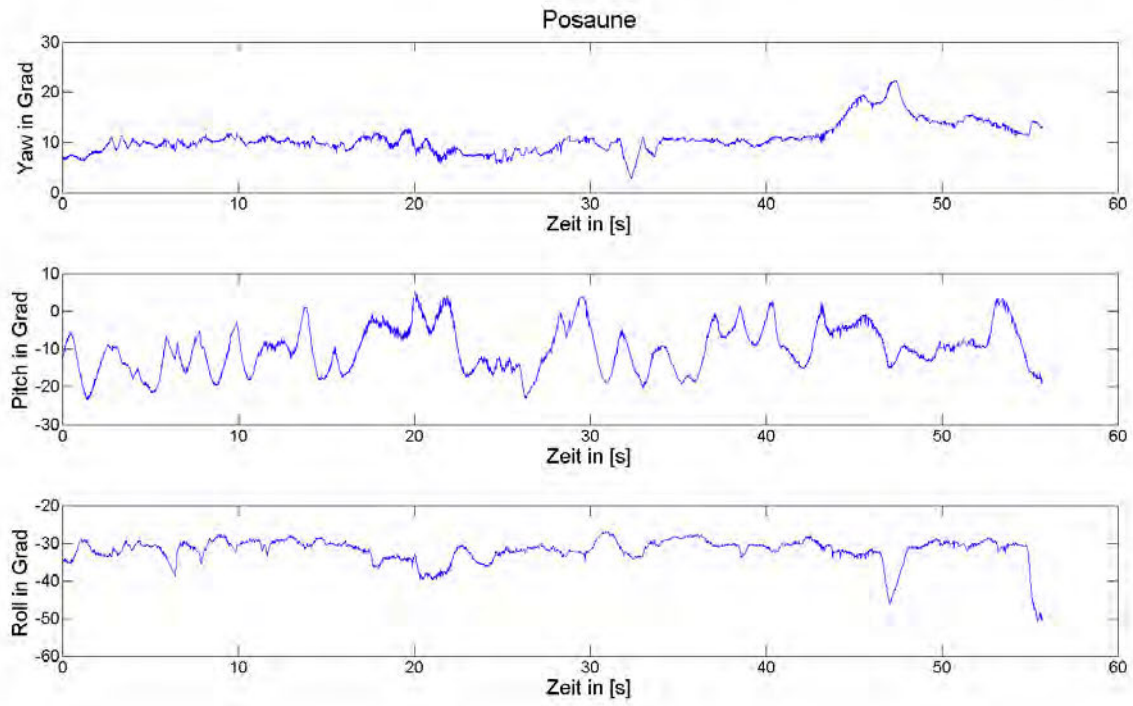

Abbildung 3.19: Eulerwinkel der dritten Aufnahme der Posaune1 im Stehen (siehe Tabelle 3.2) nach der linearen Interpolation.

beschriebenen Messfehlern in Form von Sprüngen aufgrund von Reflexionen, welche durch Interpolation bereinigt wurden, sind einige Aufnahmen insgesamt etwas verauscht. Aus diesem Grund werden sieben (7) der insgesamt 120 Aufnahmen nicht weiter betrachtet. So gelten die Aufnahmen einer Viola, die im Stehen gespielt wurden, als zu verauscht, ebenso werden zwei Aufnahmen einer Klarinette, im Sitzen gespielt, sowie je eine Aufnahme einer Violine nicht weiter betrachtet. Die Aufzeichnungen der Bewegungsdaten der Fagotte, der Oboen, des Kontrabass, sowie der Violoncelli können als von Beginn an fehlerfrei angesehen werden und mussten überhaupt nicht nachbearbeitet werden. Nachdem in einigen Aufnahmen ein leichtes Rauschen in den Orientierungsdaten vorlag, wurden diese nach der Interpolation der Sprünge nach dem Prinzip des gleitenden Durchschnitts gefiltert. In Abbildung 3.20 ist der geglättete Verlauf der dritten im Stehen gespielten Aufnahe der Posaune zu sehen. In Tabelle 3.4 sind diejenigen Instrumente, deren aufgezeichneten Euler-Winkel gefiltert wurden sowie die Spannweite des Filters in Sample dargestellt. Des Weiteren kann man dieser Tabelle die Information, welche Aufnahmen aufgrund eines zu großen Rauschens nicht weiter betrachtet werden, entnehmen. So wird beispielsweise das erste Stück der zweiten Violine im Stehen gespielt verworfen. Als Gründe für die unsaubere Aufzeichnung der Orientierungsdaten können neben den Reflexionen, die gerade bei der Viola und bei der Violine verstärkt auch aufgrund

des Bogens auftraten, die zu geringe Größe der Marker (bei der Violine und bei der Viola) sowie eine Verdeckung des Sichtbereichs der Kameras genannt werden. Es ist auch nicht auszuschließen, dass der Messaufbau der Kameras nach der Kalibierung zu Beginn eines jeden Tages unverändert blieb. Zwar wurde jeder Musiker zu Beginn darauf hingewiesen, auf den Messaufbau Acht zu geben und vor Allem zu vermeiden, die Stative, an welchen die Kameras platziert wurden, zu berühren beziehungsweise zu verschieben. Eine Veränderung der Kameraposition im Zentimeterbereich ist jedoch nicht auszuschließen und könnte eine Ursache dafür gewesen sein, dass in den Aufzeichnung der Orientierungsdaten in manche Aufnahme ein leichtes Rauschen vorliegt.

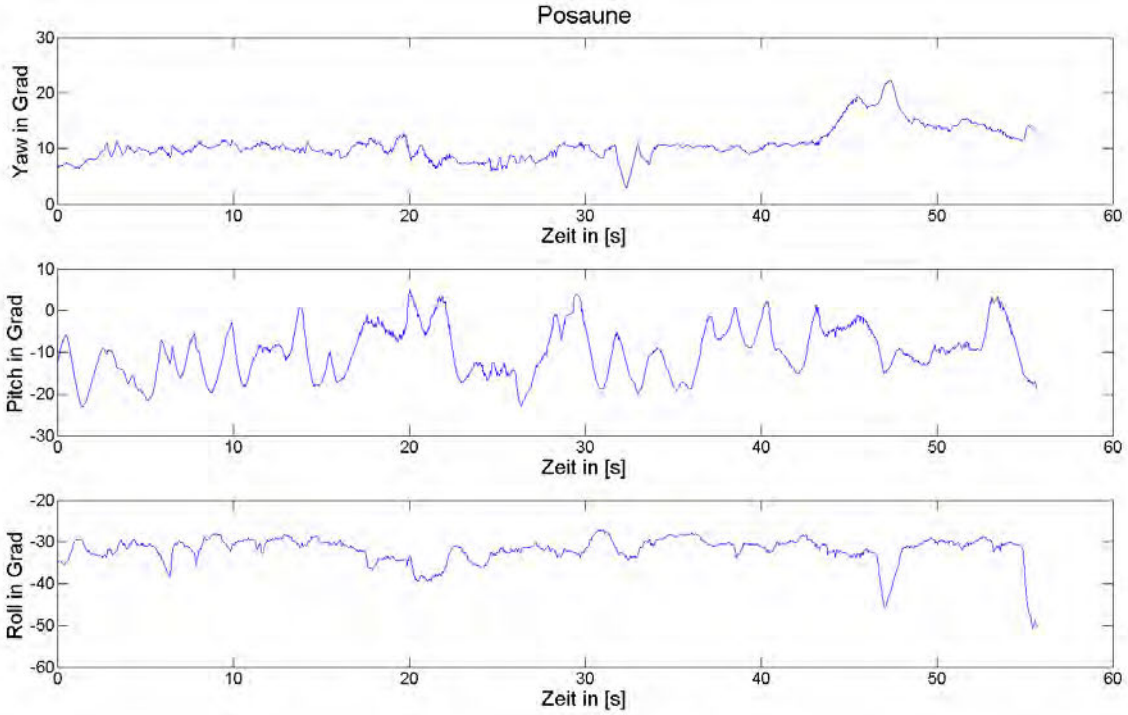

Abbildung 3.20: Eulerwinkel der dritten Aufnahme der Posaune1 im Stehen (siehe Tabelle 3.2) nach Filterung nach dem Prinzip des gleitenden Durchschnitts.

Tabelle 3.3: Darstellung der Anzahl an Interpolationen sowie der Interpolationsdauer. Informationen zu den gespielten Stücken können den Tabelle 3.1 und 3.2 entnommen werden.

Instrument	Aufnahme	Dauer der Aufnahme [s]	Anzahl an Interpolationen	Interpolationsdauer [s]
Horn1	Stück1 (sitzend)	105.3	9	0.22
	Stück2 (sitzend)	150.39	9	0.63
Horn2	Stück2 (stehend)	120.99	2	0.58
Klarinette1	Stück1 (stehend)	120.99	4	1.03
	Stück2 (stehend)	113.30	13	8.07
	Stück3 (sitzend)	105.45	147	13.69
	Stück3 (stehend)	108.10	26	3.47
Posaune1	Stück2 (stehend)	48.35	1	0.02
	Stück3 (stehend)	55.71	1	0.02
Trompete2	Stück2 (stehend)	111.40	1	0.02
Viola1	Stück1 (sitzend)	135.46	171	8.35
	Stück2 (sitzend)	129.06	10	3.56
	Stück3 (sitzend)	85.67	45	0.45
Viola2	Stück1 (stehend)	180.91	1	0.35
	Stück3 (sitzend)	178.11	1	0.09
Violine1	Stück1 (sitzend)	134.29	25	0.94
	Stück1 (stehend)	136.91	118	5.57
	Stück2 (sitzend)	164.93	118	7.31
	Stück2 (stehend)	161.21	117	9.36
	Stück3 (stehend)	211.45	73	3.42
Violine2	Stück1 (sitzend)	119.15	61	4.17
	Stück2 (sitzend)	127.11	26	4.95
	Stück2 (stehend)	126.27	38	5.06
	Stück3 (sitzend)	135.69	8	0.83
	Stück3 (stehend)	135.40	40	7.15

Tabelle 3.4: Darstellung derjenigen Instrumente, deren Orientierungsdaten nach dem Prinzip des gleitenden Durchschnitts gefiltert wurden.

Instrument	Filterbereich in Sample
Querflöte	7
Horn	5
Klarinette	11
Klarinette1	sitzend 1-2 verworfen
Posaune	5
Trompete	5
Violine	9
Violine1	sitzend 3 verworfen
Violine2	stehend 1 verworfen
Viola 1	17
Viola1	stehend 1-3 verworfen

3.3.5 Berechnung Relativer Bewegungsdaten

Nachdem die Messdaten von Fehlern bereinigt wurden, wurden in einem nächsten Schritt zu jeder Aufnahme eines Instruments relative Bewgungsdaten für die Orientierung und die Position des Instruments im Raum erstellt. Diese erhält man durch komponentenweise Subtraktion des Median aller Positions- (x,y,z) beziehungsweise Orientierungswerte (Yaw, Pitch, Roll) einer Aufnahme, also durch Subtraktion derjenigen Werte, welche die zentrale Position beziehungsweise Orientierung des Instruments beschreiben, von jeweils allen darauf folgenden Werten. Die neuen Position- und Orientierungsdaten beschreiben die relative Abweichung der Instrumentenposition und -orientierung von derjenigen Lage des Instruments im Raum, die am meisten während einer Aufnahme eingehalten wurde. Möchte man nun eine Auralisation beziehungsweise eine akustische Simulation in einer virtuellen Umgebung durchführen, so kann man durch Angabe einer Startposition sowie Orientierung, welche auf die relativen Bewegungsdaten addiert wird, den Verlauf der Position und Orientierung des Instruments im virtuellen Raum nachbilden. In den Abbildungen 3.21 und 3.22 sind exemplarisch der relative Verlauf der Positionswerte sowie der Euler-Winkel für eine Aufnahme einer Oboe, im Stehen gespielt, dargestellt.

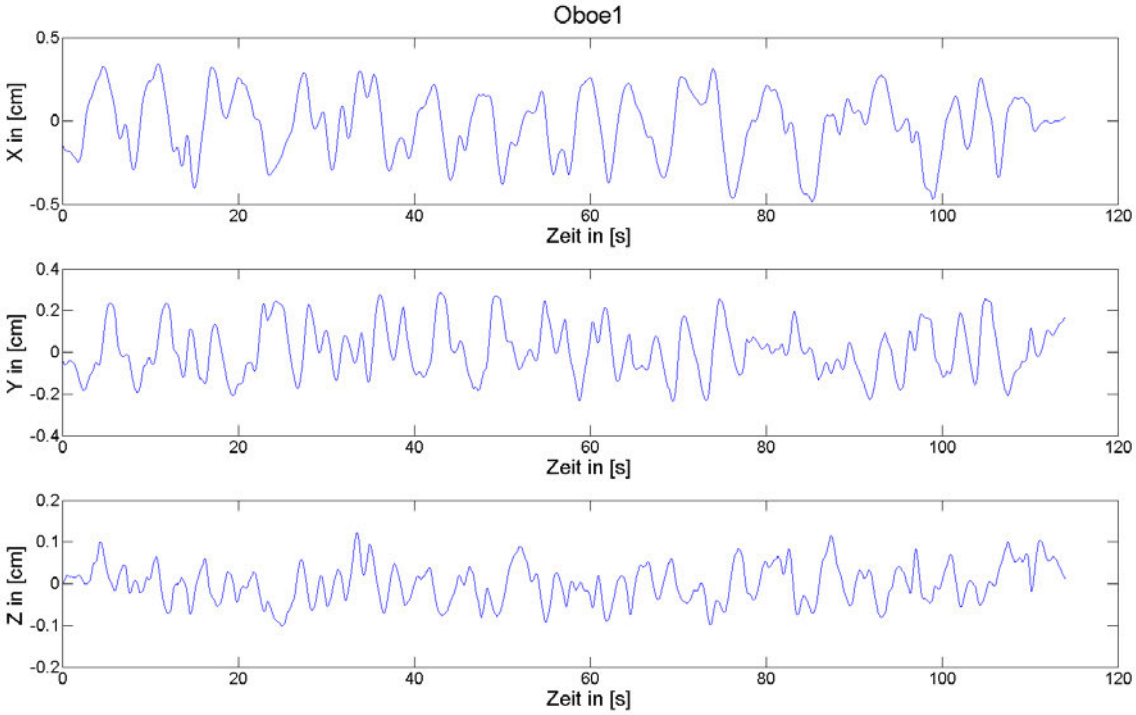

Abbildung 3.21: Relative Positionswerte der Oboe1 bei der dritten Aufnahme im Stehen (siehe Tabelle 3.1).

3.3.6 Transformation der Eulerwinkel in Richtungsvektoren

In der Akustiksimulationssoftware Raven wird die Orientierung der Schallquelle und des Empfängers mit Hilfe zweier Vektoren beschrieben. Es wird ein Vorwärts-Vektor und ein Oben-Vektor, welcher immer orthogonal zu dem Vorwärts-Vektor steht, benötigt, um die Lage des Objekts im Raum eindeutig zu beschreiben. In diesem Abschnitt wird erklärt, wie die Eulerwinkel Pitch, Yaw und Roll in Vorwärts- und Oben-Vektoren durch Berechnung einer Rotations- oder Orientierungsmatrix umgewandelt wurden. Eine Rotationstransformation rotiert einen Positions- oder Richtungsvektor mit einen gegebenen Winkel um eine gegebene Achse, welche durch den Ursprung verläuft. Eine Orientierungsmatrix ist eine Rotationsmatrix, die oft dazu verwendet wird, die Orientierung eines Objekts im Raum zu definieren, beispielsweise durch die Angabe einer Vorwärts- und einer Oben-Richtung. Die Rotationsmatrizen, welche ein Objekt mit den Winkeln Pitch (α), Yaw (β) und Roll (γ) um die x-, y- und z-Achse rotieren, können folgenden Gleichungen entnommen werden (Winkel in Radiant):

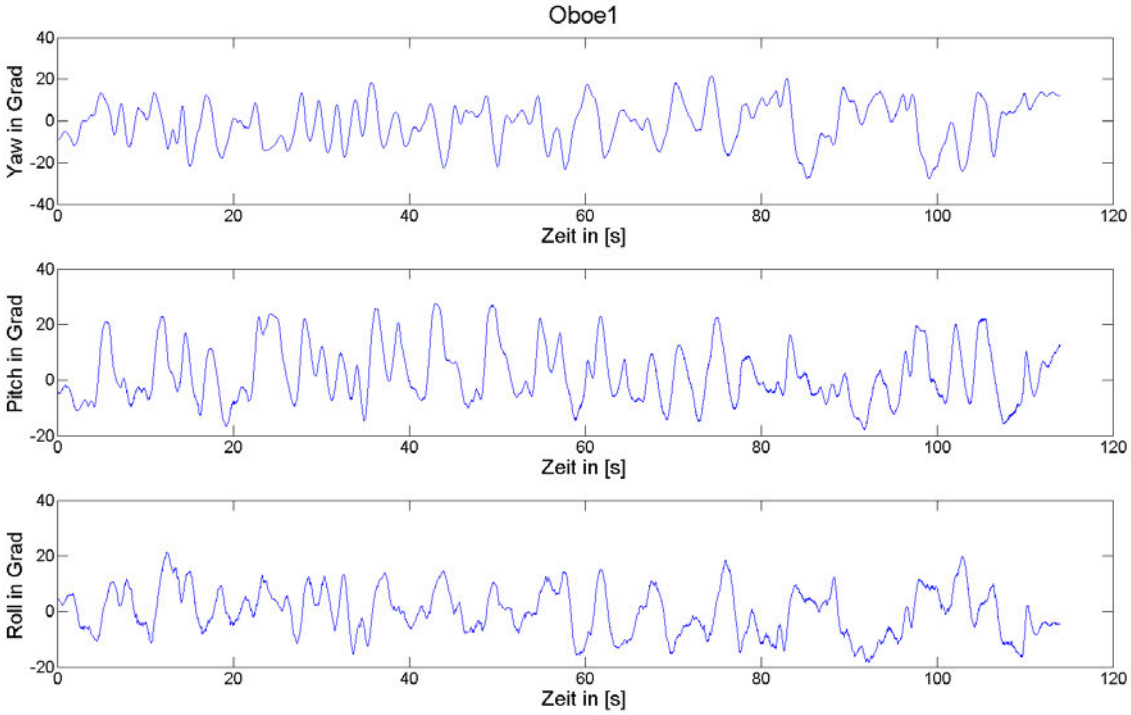

Abbildung 3.22: Relative Eulerwinkel der Oboe1 bei der dritten Aufnahme im Stehen (siehe Tabelle 3.1).

$$R_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & cos\alpha & -sin\alpha \\ 0 & sin\alpha & cos\alpha \end{pmatrix} \tag{3.1}$$

$$R_y(\beta) = \begin{pmatrix} cos\beta & 0 & sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -sin\beta & 0 & cos\beta \end{pmatrix} \tag{3.2}$$

$$R_z(\gamma) = \begin{pmatrix} cos\gamma & -sin\gamma & 0 \\ sin\gamma & cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3.3}$$

Um nun einen Richtungs- oder Positionsvektor im Raum zu rotieren, wird dieser nacheinander mit den in Gleichung 3.1 bis 3.3 beschriebenen Rotationsmatrizen multipliziert. Wie in Abschnitt 3.3.3 beschrieben, bestimmt dabei die Reihenfolge, in der die Multiplikationen durchgeführt werden, die eigentliche Orientierung im Raum, da eine unterschiedliche Multiplikationsreihenfolge zu unterschiedlichen Orientierungsmatrizen führt. Möchte man zunächst um die x-Achse, dann um die

y-Achse und schlussendlich um die z-Achse rotieren, so erhält man die Eulertransformation durch:

$$E(Pitch, Yaw, Roll) = R_x(Pitch) * R_y(Yaw) * R_z(Roll) \tag{3.4}$$

Die erste Zeile dieser Orientierungsmatrix beschreibt die Veränderung des Basis-Vektors (0,0,1) aufgrund der Rotationen um die x-, y- und z-Achse und kann somit als Vorwärts-Vektor interpretiert werden. Die zweite Zeile dieser Orientierungsmatrix beschreibt hingegen die Veränderung des Basisvektors (0,1,0) und stellt somit den Oben-Vektor (oder Aufwärts-Vektor) da. Die dritte Zeile hingegen beschreibt die Veränderung des Rechts-Vektors (0,0,1). Die Vorwärts- und Oben-Vektoren erhält man also aus den Eulerwinkel durch die Multiplikation einfacher Rotationsmatritzen. Relative Vorwärts- und Oben-Vektoren wurden aus dem in Abschnitt 3.3.6 beschriebenen relativen Eulerwinkeln berechnet. In den Abbildungen 3.23 und 3.24 sind ein relativer Vorwärts- und Oben-Vektor exemplarisch für eine Oboe dargestellt. Ein Vorwärts-Vektor mit den Koordinaten $(0, 0, -1)$ (im weiteren Verlauf ist die z-Richung invertiert) und ein Oben-Vektor mit den Werten $(0, 1, 0)$ ergeben sich hierbei für Eulerwinkel mit den Werten Null (Yaw, Pitch und Roll) entsprechend dem Median der relativen Bewegungsdaten und stellen die natürlichen Spielhatung des Instruments dar. Es ist noch zu erwähnen, dass alle Richtungsvektoren auf die Länge eins (1) normiert sind.

3.3.7 Translation der Rigid-Body-Position

Wie in Kapitel 3.2.3.3 beschrieben wurde für jedes Instrument die Position des Rigid-Bodies auf dem Instrument mit Fotos dokumentiert. Im Speziellen wurde der Abstand zwischen der Position des Rigid-Bodies auf der Querlflöte zu der Mundöffnung der Querflöte, aus welcher der meiste Schallausstoss erwartet wird, als übermäßig groß empfunden, so dass für dieses Instrument eine Korrektur der Rigid-Body Position durchgeführt wurde. Wie in Abbildung 3.8 zu erkennen, befand sich bei der Querflöte der Rigid-Body am Ende des Instruments. Diese Stelle des Instruments erfährt mit Sicherheit während des Spielens größere Veränderungen in den Positionswerten in alle Raumrichtungen als die Lage der Mundöffnung, so dass hier eine Translation oder Verschiebung der Positionsdaten als sinnvoll angesehen wird. Möchte man nun die Positionsdaten eines bestimmten Punktes auf der Querflöte (z.B. das akustische Zentrum beziehungsweise die Lage der Mundöffnung) erhalten, so muss man zunächst die Distanz des interessierenden Punktes zu dem Rigid-Body auf den Fotos abschätzen. Mit Hilfe dieser Abstandsinformation sowie einem Richtungsvektor,

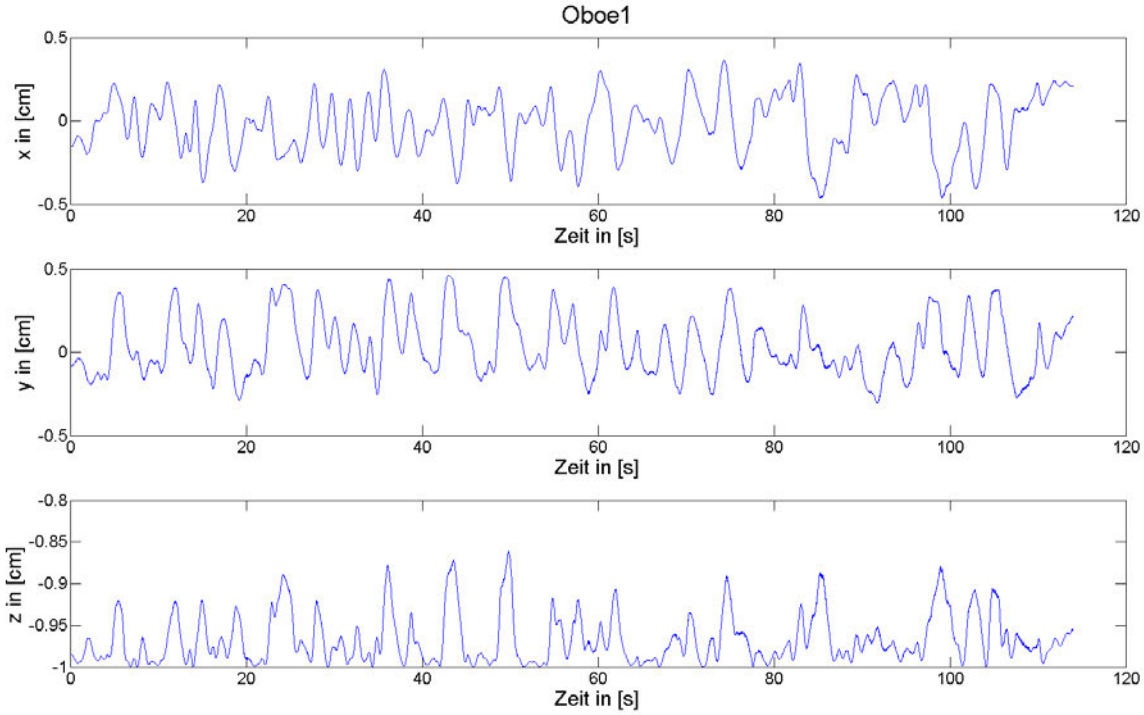

Abbildung 3.23: Relativet Vorwärts-Vektor der Oboe1 bei der dritten Aufnahme im Stehen (siehe Tabelle 3.1).

welcher die Lage des Instruments im Raum beschreibt, lassen sich die Koordinaten des gesuchten Punktes im Nachhinein aus den Positionswerten des Rigid-Bodies bestimmen. Dies wird dadurch realisiert, dass zunächst der Richtungsvektor, der entlang der Instrumentenachse der Querflöte zeigt, invertiert wird. Anschließend wird die Länge des auf eins normierten und nun invertierten Richtungsvektors entsprechend der auf den Fotos abgelesen Distanz zwischen der Rigid-Body Position und der Mundöffnung, verändert, so dass man einen Vektor erhält, welcher vom Ende der Querflöte aus in Richtung der Mundöffnung zeigt. Letzendlich kann eine einfache Addition dieses Vektors zu dem Positionswert des Rigid-Bodies durchgeführt werden, um die Position der Mundöffnung zu erhalten. In Abbildung 3.25 sind die Positionswerte des Rigid-Bodies einer Aufnahme einer Querflöte, im Stehen gespielt, vor (grün) und nach (blau) der Translation des Rigid-Bodies zu sehen. Wie man beispielsweise an den Positionswerten der y-Koordinate sehen kann, liegen diese nach der Translation der Positionswerte in einem höheren Wertebereich, da das Instrument durchgehend leicht nach unten gehalten wurde und die neu verfolgte Position der Mundöffnung immer nahe des Kopfes liegt.

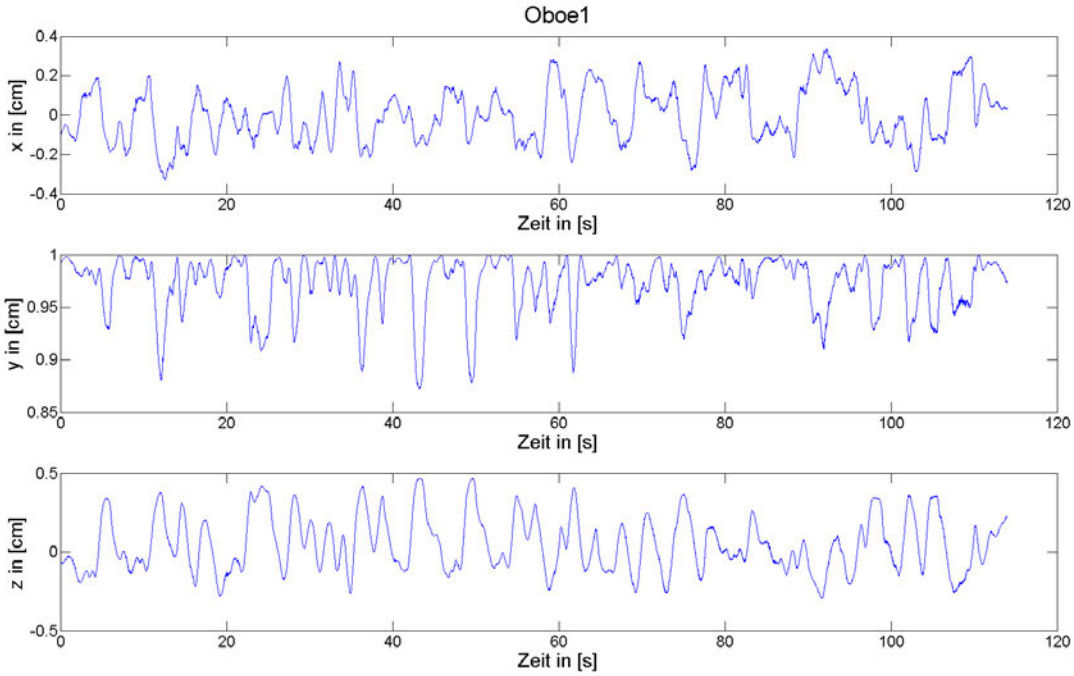

Abbildung 3.24: Relativer Oben-Vektor der Oboe1 bei der dritten Aufnahme im Stehen (siehe Tabelle 3.1).

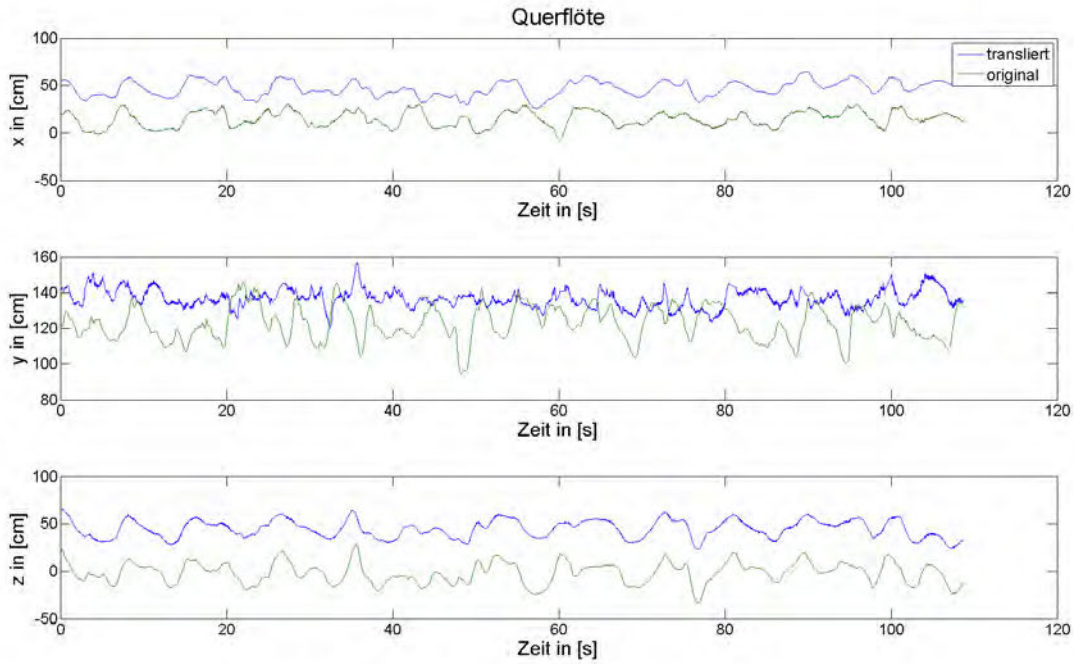

Abbildung 3.25: Positionswerte der Querflöte1 bei der zweiten Aufnahme im Stehen (siehe Tabelle 3.1) vor (grün) und nach (blau) der Translation der Rigid-Body-Position auf dem Instrument.

4 Ergebnisse

4.1 Analyse der Bewegungsdaten

Die auf die Spielzeit gekürzten und von Messfehlern bereinigten Bewegungsdaten werden in einem nächsten Schritt statistisch analysiert. Um einen Eindruck davon zu bekommen, wie schnell beziehungsweise wie viel die einzelnen Instrumente bewegt wurden, wird für jedes Instrument die Geschwindigkeit, mit der das Instrument während einer Aufnahme bewegt wurde, berechnet. Hierzu wird wie in Formel 4.1 dargestellt, der dreidimensionale, euklidische Abstand zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Positionswerten des Rigid Bodies berechnet und mit dem Zeitintervall, welches zwischen den beiden aufeinanderfolgenden Postionswerten vorliegt, gewichtet.

$$v_t = \frac{1}{dt}\sqrt{(x_{t+1} - x_t)^2 + (y_{t+1} - y_t)^2 + (z_{t+1} - z_t)^2} \tag{4.1}$$

So erhält man für jedes Zeitintervall beziehungsweise für jeden Frame die Geschwindigkeit, mit der das Instrument innerhalb eines Zeitfensters bewegt wurde. Werden nun innerhalb einer Aufnahme alle errechneten Geschwindigkeitswerte gemittelt, so erhält man einen Einzahlwert, der als die Aktivität der Bewegung interpretiert werden kann. Dieser Einzahlwert, auch Motion Index genannt, wurde für jede Aufnahme eines Instruments berechnet. Des Weiteren wurde der Motion Index jeweils unter allen Aufnahmen, die im Stehen beziehungsweise im Sitzen gespielt wurden, gemittelt. In der Tabelle 4.1 sind die Durchschnittswerte für die Geschwindigkeit, mit der ein Instrument im Stehen beziehungsweise im Sitzen gespielt bewegt wurde, beginnend bei dem am schnellsten bewegten Instrument in absteigender Reihenfolge dargestellt. Grundsätzlich fällt auf, dass bei allen Aufnahmen, welche im Sitzen gespielt wurden, mit Ausnahme der Klarinette1, eine geringere Durchschnittsgeschwindigkeit des Instruments vorlag, als bei den entsprechenden, im Stehen gespielten Aufnahmen. Bei der ersten Klarinette wurde das Instrument im Stehen gespielt mit der gleichen Durchschnittsgeschwindigkeit wie in der sitzenden Spielweise bewegt. Große Unterschiede in der Aktivität der Bewegung innerhalb des gleichen Instruments kann man ebenso der Klarinette entnehmen. Sowohl in den sitzenden, als auch in den stehenden Aufnahmen wurde die Klarinette von dem zweiten Musiker (Klarinette2) viel weniger bewegt als von dem ersten Musiker (Klarinette1). Betrachtet man die übrigen Instrumente, so fallen innerhalb gleicher Instrumente, die von verschiedenen Musikern gespielt wurden zwar Unterschiede in der Durchschnittsgeschwindigkeit

auf, diese sind jedoch im Vergleich zu der Klarinette relativ gering. Die Blechblasinstrumente (Horn, Trompete, Posaune) wurden sowohl bei den sitzenden Aufnahmen, als auch bei den stehenden Aufnahmen nur wenig bewegt und weisen eine geringe Durchschnitsgeschwindigkeit auf, welche bei den sitzenden Aufnahmen nur durch die Violoncelli unterboten wurden.

Da bei einer bewegten Quelle vor allem die Orientierung das Klangergebnis maßgeblich beeinflusst, wurde für jedes Instrument der Bewegungsumfang (auch Range genannt) für die verschiedenen Eulerwinkel Yaw, Pitch und Roll berechnet (siehe Abbildung 3.15 zur Interpretation der Eulerwinkel). Ist dieser Bewegungsumfang groß, so lagen während einer Aufnahme der Bewegungsdaten große Unterschiede in der Orientierung vor, welche zusammen mit der instrumentenspezifischen Abstrahlcharakteristik zu erheblichen Klangunterschieden führen können. Um diesen Bewegnungsspielraum zu berechnen mussten die Aufnahmen der Trompete, die von dem zweiten Musiker gespielt wurde, gesondert bearbeitet werden. In diesen Aufnahmen wurde das Instrument in Spielpausen immer wieder abgesetzt, so dass extrem große Werte für den Bewegungsumfang der Eulerwinkel vorlagen, obwohl der Bewegungsumfang bei dem tatsächlichen Spielen des Instruments weitaus geringer war. So wurden diejenigen Bereiche in einer Aufnahme, in welchen die Trompete nicht gespielt sondern abgesetzt wurde für die Berechnung der statistischen Werte aus den Aufnahmen herausgeschnitten. Um sicherzustellen, dass keine Ausreißer beziehungsweise nur einmalig oder kurzzeitig aufgetretenen Extremorientierungen in die statistische Betrachtung miteinbezogen werden, wurde neben dem eigentlichen Bewegungsumfang in Yaw, Pitch und Roll jeweils der Median dieser Werte sowie das erste und das zweite Quantil für den Quantilabstand Q_5 - Q_{95} berechnet. Zur Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Spielweisen wurden die relativen Positions- und Orienterungswerte (siehe Abschnitt 3.3.5) für die Berechnung des Quantilabstandes bei denjenigen Aufnahmen, welche im Stehen beziehungsweise im Sitzen gespielt wurden, jeweils zusammengefügt und als ein Ganzes betrachtet. Nachdem die relativen Orientierungsdaten durch Subtraktion des Median von allen darauf folgenden Werten berechnet wurden, beschreibt der Interquantilabstand hier den Orientierungsumfang um diejenige Orientierung, welches das Instrument am häufigsten aufwies (Hauptorientierung). In den Tabellen 4.2 und 4.3 ist für jedes Instrument der Interquantilabstand (Q_5 - Q_{95}) der Orientierungswerte Yaw, Pitch und Roll der Größe nach Yaw und nach Pitch sortiert, dargestellt. Zieht man einen Vergleich zwischen den im Stehen und im Sitzen gespielten Aufnahmen, so so fällt auf, dass der Interquantilabstand im Stehen meist größer ist. Außnahmen bilden hierbei die beiden Klarinetten sowie die beiden Fagotte. Der Orientierungsumfang bezogen auf Yaw und Roll ist hier im Sitzen zwar auch geringer, betrachtet man jedoch die Pitch Werte so liegen in den im Sitzen gespielten Aufnahmen bei diesen Instrumenten

Tabelle 4.1: Durchschnittsgeschwindigkeit (Motion Index) mit der ein Instrument bewegt wurde.

Instrument	Motion Index (stehend) [m/s]	Instrument	Motion Index (sitzend) [m/s]
Klarinette 1	0.2566	Klarinette 1	0.2566
Oboe 1	0.2534	Viola 2	0.1946
Viola 2	0.2296	Querflöte 2	0.1935
Oboe 2	0.2199	Querflöte 1	0.1809
Querflöte 1	0.2033	Oboe 2	0.1797
Fagott 1	0.1994	Oboe 1	0.1563
Querflöte 2	0.1958	Viola 1	0.1416
Violine 1	0.1753	Fagott 1	0.1333
Violine 2	0.1431	Fagott 2	0.1139
Fagott 2	0.1333	Violine 2	0.1083
Kontrabass 1	0.1171	Violine1	0.1043
Klarinette 2	0.0963	Klarinette 2	0.0811
Trompete 1	0.0867	Trompete 1	0.0669
Horn 2	0.0858	Trompete 2	0.0604
Trompete 2	0.0756	Horn 2	0.0600
Posuane 1	0.0726	Posaune 1	0.0506
Horn 1	0.0693	Horn 1	0.0478
-	-	Violoncello 2	0.0204
-	-	Violoncello 1	0.0196

größere Abstände vor. Im Sitzen gespielt ist der Orientierungsumfang dieser Instrumente nach links und rechts (Yaw) also geringer, nach oben und unten hingegen (Pitch) größer. Eine weitere Ausnahme ist die zweite Querflöte, bei der zwischen den im Sitzen und im Stehen gespielten Aufnahmen kaum Unterschiede im Bewegungsumfang zu erkennen sind. Nachdem die Violoncelli und der Kontrabass fest auf dem Boden stehen verwundert es hier nicht, dass der Interquantilabstand bei diesen Instrumenten gering ist. Mit Blick auf die Tabelle 4.2 kann man feststellen, dass bei den Violinen, bei den Hörnern, bei den Klarinetten sowie bei den Querflöten innerhalb des gleichen Instruments größere Unterschiede im Orientierungsumfang des Winkels Yaw sowohl im Sitzen, als auch im Stehen gespielt, vorliegen. Das erste Fagott weist im Stehen gespielt für alle Winkel einen größeren Interquantilabstand als das zweite Fagott auf, im Sitzen gespielt hingegen liegen zwischen dem ersten und dem zweiten Musiker bei diesem Instrument kaum Unterschiede vor. Des Weiteren lag in den Aufnahmen der zweiten Viola, im Sitzen gespielt, ein mehr als doppelt so großer Orientierungsumfang in Yaw als bei der ersten Viola vor. Betrachtet man Tabelle 4.3 so kann man grundsätzlich feststellen, dass die Unterschiede im Interquantilabstand innerhalb des gleichen Instruments bezogen auf den Pitch-Wert weniger stark ausgeprägt sind wie bei den Yaw-Werten. So ist der Interquantilabstand in Yaw bei der ersten Violine um mehr als dreiundzwanzig (23) Grad größer als bei der zweiten Violine, die größten Unterschiede in Pitch innerhalb des gleichen Instruments liegen bei den Querflöten sowie bei dem ersten und zweiten Fagott, im Stehen gespielt, vor und betragen hier jedoch nur in etwa acht (8) Grad.

Neben der Geschwindigkeit der Bewegung beziehungsweise dem Motion Index und neben dem Interquantilabstand wurden noch weitere Kennwerte sowohl für jede Aufnahme einzeln, als auch für die stehenden und die siztenden Aufnahmen jeweils gemeinsam betrachtet, berechnet. So wurde der Median, der Mittelwert und die Standardabweichung jeweils für die Positions- und die Orientierungsdaten (Euler-Winkel) ermittelt. Zusätzlich zu dem tatsächlichen Bewegungsumfang der Eulerwinkel wurden jeweils das erste und zweite Quantil für den Quantilabstand Q_5 - Q_{95} (siehe Tabelle 4.2 und 4.3), Q_{10} - Q_{90} und Q_{25} - Q_{75} (siehe Tabelle A.1 und A.2) berechnet sowie eine Korrelationsanalyse der Eulerwinkel durchgeführt. All diese Werte können einem Tabellendokument, das dieser Arbeit beiliegt, entnommen werden.

Tabelle 4.2: Interquantilabstand Q_5 - Q_{95} der Eulerwinkel. Sortierung der Werte nach Yaw (siehe Abbildung 3.16).

Instrument	Q_5 - Q_{95} [°] - stehend (**Yaw**, Pitch, Roll)	Instrument	Q_5 - Q_{95} [°] - sitzend (**Yaw**, Pitch, Roll)
Kontrabass 1	**3.23**, 6.30, 9.74	Cello 2	**2.46**, 1.09, 5.01
Posaune 1	**7.61**, 20.78, 6.77	Posaune 1	**3.02**, 20.39, 7.14
Klarinette 2	**8.01**, 18.22, 12.69	Cello 1	**3.78**, 1.82, 5.58
Fagott 2	**11.15**, 9.59, 12.66	Klarinette 2	**6.38**, 27.14, 11.78
Horn 1	**11.54**, 10.16, 12.29	Fagott 2	**8.92**, 14.91, 10.34
Querflöte 2	**15.30**, 31.35, 16.94	Fagott 1	**8.96**, 20.08, 12.52
Fagott 1	**19.60**, 17.90, 21.08	Horn 1	**9.03**, 10.32, 6.06
Horn 2	**21.30**, 16.69, 13.96	Trompete 1	**12.31**, 15.49, 12.31
Klarinette 1	**22.84**, 24.13, 34.75	Violine 2	**13.12**, 34.86, 20.15
Trompete 2	**23.34**, 20.07, 18.82	Klarinette 1	**13.36**, 35.84, 21.72
Violine 2	**23.67**, 30.91, 25.59	Horn 2	**14.07**, 12.30, 7.59
Trompete 1	**25.05**, 22.99, 8.59	Viola 1	**15.99**, 14.73, 20.87
Oboe 2	**25.21**, 26.97, 28.60	Oboe 2	**16.42**, 21.67, 15.43
Viola 2	**30.88**, 24.05, 26.77	Querflöte 2	**16.58**, 31.79, 19.62
Oboe 1	**32.28**, 32.50, 26.37	Oboe 1	**17.75**, 23.35, 14.75
Querflöte 1	**32.71**, 39.86, 28.22	Trompete 2	**20.52**, 20.81, 11.94
Violine 1	**46.83**, 32.85, 32.16	Violine 1	**29.99**, 29.54, 31.57
		Viola 2	**32.26**, 21.34, 26.79
		Querflöte 1	**34.00**, 36.07, 28.47

Tabelle 4.3: Interquantilabstand Q_5 - Q_{95} der Eulerwinkel. Sortierung der Werte nach Pitch (siehe Abbildung 3.16).

Instrument	Q_5 - Q_{95} [°] - stehend (Yaw, **Pitch**, Roll)	Instrument	Q_5 - Q_{95} [°] - sitzend (Yaw, **Pitch**, Roll)
Kontrabass 1	3.23, **6.30**, 9.74	Cello 2	2.46, **1.09**, 5.01
Fagott 2	11.15, **9.59**, 12.66	Cello 1	3.78, **1.82**, 5.58
Horn 1	11.54, **10.16**, 12.29	Horn 1	9.03, **10.32**, 6.06
Horn 2	21.30, **16.69**, 13.96	Horn 2	14.07, **12.30**, 7.59
Fagott 1	19.60, **17.90**, 21.08	Viola 1	15.99, **14.73**, 20.87
Klarinette 2	8.01, **18.22**, 12.69	Fagott 2	8.92, **14.91**, 10.34
Trompete 2	23.34, **20.07**, 18.82	Trompete 1	12.31, **15.49**, 12.31
Posaune 1	7.61, **20.78**, 6.77	Fagott 1	8.96, **20.08**, 12.52
Trompete 1	25.05, **22.99**, 8.59	Posaune 1	3.02, **20.39**, 7.14
Viola 2	30.88, **24.05**, 26.77	Trompete 2	20.52, **20.81**, 11.94
Klarinette 1	22.84, **24.13**, 34.75	Viola 2	32.26, **21.34**, 26.79
Oboe 2	25.21, **26.97**, 28.60	Oboe 2	16.42, **21.67**, 15.43
Violine 2	23.67, **30.91**, 25.59	Oboe 1	17.75, **23.35**, 14.75
Querflöte 2	15.30, **31.35**, 16.94	Klarinette 2	6.38, **27.14**, 11.78
Oboe 1	32.28, **32.50**, 26.37	Violine 1	29.99, **29.54**, 31.57
Violine 1	46.83, **32.85**, 32.16	Querflöte 2	16.58, **31.798**, 19.62
Querflöte 1	32.71, **39.86**, 28.22	Violine 2	13.12, **34.86**, 20.15
		Klarinette 1	13.36, **35.84**, 21.72
		Querflöte 1	34.00, **36.07**, 28.47

4.2 Auswertung und Auralisation

In diesem Kapitel wird zunächst die Raumakustik-Simulationssoftware Raven vorgestellt. Anschließend wird in Abschnitt 4.2.2 die virtuelle Umgebung beziehungsweise das 3D-Computermodell, das zur Simulation von Raumimpulsantworten verwendet wird, eingeführt. In Abschnitt 4.2.3.1 wird erläutert, wie ein Vergleich der verschiedenen Quellorientierungen hinsichtlich eines Klangunterschiedes durchgeführt wird und in Abschnitt 4.2.3.3 werden die Simulationsergebnisse grafisch dargestellt. In Kapitel 4.2.4 wird beschrieben, wie die bei den Live-Auftritten der Orchesterinstrumente aufgezeichneten Bewegungsdaten sowie Audioaufnahmen für eine Auralisation der Live-Auftritte verwendet wurden und es werden Hörbeispiele der Simulation der bewegten Schallquellen gegeben.

4.2.1 Akustik-Simulationssoftware Raven

Raven (Room Acoustics for Virtual Environments) ist eine echtzeitfähige Akusik-Simulationssoftware, welche an der RWTH Aachen entwickelt wurde [24]. Raumakustische Berechnungen werden in dieser Software durch Hybride Verfahren durchgeführt. Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, dient hierbei die deterministische Spiegelschallquellenmethode dazu frühe, geometrische Reflexionen zu berechnen. Dieses Verfahren wird mit dem stochastischen Simulationsverfahren des Ray-Tracings für eine adäquate Nachbildung des Nachhalls in Räumen kombiniert. Für eine physikalisch korrekte Simulation der Schallausbreitung werden in dieser Software wichtige Welleneffekte wie die Schallstreuung, die Schallbeugung sowie die Luftschalldämmung zwischen Räumen in Betracht gezogen. Als Besonderheiten dieser Simulationssoftware kann die Möglichkeit zur direkten Änderung und Manipulation der virtuellen Umgebung selbst sowie die Simulation einer bewegten Schallquelle und eines sich bewegenden Empfänger in Echtzeit genannt werden. Da vor allem die Möglichkeit, eine bewegte Schallquelle zu simulieren für diese Arbeit interessant ist, wird im Folgenden beschrieben, wie die Bewegung des Empfängers (Rotation und Translation des Kopfes) sowie der Quelle (Rotation und Translation der Schallquelle) durch Aufteilung des Hybriden Verfahrens in einzelne Simulationsschritte bei einer festen Raumgeometrie in Echtzeit berechnet werden kann. Betrachtet man die Spiegelschallquellenmethode, so werden in einem ersten Schritt alle Spiegelschallquellen der Schallquelle bis zu einer bestimmten Reflexionsordnung vorberechnet und abgespeichert. So lange sich die Primärschallquelle nicht bewegt (Translation) und die Raumgeometrie unverändert bleibt müssen die Spiegelschallquellen nicht neu berechnet werden. Um die Bewegung der Schallquelle und des Empfängers nun zu simulieren, wird die Spiegelschallquellenmethode in Teilschritte unterteilt. Eine Translation der

Spiegelschallquelle muss durchgeführt werden, sobald eine Translationsbewegung der Primärschallquelle vorliegt. Die Positionen der 'neuen' Spiegelschallquellen erhält man mit Hilfe eines Verschiebungsvektors, der auf die ursprüngliche Positionen der Spiegelschallquellen addiert wird. Dieser Verschiebungsvektor wiederum wird durch eine Multiplikation desjenigen Vektors, der die Verschiebung der Primärschallquelle beschreibt mit einer Spiegelschallquellen-abhängigen Translationsmatrix, berechnet. Anschließend wird ein Test auf Hörbarkeit der neuen Spiegelschallquellen durchgeführt. Für jede hörbare Spiegelschallquelle wird nun ein Filter konstruiert, welches aus einer Multiplikation von oberflächenspezifischen Übertragungsfunktionen, dem Abstrahlverhalten der Schallquelle und der kopfbezogenen Übertragungsfunktionen des Empfängers besteht. Unter Rücksichtnahme auf die unterschiedlichen Verzögerungen des Eintreffens einer Spiegelschallquelle bei dem Empfänger erhält man die binaurale Raumimpulsantwort durch einfache Addition des Beitrags einer jeden Schallquelle. Liegt eine Translationsbewegung des Empfängers vor, so müssen die Spiegelschallquellen nicht neu berechnet werden. In diesem Fall ist nur ein erneuter Test der Spiegelschallquellen auf Hörbarkeit an der neuen Empfängerposition notwendig. Wird der Empfänger oder die Schallquelle rotiert so bleiben die hoȓbaren Spiegelschallquellen unverändert. Im Falle der Rotation werden die Übertagungsfunktion der Abstrahlcharakteristik und die kopfbezogenen Übertragungsfunktion entsprechend der neuen Orientierung ausgewählt, so dass die binaurale Raumimppulsantwort bei Rotation der Quelle oder des Empfängers schnell neu berechnet werden kann. Bei dem Verfahren der Strahlenverfolung muss bei einer Rotation des Empfängers oder der Schallquelle ähnlich wie bei der Spiegelschallquellenmethode nur eine Neuberechnung der binauralen Raumimpulsantwort durchgeführt werden, so dass die Rotationsbewegung weniger zeitintensiv als die Translationsbewegung ist. Wird der Empfänger rotiert, so muss nur eine Rotation des binauralen Energie-Detektors um den gleichen Winkel vorgenommen werden. Wird hingegen die Schallquelle rotiert, so werden alle Reflexionspfade, welche den Detektor zuvor getroffen haben gespeichert und es wird eine Gewichtung der Energie eines jeden Pfades entsprechend der rotierten Abstrahlcharakteristik der Schallquelle vollzogen. Findet hingegen eine Translation der Schallquellenposition statt, so verändert sich der Reflexionspfad eines jeden Partikels oder Strahls. Dies hat zur Folge, dass eine neue Strahlenverfolgung gestartet werden muss, so dass die Translation der Schallquellenposition am zeitintensivsten ist.

4.2.2 Simulation von Impulsantworten für verschiedene Orientierungen der Quelle

Um den Einfluss einer unterschiedlichen Orientierung der Schallquelle auf das Klangergebnis beurteilen zu können, wurden für jedes Instrument aus den in Abschnitt 3.3.5 beschriebenen relativen Bewegungsdatensätzen verschiedene Orientierungswerte für die Simulation ermittelt. Im Speziellen wurde das erste und das dritte Quantil jeweils der Ordnung 1/4 und 3/4 (entsprechend 25 % und 75%), 1/10 und 9/10 (entsprechend 10% und 90%), sowie 5/100 und 95/100 (entsprechend 5% und 95%), aus den relativen Bewegungsdaten eines jeden Instruments berechnet. Den Tabellen A.3 bis A.5, die im Anhang aufgeführt sind, kann man für jedes Instrument die Quantilwerte für die Orientierung (Yaw, Pitch Roll) entnehmen. Nachdem der relative Bewegungsdatensatz durch Subtraktion des Median der Bewegungsdaten von allen darauf folgenden Werten gebildet wurde, ist das zweite Quantil, also der Median, bei allen Instrumenten gleich Null (Yaw, Pitch, Roll). Bei der Messung der Abstrahlcharakteristik der Instrumente (siehe Abschnitt 2.2) wurden die Musiker darauf hingewiesen, eine natürliche Spielhaltung ihres Instruments einzuhalten. Für die aus den Messergebnissen der Abstrahlcharakteristik erstellten Balloon-Daten der Instrumente gilt nun, dass ein Vorwärts-Vektor von [0,0,1] und ein Oben-Vektor von [0,1,0], entsprechend einer relativen Orientierung von Null (Yaw, Pith Roll), dieser natürlichen Spielhaltung entsprechen. Durch den Vergleich der Quantil-Orientierungen mit unterschiedlichen Interquantilabständen untereinander wird also im weiteren Verlauf dieser Arbeit ein Vergleich der natürlichen Spielhaltung des Instruments (zweites Quantil beziehungsweise Median der relativen Bewegungsdaten) zu den Extremorientierungen des ersten und des dritten Quantils unterschiedlicher Ordnungen gezogen.
In den nächsten Abschnitten wird beschrieben, wie die Simulation der Impulsantworten in Raven für diese unterschiedlichen Orientierungen der Instrumente durchgeführt wurde.

4.2.2.1 Virtuelle Umgebung - 3D Modell

Die Akustiksimulationssoftware Raven wird in Verbindung mit der 3D-Grafiksoftware SketchUp von Google verwendet (siehe Anhang A). SketchUp dient hierbei zur Erstellung eines dreidimensionalen Modells am Compter. Im Speziellen wurde für die Simulation der Raumimpulsantworten ein 3D-Raummodell eines Konzertsaals in Amsterdam (Concertgebouw, siehe Anhang A) verwendet, das in den Abbildungen 4.1 und 4.2 zu sehen ist. In einem ersten Schritt wurde der Hallradius, also derjenige Abstand von der Schallquelle, für den gilt, dass die Direktschall- und die Diffusschallenergiedichte gleich groß ist, mit Formel 4.2, welche für eine Schallquelle

mit kugelförmiger Richtcharakteristik gilt, aus der äquivalenten Absorptionsfläche A des Konzertsaals berechnet [1].

$$r_H = \sqrt{\frac{A}{16\pi}} \tag{4.2}$$

Die Position und die Orientierung des Empfängers bleibt im weiteren Verlauf unverändert und wird im Folgenden beschrieben: Der Empfänger sitzt mittig im Konzertsaal mit einer Kopfhöhe von 1.30 Metern. Damit das Simulationsergebnis im Konzertsaal nicht weitestgehend durch den Direktschallanteil gebildet und der Raumeinfluss nicht vernachlässigt wird, wird der Abstand des Empfängers zur Schallquelle dem doppelten Hallradius (in etwa zehn (10) Meter) gleichgesetzt. Der Empfänger sieht geradeaus in Richtung Bühne (Vorwärts-Vektor [0, 0, 1], Oben-Vektor [0, 1, 0]).
Die Schallquelle ist ebenfalls mittig im Raum jedoch auf der Bühne platziert. Die Höhe der Schallquelle entspricht der Bünhenhöhe (1.40 Meter) addiert mit derjenigen Höhe, welche bei der Messung eines jeden Instruments am Häufigsten auftrat (Median des y-Positionswertes). Wie in dem letzten Abschnitt beschrieben wird für jedes Instrument eine Raumimpulsantwort für die natürliche Spielhaltung des Instruments (Median der relativen Bewegungsdaten beziehungsweise 2. Quantil) sowie für die in den Tabellen A.3 bis A.5 dargestellten Abweichungen von der natürlichen Spielhaltung in Form von Quantilen verschiedener Ordnung simuliert.
Das Concertgebouw in Amsterdam kann als klassisches Fallbesispiel eines Konzertsaals der Form eines „Schuhkartons“ genannt werden. Der Konzertsaal zeichnet sich durch eine schmale (ca. 27 Meter) Rechteckform aus, an deren einem Ende das Orchester platziert ist. Das Publikum sitzt auf einem flachen Parkett. Um den Konzertsaal etwas näher zu beschreiben ist in Tabelle 4.4 die Nachhallzeit nach Eyring des unbesetzten Saales (Volumen von 22712 m^3) in Terzschritten dargestellt.

Tabelle 4.4: Nachhallzeit nach Eyring im unbesetzten Konzertsaal (Concertgebouw).

F [Hz]	20	25	34.5	40	50	63	80	100	125	160	200
T [s]	2.91	2.91	2.91	2.88	2.86	2.84	2.77	2.70	2.64	2.52	2.40

F [Hz]	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500
T [s]	2.30	2.30	2.30	2.29	2.30	2.30	2.30	2.28	2.25	2.22	2.28

F [Hz]	3150	4000	5000	6350	8000	10000	12500	16000	20000
T [s]	2.34	2.41	2.36	2.32	2.28	2.08	1.91	1.76	1.76

Als ein Grund für die relativ hohe mittlere Nachhallzeit des Konzertsaals von 2.41 Sekunden kann die Tatsache, dass das Publikum auf einem flachen Parkett ohne

Steigung angeordnet ist, genannt werden. Zusätzlich befinden sich im oberen Volumen des Konzertsaals nur gering absorbierenden Materialien [10].
Um in einem zweiten Fall den Direktschall der Musikinstrumente ohne Raumeinfluss beurteilen zu können, wurde das gleiche 3D-Modell, diesmal jedoch mit komplett absobierenden Raumbegrenzungsflächen erstellt. Dieses Modell entspricht einer nachhallfreien Umgebung und wird im Folgenden mit RAR (reflexionsarmer Raum) bezeichnet.

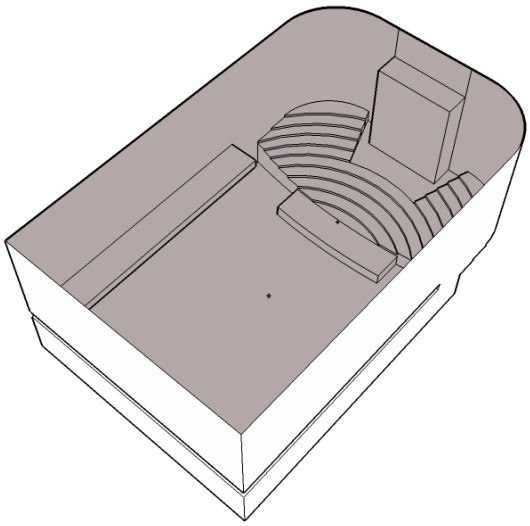

Abbildung 4.1: 3D-Computermodell (SketchUp).

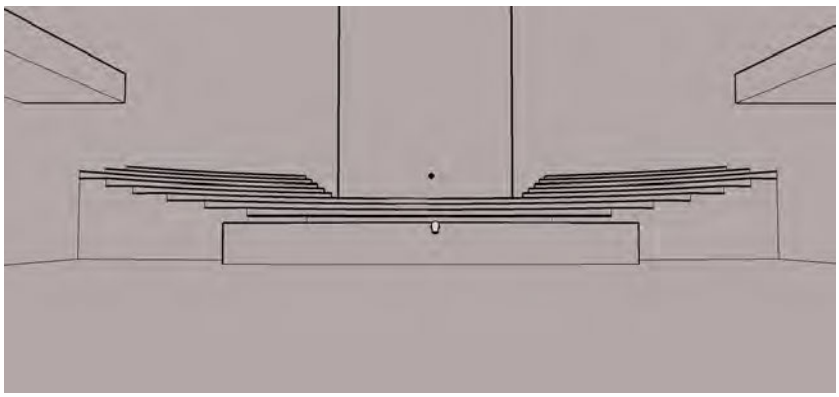

Abbildung 4.2: 3D-Computermodell aus Sicht des Empfängers (SketchUp).

4.2.2.2 Simulationsparameter

In diesem Abschnitt werden in Kürze die für die Simulation der Raumimpulsantworten gesetzten Simulationsparameter dargestellt. Wie in Abschnitt 4.2.1 beschrieben wird in Raven ein Hybrides Verfahren zur Simulation eingesetzt. Die Berechnung der Impulsantwort basiert hierbei also auf einem Ray-Tracing Verfahren sowie auf der Spiegelschallquellenmethode. Die Ordnung der Primär- sowie Sekundärschallquellen der Spiegelschallquellen wird zu Beginn der Simulation auf den Wert zwei (2) festgelegt. Für die Anzahl an Partikeln, welche von der Schallquelle bei dem Verfahren des Ray-Tracing ausgesendet wird, steht in Raven eine Funktion zur Verfügung, die unter anderem abhängig vom Raumvolumen einen Vorschlag zum Setzten dieses Wertes liefert. So wurde sowohl für die Simulation im Concertgebouw, als auch für den nachhallfreien Fall (RAR) die Anzahl an ausgesendeten Partikeln beziehungsweise Strahlen auf 77138 gesetzt. Nachdem die Filterlänge mindestens einen Wert annehmen muss, der so groß wie die Nachhallzeit ist, wird die maximale Nachhallzeit (über alle Frequenzen) ausgewählt und mit dem Wert 1.2 multipliziert. So wird die Filterlänge für die Simulation im Konzertsaal auf 3485 Millisekunden festgelegt. Da im Fall des nachhallfreien Modells (RAR) die Nachhallzeit den Wert Null beträgt, wird hier eine feste Filterlänge von 500 ms bestimmt. Nachdem das Raumvolumen als relativ groß angesehen wird ($V = 20712m^3$), wird eine zeitliche Auflösung von 13 Millisekunden für die Länge eines Zeitfensters festgelegt (typische Werte variieren zwischen 10 und 15 Millisekunden).

4.2.3 Vergleich der simulierten Impulsantworten

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die simulierten Impulsantworten bearbeitet wurden, um einen Vergleich der verschiedenen Quellorientierungen eines Instruments hinsichtlich einer Klangmodulation führen zu können.

4.2.3.1 Vergleich der natürlichen Spielhaltung mit Extremorientierungen anhand des Amplitudenfrequenzganges

Nachdem für die natürliche Spielhaltung eines Instruments sowie für die in den Tabellen A.3 bis A.6 dargestellten Extremorientierungen eines jeden Instruments die Raumimpulsantworten in dem 3D-Modell des Konzertsaales (Concertgebouw) und in dem nachhallfreie Modell (RAR) jeweils für die stehende und die sitzende Spielweise berechnet wurden, wird in diesem Abschnitt beschrieben, wie diese Raumimpulsantworten grafisch miteinander verglichen werden. Da vor allem der Klangunterschied zwischen den Extremorientierungen eines Instruments und der natürlichen

Spielhaltung von Interesse ist, wird eine grafische Darstellung der Differenz beziehungsweise der Abweichung im Amplitudenfrequenzgang der Impulsantwort einer jeden Extremorientierung zu der Impulsantwort der natürlichen Spielhaltung erstellt. Hierzu wird eine komponentenweise Division der Impulsantwort der natürlichen Spielhaltung mit den Impulsantworten der Extremorientierungen im Frequenzbereich durchgeführt. Die Darstellung der Differenz der Amplitudenfrequenzgänge folgt in Abschnitt 4.2.3.3. Die Impulsantworten des Konzertsaals (Concertgebouw) wurden vor dieser Division mit einer am Fachgebiet Audiokommunikation programmierten Matlab Funktion im spektralbereich über eine Dritell-Oktave geglättet. In Abbildung 4.3 kann man den Amplitudenfrequenzgang der ersten Oboe im Stehen für die natürliche Spielhaltung vor und nach dem Glätten sehen.

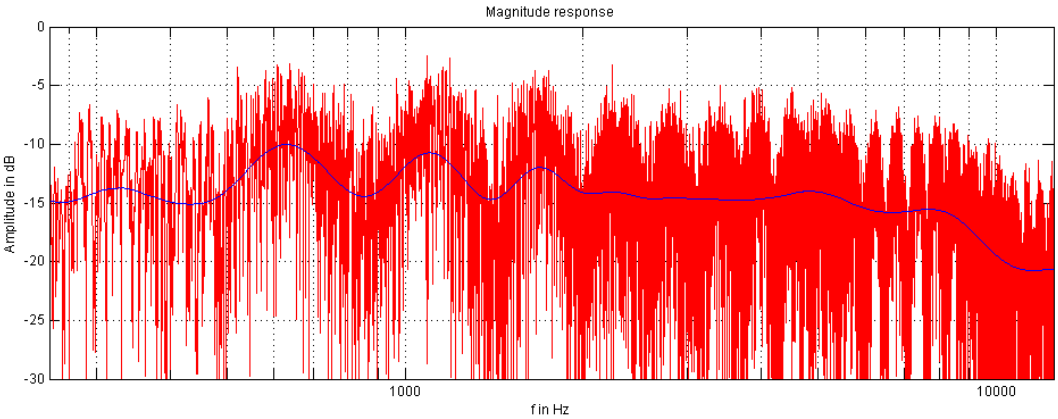

Abbildung 4.3: Frequenzgang der simulierten Impulsantwort (Concertgebouw) der ersten Oboe im Stehen für die natürliche Spielhaltung. Rot vor und blau nach der spektralen Glättung.

4.2.3.2 Terzbankfilterung der Impulsantworten

Neben der soeben beschriebenen grafischen Auswertung des Klangunterschiedes verschiedener Orientierungen der Quellen wird jede simulierte Impulsantwort einer Terzbankfiterung unterzogen. Im Speziellen wird eine Terzfilterbank in Matlab, welche frei verfügbar ist und von Christophe Couvreur programmiert wurde, verwendet ($oct3bankFc.m$). Diese nach ANSI S1.11-1986 standardisierte Terzfilterbank liefert nach Eingabe eines Zeitsignals, einer Abtastrate sowie einem Vektor, der die zu filternden Terzmittenfrequenzen beschreibt, den Effektivwert der Leistung (rms power) über die entsprechenden Terzbänder zurück. Nachdem die Filterfrequenzen digitaler Filter im Verhältnis zu der Abtastrate definiert sind und die von Christophe Couvreur programmierte Funktion auf einer Reihe von Butterworthfiltern dritter Ordnung basiert, neigen diese Filter dazu einerseits bei sehr tiefen und andererseit

bei sehr hohen Frequenzen instabil zu werden. Für ein korrektes Filterdesign muss folgende Gleichung eingehalten werden [9]:

$$\frac{f_s}{200} < f_m < \frac{f_s}{5} \tag{4.3}$$

Nachdem die Impulsantworten in Raven mit einer Abtastfrequenz von 44.1 kHz simuliert wurden, sollte die Auswertung dieses Signals nur in einem Bereich von

$$220.5Hz < f_m < 8820Hz$$

durchgeführt werden. Um nun einen größeren Frequenzbereich auswerten zu können, wurde jede Impulsantwort zusätzlich mit zwei weiteren Abtastraten erstellt. Mit der Matlabfunktion $'decimate.m'$ wird ein Downsampling des Eingangssignals mit dem Faktor 4 auf eine Abtastfrequenz von 11025 Hz durchfgeführt. Hier gilt:

$$55.2Hz < f_m < 2205Hz$$

Die Matlabfunktion $'resample.m'$ hingegen wird dazu verwendet, die Abtastrate der Impulsantwort auf 88.2 kHz zu erhöhen so dass gilt:

$$441.5Hz < f_m < 17640Hz$$

Die Terzbandfilterung erfolgt mit einer Abtastrate von 11025 Hz für Terzmittenfrequenzen im Bereich von 60-250 Hz, der Frequenzbereich von 315-6350 Hz wird mit der originalen Abtastfrequenz von 44.1 kHz und Terzmittenfrequenzen im Bereich von 8-16 kHz werden mit einer Abtastrate von 88.2 kHz gefiltert. Für jede simulierte Impulsantwort wird der Effektivwert der Leistung über alle Terzbänder ermittelt. Anschließend wird eine Differenz aus den terzgefilterten Werten der natürlichen Spielhaltung zu den Werten der davon abweichenden Extremorientierungen berechnet sowie pro Terzband jeweils die maximale Abweichung aller Impulsantworten untereinander ermittelt.

4.2.3.3 Darstellung der Ergebnisse

In Abbildung 4.4 ist exemplarisch der Amplitudenfrequenzgang der simulierten Impulsantworten für sämtliche verschiedene Quellorientierungen der zweiten Trompete im Konzertsaal, bei stehender Aufführung, dargestellt.

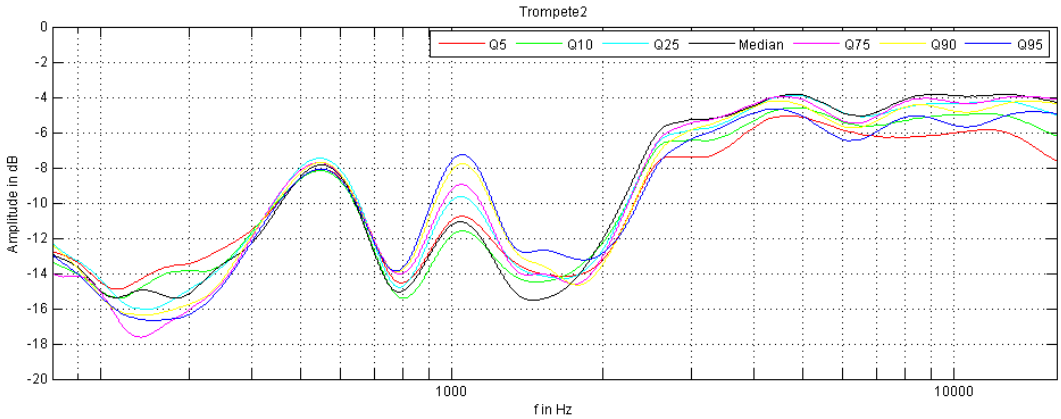

Abbildung 4.4: Amplitudenfrequenzgang der simulierten Impulsantworten verschiedener Quellorientierungen (Trompete 2, stehende Aufführung im Konzertsaal).

Wie in Abschnitt 4.2.3.1 beschrieben wird für jedes Instrument, je einmal für die stehende und einmal für die sitzende Aufführung, eine grafische Darstellung der Differenz des Amplitudenfrequenzganges der natürlichen Spielhaltung (Median in Abbildung 4.4) zu den von dieser Haltung abweichenden Extremorientierungen (Quantil-Orientierungen in Abbildung 4.4), einmal für den Konzertsaal (Concertgebouw) sowie für das nachhallfreie Computermodell (RAR), erstellt. Diese kann der Abbildung 4.5 exemplarisch für die zweite Trompete entnommen werden. In den Abbildungen B.1 bis B.19 im Anhang sind die Ergebnisse der übrigen Instrumente dargestellt. Die Kreise, die an den diskreten Frequenzstützstellen eingezeichnet sind, entsprechen hier jeweils der minimalen und maximalen Abweichung der Extremorientierungen von der natürlichen Spielhaltung in Form des terzbankgefilterten Effektivwerts der Leistung (siehe Abschnitt 4.2.3.2). Grundsätzlch kann man in den Abbildungen erkennen, dass die Amplitudendifferenzen im nachhallfreien Modell bei allen Instrumenten größere Werte annehmen als im Modell des Konzertsaals. Da in dem nachhallfreien Modell keine Reflexionen vorliegen und nur der Direktschall untersucht wird, werden die Ergebnisse der Simulationen hier also durch die Position und Orientierung der Quelle und des Empfängers sowie durch die Abstrahlcharakteristik des Instruments bestimmt. Im Modell des Konzertsaales hingegen ist an der Zuhörerposition (Abstand zur Schallquelle entspricht dem doppelten Hallradius) zusätzlich der Raumeinfluss groß, der Empfänger befindet sich im Diffusfeld.

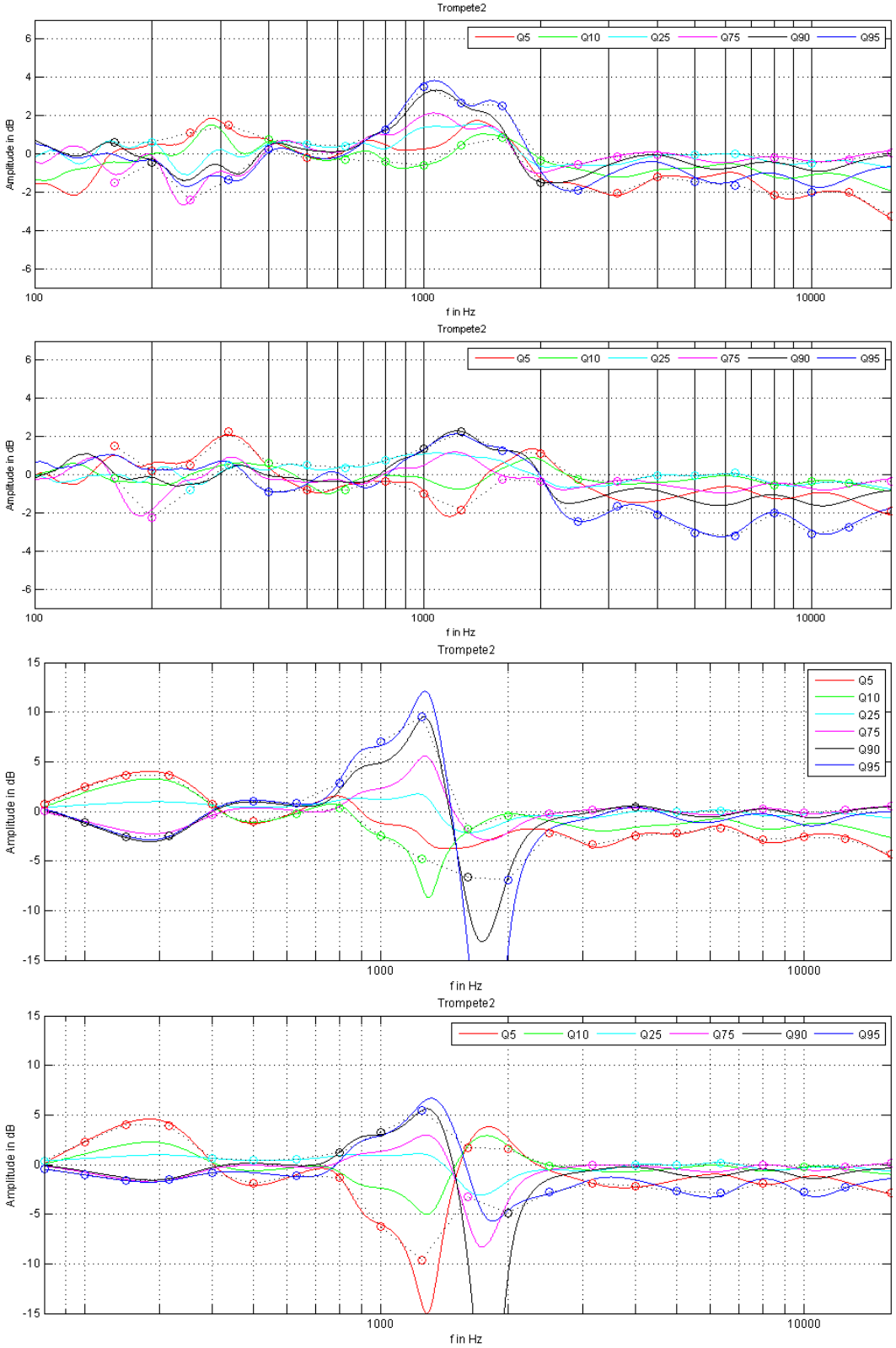

Abbildung 4.5: Trompete 2: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, zweites von Unten: RAR stehend, unten: RAR sitzend.

Um nun den Einfluss der Quellenorientierung bei jedem Instrument genauer zu charakterisieren und um Unterschiede zwischen den im Stehen und den im Sitzen gespielten Aufführungen sowie Unterschiede in den beiden verwendeten Computermodellen aufzudecken, wurde für jedes Instrument die größte maximale Abweichung sowie die geringste maximale Abweichung im Frequenzgang sowie die durchschnittliche maximale Abweichung berechnet. Diese Werte können der Tabelle 4.6 für den Konzertsaal und der Tabelle A.7 für das nachhallfreie Modell entnommen werden. Zusätzlich zu der maximalen und der geringsten Abweichung kann diesen Tabellen auch die jeweilige Terzmittenfrequenz dieser Abweichungen entnommen werden. Man würde grundsätzlich erwarten, dass die maximale Abweichung bei denjenigen Frequenzen vorliegt, bei welchen die Bündelung der Abstrahlung am stärksten ist. Dies tritt jedoch nur ein, wenn die Instrumentenachse beziehungsweise die Richtung stärkster Bündelung der Schallabstrahlung, bei einer der im Vergleich herangezogenen Orientierungen des Instruments, direkt auf die Zuhörerposition zeigt. Wird der Zuhörer beispielsweise von der Trompete bei keiner Orientierung genau anvisiert, so tritt die größte Abweichung im Amplitudengfrequenzgang nicht zu der Frequenz der größter Bündelung der Schallabstrahlung auf (siehe Trompete 2), da diese Frequenz bei keiner Orientierungen des Instruments am Empfängerort extrem laut zu hören ist. Betrachtet man die mittlere Abweichung, also den maximalen Klangunterschied über den gesamten Frequenzbereich, so fällt auf, dass diese im Stehen recht ähnliche, nur unwesentlich größere Werte annimmt, als im Sitzen. Für die Klarinetten, für das zweite Fagott sowie für die zweite Trompete nimmt die mittlere Abweichung im Sitzen sogar geringfügig größere Werte ein, obwohl der Bewegungsumfang im Stehen größer ist. Um die Vermutung, dass die Spielvariation (sitzend oder stehend) im Allgemeinen keinen signifikanten Einfluss auf das Klangergebnis einnimmt, zu untersuchen, werden in einem nächsten Schritt wiederum die mittlerern Abweichungen aller Instrumente je für die stehenden und die sitzenden Aufführungen in den verschiedenen virtuellen Umgebungen gemittelt. Die errechnete mittlere Abweichung aller Instrumente sowie die größten Abweichungen über alle Instrumente gemittelt können der Tabelle 4.5 entnommen werden. Es fällt auf, dass die größte Abweichung über alle Instrumente im Konzertsaal im Stehen um etwa $0.7dB$ größer ist als im Sitzen, in dem nachhallfreien Modell beträgt dieser Unterschied in etwa $1.3dB$. Betrachtet man jedoch die mittlere Abweichung über alle Instrumente, so fällt vor allem im Konzertsaal auf, dass für die stehenden und für die sitzenden Aufnahmen nahezu gleiche Werte vorliegen. In beiden Fällen lässt sich eine höbare Modulation des Klangeindrucks durch typische Bewegungen der Musiker erwarten. Die Tatsache, ob der Musiker während der Aufführung sitzt oder steht scheint hingegen das Ausmaß des Klangunterschiedes über den gesamten Frequenzbereich nicht zu beeinflussen. Für das zweite Computermodell, in dem ausschließlich der Direktschall betrachtet wird, gilt, dass die mittlere Abweichung über alle Instrumente im Stehen ebenfalls

Tabelle 4.5: Dartsellung der mittleren Abweichung sowie des Maximalwertes über alle Instrumente betrachtet.

Raum \Aufführungsart	stehend		sitzend	
	größte Abweichung (std) [dB]	mittlere Abweichung (std) [dB]	größte Abweichung (std) [dB]	mittlere Abweichung (std) [dB]
Concertgebouw	5.07 (1.58)	2.17 (0.82)	4.32 (1.58)	2.11 (0.54)
RAR	14.72 (5.32)	6.32 (3.78)	13.44 (4.74)	5.59 (2.63)

nicht bedeutend größere Werte annimmt als im Sitzen. Die Differenz in der mittleren Abweichung zwischen der stehenden und sitzenden Spielform beträgt hier in etwa $0.7dB$.

Nachdem sowohl bei den sitzenden, als auch bei den stehenden Aufführungen bei allen Instrumenten eine mittlere Abweichung von in etwa einem (1) dB oder mehr vorliegt, lässt sich als Hypothese formulieren, dass der Einfluss der Spielbewegung auf das Klangergebnis bei klassischen Musikinstrumenten hörbar ist. Die Ergebnisse implizieren, dass in der virtuellen Akustik die durch Spielbwegungen hervorgerufene Lebendigkeit in einem Live-Auftritt bisher fehlt. Die bis dato durchgeführte Analyse dieses Einflusses der Spielbewegung wurde durch einen direkten Vergleich der Impulsantworten verschiedener Orientierungen vorgenommen. Die Frage, wie schnell die Positionswechsel der Orientierungen geschehen, und ob dieser fließende Positionswechsel hörbar ist, wurde bisher vernachlässigt. Ebenso wurde nicht berücksichtigt, wie viel Energie zu einem bestimmten Zeitpunkt in einer Audioaufnahme der Live-Aufführung in dem jeweiligen Frequenzband enthalten ist. Um diese Faktoren mit ein zu beziehen, wird in dem nächsten Abschnitt beschrieben, wie eine Auralsisation der Spielbewegung der Live-Aufführung erstellt wird. In dem Abschnitt 5 wird anschließend ein Hörversuch, der die Frage, ob die Spielbewegung hörbar ist, aufzudecken versucht, beschrieben und dessen Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 4.6: Darstellung der Ergebnisse im Konzertsaal (Concertgebouw).

Instrument	größte Abweichung stehend [dB]	Frequenz [Hz]	geringste Abweichung stehend [dB]	Frequenz [Hz]	mittlere Abweichung stehend [dB]	größte Abweichung sitzend [dB]	Frequenz [Hz]	geringste Abweichung sitzend [dB]	Frequenz [Hz]	mittlere Abweichung sitzend [dB]	Frequenzbereich [Hz]
Oboe 1	7.24	8000	0.71	630	3.25	5.25	3150	0.56	630	2.80	250-12000
Oboe 2	7.87	12500	0.82	630	3.47	5.68	3150	0.60	250	2.56	
Klarinette 1	6.61	3150	0.85	500	2.52	6.87	3150	0.81	400	2.95	125-10000
Klarinette 2	4.14	8000	0.85	500	2.00	4.01	2500	1.25	250	2.33	
Fagott 1	3.62	400	0.31	2500	1.77	3.23	12500	0.39	1250	1.67	80-12500
Fagott 2	2.05	315	0.46	2000	1.24	2.67	80	0.49	2000	1.42	
Querflöte 1	7.24	8000	0.41	1250	3.15	7.44	8000	0.71	1000	3.00	250-8000
Querflöte 2	5.20	8000	0.71	800	2.32	6.87	8000	0.75	1000	2.64	
Trompete 1	3.44	16000	0.61	400	2.07	3.09	1000	0.74	500	1.99	160-16000
Trompete 2	4.14	1000	0.70	500	2.00	4.11	1250	1.09	800	2.13	
Posaune	4.05	100	0.57	315	1.54	3.40	10000	0.82	250	2.04	100-10000
Horn 1	3.97	6350	0.70	800	1.67	2.91	800	0.75	400	1.70	60-7000
Horn 2	5.32	6350	0.60	2500	2.03	4.00	6350	0.70	1250	1.94	
Viola 1						4.47	1600	0.84	500	1.80	125-10000
Viola 2	5.05	1600	1.04	2500	2.26	4.05	800	0.75	500	2.11	
Violine 1	6.28	8000	0.81	4000	2.95	4.48	8000	1.13	2500	2.48	200-10000
Violine 2	5.59	10000	0.31	400	2.40	5.15	10000	0.67	400	2.06	
Kontrabass	3.29	6350	0.46	4000	1.81						80-8000
Cello 1						2.91	100	0.48	4000	1.35	80-8000
Cello 2						1.49	630	0.48	2500	0.95	

4.2.4 Auralisation der Live-Auftritte

Wie in Abschnitt 4.2.1 beschrieben, bietet die Akustik-Simulationssoftware Raven die Möglichkeit, eine bewegte Schallquelle und einen bewegten Empfänger zu simulieren. Hierfür gibt es ein Animationsmodul, welches eine blockweise Verarbeitung von Impulsantworten zu neuen Positionen und Orientierungen der Schallquelle und des Empfängers vornimmt sowie die Faltung dieser Impulsantworten mit dem nachhallfreien Audiomaterial durchführt. Sowohl für die Schallquelle, als auch für den Empfänger, wird hierzu jeweils eine Textdatei erstellt. Jede Zeile dieser Textdatei beginnt mit einem Zeitstempel gefolgt von dem Positions- und Orientierungswert (Vorwärt- und Oben-Vektor) zu diesem Zeitpunkt. Nachdem diese Textdateien erstellt wurden, wird zusätzlich eine Initialisierungsdatei (.ini) benötigt, die die Textdatei der Schallquelle und des Empfängers dem Raven-Projekt bekannt macht sowie Pfade zum Einlesen des nachhallfreien Audiomaterials sowie zum Abspeichern der Auralisation angibt. Pro Instrumentengruppe wird jeweils eine Aufführung eines Live-Auftritt gemeinsam mit den bei der Aufführung aufgenommenen Bewegungsdaten des Instruments auralisiert. Wie in Kapitel 4.2.2.1 beschrieben, ist der Empfänger hierbei mittig im Raum, mit geradem Blick auf die Bühne, platziert. Der Abstand des Empfängers, dessen Position und Orientierung wärend der Auralisation unverändert bleibt, zu der sich bewegenden Schallquelle, entspricht mit in etwa zehn (10) Metern dem doppelten Hallradius des Konzertgebäudes. Die Schallquelle wird ebenfalls mittig im Raum, jedoch auf der Bühne platziert (Bünenhöhe 1.40 Meter). Die Höhe der Schallquelle (y-Positionswert) ergibt sich hierbei aus der Höhe der Bühne addiert mit der Median-Höhe des Instruments bei der Messung im Curt-Sachs-Saal. Auf diese Startposition der Schallquelle im 3D-Modell werden anschließend die in Kapitel 3.3.5 beschriebenen relativen Positionswerte addiert und gemeinsam mit den relativen Orientierungsdaten (Vorwärts- und Oben-Vektoren) in die entsprechende Textdatei der Schallquelle eingetragen. Wurden die Textdatei für die Schallquelle und für den Empfänger sowie die Initialisierungsdatei erstellt, so kann die Auralisation durch einen Aufruf in der Windows-Console gestartet werden. Mit Blick auf die Tabelle 4.6 wird jeweils dasjenige Instrument einer Instrumentengruppe für eine Auraliasation ausgewählt, welches beim Vergleich der verschiedenen Quellorientierungen die größte mittlere Abweichung im Amplitudenfrequenzgang über den gesamten Frequenzbereich erzielt. So wird eine im Stehen gespielte Aufnahme der Oboe2 ($3.47dB$) aus der Gruppe der Rohrblattinstrumente, eine stehende Aufführung der Violine1 ($2.95dB$) aus der Gruppe der Streichinstrumente sowie ein im Stehen gespieltes Stück der Trompete1 ($2.07dB$) aus der Gruppe der Blechblasinstrumente auralisiert. Nach der Wahl des Instruments wird jeweils diejenige Auffürung des Musikers auralisiert, in der das Musikinstrument am meisten bewegt wurde (größter Motion Index) sowie den größten Bewegungsspielraum in der Orientierung (Euler-Winkel) aufweist. Die

Auralisation des bewegten Musikinstrumentes wurde für das Computermodell des Konzertsaales (Concertgebouw) sowie für das nachhallfreie Computermodell (RAR) durchgeführt.

5 Hörversuch

Die Ergebnisse aus dem in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Vergleich von simulierten Impulsantworten verschiedener Quellorientierungen implizieren, dass die Spielbewegung eines Musikinstruments auf das Klangergebnis einen hörbaren Einfluss nimmt. Die durch die Spielbewegung hervorgerufene Lebendigkeit einer Live-Aufführung wird in der virtuellen Akustik bisher nicht berücksichtigt. Die Frage, ob die Spielbewegung künftigt Berücksichtigung finden sollte, wird in diesem Kapitel mit Hilfe eines Hörversuchs untersucht, welchem die Hypothese zugrunde liegt, dass die Spielbewegung eines Musikinstruments das Klangergebnis hörbar beeinflussen.

5.1 Methode

Mit dem Ziel herauszufinden, ob die Spielbewegung eines Musikinstruments hörbar ist, wurde ein ABX-Test durchgeführt. In einem ABX-Test werden einer Versuchsperson in einer Software zwei verschiedene Stimuli dargeboten, welche sich die Versuchsperson durch klicken auf „A“ und auf „B“ anhören kann. Zusätzlich kann sich die Versuchsperson durch klicken auf „X“ einen Stimulus anhören, der dem Stimuls, der hinter „A“ oder hinter „B“ steckt, entspricht. Die Aufgabe einer Versuchsperson besteht darin in jedem Durchgang (Trial) sich zu entscheiden, ob Stimulus „A“ oder Stimulus „B“ gleich „X“ ist. Sollte kein Unterschied zwischen den beiden Testsignalen erkannt worden sein, so sollte die Anzahl an korrekten Antworten einer Versuchsperson entsprechend eines Zufallprozesses binomialverteilt sein. Wurde jedoch ein bestimmter Schwellwert an korrekten Antworten, der sich aus der Anzahl der Durchgänge (Trials) und dem vorausgestzten Konfidenzintervall errechnen lässt, überschritten, so kann man davon ausgehen, dass die Versuchsperson einen Unterschied in den beiden Stimuli wahrgenommen hat [5]. Die für den ABX-Test verwendeten Stimuli unterschieden sich darin, dass je ein Stimulus mit und ein Stimulus ohne Bewegungssimulation erzeugt wurde. Die Stimuli werden in Abschnitt 5.3 genauer beschrieben.

5.2 Versuchspersonen

An dem Hörversuch nahmen insgesamt elf Studenten des Studiengangs Audiokommunikation und -technologie (1. Semseter bis abgeschlossenes Studium) im Alter von

23 bis 30 Jahren teil (Durchschnittsalter: 26, 3 w, 8 m). Neun der elf Versuchsteilnehmer gaben an, als Hobby ein Musikinstrument zu spielen. Eine Versuchsperson spielt kein Musikinstrument, eine weitere Versuchsperson gab an in der Jugendzeit ein Instrument gespielt zu haben. Drei Versuchspersonen behaupteten aufgrund von Arbeitserfahrung im Audiobereich (Tonstudio) und/oder Erfahrung in der Produktion und dem Abmischen elektronischer Musik von sich, ein Audio-Experte zu sein. Drei weitere Versuchspersonen gaben entschieden an, sicherlich kein Audioexpert zu sein. Die übrigen fünf Versuchsteilnehmer schätzten sich als audio-affin und hörerfahren ein, würden sich jedoch nicht als Experte im Audiobereich bezeichnen.

5.3 Stimuli

Aus den in Abschnitt 4.2.4 beschriebenen Auralisationen der Aufführung einer Oboe, einer Trompete und einer Violine wurden jeweils Ausschnitte mit einer Länge von in etwa fünfzehn (15) Sekunden erstellt. Die Wellenform des nachhallfreien Audiosignals (siehe Abschnitt 3.2.1.1) wurde hierbei gemeinsam mit den aufgezeichneten Orientierungsdaten des Musikinstruments (Euler-Winkel) betrachtet. Pro Instrument und Aufführung wurde jeweils ein Bereich von in etwa 15 Sekunden gewählt, in welchem die Bewegung groß ist (starke Veränderung der Euler-Winkel) und der Beginn einer Phrase im Audiosignal vorliegt. Aus den Auralisationen der gesamten Aufführung wurden mit Hilfe der Software WaveLab die entsprechenden Ausschnitte herausgeschnitten und mit einem Fade-In und einem Fade-Out so bearbeitet, dass die Stücke für den Hörvesruch verwendet werden konnten (siehe Anhang A). Der soeben beschriebene Ausschnitt einer Aufnahme, welcher mit Bewegung des Musikinstruments auralisiert wurde, wurde zusätzlich ohne Veränderung der Position und Orientierung der Schallquelle auralisiert. Die Position und Orientierung der unbewegten Variante der Schallquelle entsprach hierbei der zu Beginn des Ausschnitts der bewegten Simulation der Schallquelle vorliegenden Position und Orientierung. Hierbei wurde darauf geachtet, dass in der unbewegten Variante die Haltung des Musikinstrument nicht extrem beziehungsweise sehr unnatürlich ist. Die zu Beginn eines Ausschnitts des sich bewegenden Musikinstruments vorliegenden Orientierungswerte beziehungsweise die Orientierung des unbewegten Instruments kann der Tabelle 5.1 entnommen werden.

Tabelle 5.1: Orientierung der Instrumente in der unbewegten Auralisation.

Instrument	Yaw, Pitch, Roll [Grad]
Oboe2	-4.0, 1.5, 8.5
Trompete1	-2.9, -2.3, -4.6
Violine1	-9.6, -12.7, -15.3

Eine Auralisation der bewegten Schallquelle und der statisch platzierten Schallqulle wurde einmal im Modell des Konzertgebäudes und einmal in dem nachhallfreien Modell durchgeführt.

5.4 Versuchsdurchführung

Für jedes der drei Musikinstrumente (Trompete, Oboe, Violine) und für die zwei 3D-Computermodelle wurde ein ABX-Test mit jeweils 20 Durchgängen durchgeführt, in welchem jeweils die Bewegungssimulation mit der unbewegten Simulation verglichen wurde. Der Hörversuch fand in dem Mini-Lab im Hauptgebäude der Technischen Universität Berlin (H2001 D) statt und hatte eine Dauer von in etwa einer Stunde und dreissig (30) Minuten. Der ABX-Vergleich wurde mit Hilfe des am Fachbereich Audiokommunikation entwickelten Matlab-basierenden Softwarepakets WhisPER durchgeführt (siehe Anhang A), das in jedem Durchgang eine zufällige Platzierung der beiden Stimuli (bewegt und unbewegt) auf Position A oder Position B vornimmt [8]. Die Software wurde an einem Laptop (Macbook 13-inch, late 2009) ausgeführt und die Stimuli wurden über einen Kopfhörer der Firma AKG (K601), welcher einen relativ linearen Frequenzgang aufweist, dargeboten. Geht man beispielsweise davon aus, dass die Versuchsperson zu Beginn eines Hörversuchs eine gewisse Eingewöhnungszeit benötigt, im mittleren Teil des Versuchs die beste Leistung abrufen kann und gegen Ende des Versuchs eine geringere Konzentrationsfähigkeit aufweist, so könnte die Reihenfolge, in der die Stimuli präsentiert werden, die Ergebnisse des Hörversuchs beeinflussen. Um den Einflussfaktor der Reihenfolge der Präsentation der Stimuli gering zu halten, bekam keine Versuchsperson die Stimuli in der gleichen Reihenfolge präsentiert. Den Versuchspersonen wurde das Verfahren eines ABX-Tests erläutert. Es wurde den Teilnehmern nur mitgeteilt, dass die Frage beantworten werden soll, ob man den Unterschied zwischen zwei verschiedenen Stimuli hören kann. Die Antwort auf die Frage, in wiefern sich die Stimuli untereinander unterscheiden, wurde den Versuchsteilnehmern vor und während der Versuchsdurchführung vorbehalten.

5.5 Ergebnisse

Typischerweise ist ein Konfidenzintervall von 95% ausreichend für psychoakustische Experimente. Mit Hilfe dieser Annahme kann man sich sicher sein, dass weniger als 5% zufälliger Testergebnisse des ABX-Tests einen wahrnehmbaren Unterschied indizieren. Ein einzelner ABX-Test bestand aus 20 Durchgängen (Trials). Ein Vergleich

der bewegten Schallquelle zu einer unbewegten Quelle wurde für drei (3) Instrumente in zwei (2) verschiedenen Raummodellen gezogen, so dass insgesamt sechs (6) ABX-Tests pro Versuchsperson durchgeführt wurden. Demnach wurden pro Instrument und Raum über alle Versuchspersonen hinweg insgesamt $20 \cdot 11 = 220$ Beobachungen gemacht. Da sich der Alphafehler von Test zu Test kumuliert und somit also eine Erhöhung der Alpha-Fehler-Wahrscheinlichkeit durch multiples Testen entstand, wurde eine Bonferroni-Korrektur durchgeführt. Im Speziellen wurde das Alpha-Niveaus durch die Anzahl an durchgeführten ABX-Test geteilt. Das neue Signifikanzniveau wurde also wie folgt berechnen:

$$0.05/6 = 0.0083 \tag{5.1}$$

Pro Instrument und Raum, also für jede getestete Bedingung, müssen bei 220 Durchgängen mindestens 129 Durchgängege korrekt beantwortet worden sein, damit das neue Signifikanz-Niveau unterschritten wird und der Test somit als statistisch signifikant gilt [14]. Der Tabelle 5.2 kann für jede Versuchsbedingung die Anzahl an korrekten Antworten aller Versuchsteilnehmer sowie die Type 1 Fehler Wahrscheinlichkeit (p-Wert), welche aus der Anzahl an korrekten Antworten resultiert, entnommen werden.

Tabelle 5.2: Darstellung der Anzahl an korrekten Antworten pro Instrument und Raum.

Instrument	Konzertsaal (Concertgebouw)	nachhallfreis Modell (RAR)
Oboe2	153 ($1.3881 \cdot 10^{-9}$)	133 ($7.3696 \cdot 10^{-4}$)
Trompete1	126 (0.0129)	214 ($1 \cdot 10^{-10}$)
Violine1	176 ($1 \cdot 10^{-10}$)	189 ($1 \cdot 10^{-10}$)

Es fällt auf, dass in fünf (5) von sechs (6) Bedingungen ein Unterschied zwischen der Auralistion mit und ohne Bewegung von den Versuchspersonen gehört wurde. Allein bei der Trompete im Konzertsaal konnte kein überzufälliger Unterschied detektiert werden ($126 < 129$). Betrachtet man die Anzahl an korrekten Antworten, so kann man erkennen, dass bei der Trompete im nachhallfreien Modell der mit Abstand größte Wert von 214 vorliegt, gefolgt von der Violine im nachhallfreien Model und im Modell des Konzertsaales (189 und 176 korrekte Antworten). Bei der Oboe wurde wie bei der Violine in beiden Raummodellen ein Unterschied festgestellt, nachdem die Anzahl an korrekten Antworten hier jedoch geringer ist (153

und 133 richtige Antworten) scheint der Unterschied zwischen der Simulation mit und ohne Bewegung bei der Oboe etwas weniger offensichtlich zu sein. Auffällig ist, dass sowohl bei der Violine, als auch bei der Trompete die Detektionsstärke in dem nachhallfreien Modell größer ist, bei der Oboe hingegen wurden im Modell des Konzertsaales mehr korrekte Antworten gegeben. Im Anschluss an den Hörversuch haben einigen Versuchsteilnehmer geäußert, dass der Unterschied bei der Oboe im Modell des Konzertsaals etwas leichter an Hand von frühen (Boden-) Reflexionen, die an manchen Stellen in der Auralisation auftraten, erkennbar gewesen sei. Nach Aussage der Versuchsteilnehmer ist in jeweils einem der beiden dargebotenen Stimuli bei der Trompete im nachhallfreien Modell eine starke Klangfarbenveränderung hörbar gewesen. Im Konzertsaal hingegen sei der Unterschied kaum erkannbar gewesen zu sein.

6 Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Auswirkung der Spielbewegung von Musikinstrumenten bei der Darbietung klassicher Musik auf das Klangergebnis erforscht. In einer Messung, an der insgesamt zwanzig ausgebildete Musiker teilnahmen, wurde die Position und Orientierung der elf (11) klassischen Orchesteinstrumente mit einem kamerabasierten Motion-Tracking-System sowie eine Audioaufnahme der Live-Darbietung aufgezeichnet.

Zur Messung der Bewegungsdaten gibt es folgende Überlegungen beziehungsweise Hinweise: Die Bewegungsdaten der Violine und der Viola waren in manchen Aufnahmen verrauscht und wurden somit nicht mehr weiter betrachtet und verworfen. Grund hierfür könnte die zu geringe Größe der Marker, welche an dem Instrument angebracht wurden, gewesen sein. Bei künftigen Messungen mit dem Motion-Tracking-System sollte also darauf geachtet werden, möglichst große Marker an den zu verfolgenden Objekten anzubringen. Das Rauschen in diesen Aufnahmen könnte auch dadurch aufgetreten sein, dass ein bei der Messung teilnehmender Musiker aus Versehen ein Stativ, an dem die Kameras des Tracking-Systems montiert waren, leicht verrückt hat. Es sollte also wärend der Messung penibel darauf geachtet werden, dass die Position der Kameras nach der Kalibrierung des Motion-Tracking-Systems unverändert bleibt. Um 'Gimbal Lock' zu vermeiden, sollte bevor eine Messung von Bewegungsdaten eines Objekts gestartet wird, eine Überlegung, in welchem Bereich sich die zu verfolgenden Objekte während der Messung befinden könnten, durchgeführt werden und entsprechend dieser Überlegung das Koordinatensystem des Motion-Capture-Systems im Raum definiert werden (siehe Abschnitt 3.3.3). Die Detektion des Zeitpunktes, an welchem die Starterklappe, die zur Synchronisation der Audioaufnahme mit den Bewegungsdaten diente, könnte künftig auch an Hand des von den Kameras aufgezeichneten Video-Materials vorgenommen werden, so dass die Aufzeichnung der Position der (sehr kleinen) Marker auf der Starterklappe hinfällig wird.

Nach der Durchführung der Mesreihe wurde eine statistische Analyse des Bewegungsbereichs vorgenommen. Auf Grundlage dieser Analyse sowie der Abstrahlcharakteristik der verschiedenen Instrumente, wurden sowohl für den Direktschall, als auch für das Schallfeld eines typischen Konzertsaals Impulsantworten verschiedener Orientierungen der Schallquelle simuliert und der Amplitudenfrequenzgang dieser Impulsantworten miteinander verglichen. Mit Hilfe einer Terzbankfilterung der simulierten Impulsantworten zu diskreten Frequenzstützstellen wurde eine Auswertung der Abweichung der Amplitudenfrequenzgänge untereinander durchgeführt. Die

ermittelten Werte implizieren, dass bei jedem Instrument, sowohl bei einer sitzenden, als auch bei einer stehenden Darbietung eines Stücks, die Spielbewegung zu einem wahrnehmbaren Unterschied im Klangergebnis führt. Zum Ende dieser Arbeit wurden Auschnitte einer Aufführung einer Oboe, einer Trompete sowie einer Violine, einmal mit und einmal ohne Bewegungssimulation, auralisiert. Diese Auralisationen dienten als Grundlage für einen ABX-Test, in welchem für jedes dieser Instrumente sowie für den Direktschall und den nachhallbehafteten Fall, jeweils das sich bewegende Instrument mit der unbewegten Schallquelle verglichen wurde. Es wurde gezeigt, dass tatsächlich ein Unterschied zwischen der Simulation mit und ohne Bewegung hörbar ist. Sowohl bei der Violine, als auch bei der Oboe konnten die Versuchspersonen in beiden Raummodellen die Bewegungssimulation von der unbewegten Schallquelle unterscheiden. Bei der Trompete wurde der Unterschied im Direktschall ebenfalls erkannt, in dem Modell des Konzertsaales hingegen schien dies nur schwer hörbar gewesen zu sein. Künftig sollte also die bisher in der virtuellen Akustik nicht berücksichtigte Spielbewegung von Musikinstrumenten, welche auch als Ausdruck von „Lebendigkeit“ einer Live-Darbietung angesehen werden kann, Beachtung finden.

7 Ausblick

Sowohl bei der in Kapitel 4.2 beschriebene Auswertung des Einflusses unterschiedlicher Orientierungen der Schallquelle auf das Klangergebnis, als auch bei der Auralisation der Live-Aufführungen (siehe Kapitel 4.2.4 und 5) wurde jeweils eine feste Zuhörerposition in dem nachhallfreien Computermodell sowie in dem Modell des Konzertsaales betrachtet. Nachdem sich die Wahrnehmung eines Schallfeldes an unterschiedlichen Positionen im Raum verändert, könnte sowohl die Simulation der Raumimpulsantworten, als auch die Auralisation der Live-Darbietung eines Stücks künftig zu unterschiedlichen Empfängerpositionen durchgeführt werden. Beispielsweise könnte es interessant sein, den Empfänger in dem nachhhallbehafteten Fall nicht in dem Diffusfeld, sondern innerhalb des Hallradius im Direktfeld zu platzieren und eine erneute Auswertung des Einflusses der Spielbewegung auf das Klangergebnis vorzunehmen. Auralisationen wurden im Rahmen dieser Arbeit für jeweils ein Instrument einer jeden Instrumentengruppe vorgenommen. Nachdem die Positions- und Orientierungsdaten zur Simulation in Raven für jedes Instrument erstellt wurden, könten künftig Auralisationen eines jeden der elf (11) klassischen Orchesterinstrumente erstellt werden. Des Weiteren wäre es interessant, unterschiedliche Raummodelle mit veränderter Raumgeometrie sowie mit unterschiedlichen raumakustischen Eigenschaften (z.B. Variation der Nachhallzeit und des Klarheitsmaß) für die Aurlisation zu verwenden und den Einfluss der Raumakustik auf die Wahrnehmung der Spielbewegung zu untersuchen. Nicht nur die Frage ob, sondern wie sich der Klang eines Instruments durch die Bewegung verändert, könnte künftig untersucht werden. Dabei könnte ein Hörversuch durchgeführt werden, in dem die Veruchspersonen qualitativ die Unterschiede zwischen der Auralisation mit und ohne Bewegung bewerten. Aus musikwissenschaftlicher Sicht wäre es interessant, künftig den Zusammenhang zwischen dem musikalischen Material und der Bewegung sowie der Wahrnehmung der Musik aufgrund der Bewegung zu analysieren. Die Frage, ob eine Phrasierung in einem Musikstück nicht nur durch die musikalische Komposition, sondern auch durch die Bewegung eines Instruments und die damit einhergehende klangfarbliche Veränderung vorgenommen wird, könnte ein weiteres interessantes Forschungsfeld darstellen.

Literaturverzeichnis

[1] Ahnert, Wolfgang ; Tennhardt, Hanns-Peter: Raumakustik. In: *Handbuch der Audiotechnik*. Stefan Weinzierl, 2008, Kapitel 5 1.1, 2.3, 2.3.1, 2.3.2, 4.2.2.1

[2] Akenine-Möller, Thomas ; Haines, Eric ; Hoffmann, Naty: *Real-Time Rendering*. A K Peters, Ltd.; Third Edition, 2008 (document), 3.3.3, 3.15, 3.3.3

[3] Bailey, Brenton: *Real Time 3D motion tracking for interactive computer simulations*. Unter: http://www3.imperial.ac.uk/pls/portallive/docs/1/20673697.PDF (abgerufen am 21.07.2014), 2007 (document), 3.1.1, 3.1, 3.1.1

[4] Blauert, Jens ; Braasch, Jonas: Räumliches Hören. In: *Handbuch der Audiotechnik*. Stefan Weinzierl, 2008, Kapitel 3 2.1

[5] Boley, John ; Lester, Michael: Statistical Analysis of ABX Results Using Signal Detection Theory. In: *Audio Engineering Society* (2009) 5.1

[6] Carrillo, Alfonso P. ; Bonada, Jordi ; Pätynen, Jukka ; Välimäki, Vesa: Method for measuring violin sound radiation based on bowed glissandi and its application to sound synthesis. In: *Acoustical Society of America. [DOI: 10.1121/1.3605291]* (2011) 1.2

[7] Carrillo, Pérez: *Method for Measuring Violin Sound Radiation based on Bowed Glissandi and its Application to Sound Synthesis*. Hörbeispiele unter: http://www.dtic.upf.edu/~aperez/JASAradiation/ (abgerufen am 30.07.2014), 1.2

[8] Ciba, Simon ; Wlodarski, Andre ; Maempel, Hans-Joachim: WhisPER - A new tool for performing listening tests. In: *Audio Engineering Society* (2009) 5.4

[9] Couvreur, Christophe: *Implementation of a One-Third-Octave Filter Bank in Matlab*. Unter: http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/30942-one-third-octave-filter-bank--including-additional-inputs-and-outputs/content/oct3bankFc.m (abgerufen am 24.11.2014), 1998 4.2.3.2

[10] Fouad, Nabil A. ; Wiley, John: *Bauphysik-Kalender 2014: Schwerpunkt: Raumakustik und Schallschutz*. Ernst & Sohn, 2014 4.2.2.1

[11] Furniss, Maureen: Motion Capture. In: *MIT communications forum*. Unter: http://web.mit.edu/comm-forum/papers/furniss.html (abgerufen am 13.08.2014) (1999) 3.1, 3.1.1

[12] Goertz, Anselm: Lautsprecher. In: *Handbuch der Audiotechnik*. Stefan Weinzierl, 2008, Kapitel 8 2.2

[13] Lauri Savioja, Tapio L. ; Huopaniemi, Jyri: Auralization Applying The Parametric Room Acoustic Modeling Technique - The Diva Auralization System. In: *Proceedings of the 2002 International Conference on Auditory Display, Kyoto, Japan* (2002) 1.2

[14] Leventhal, Les: *Type 1 and Type 2 Errors in the Statistical Analysis of Listening Tests*, Department of Psychology, University of Monitoba, Diss., 1986 5.5

[15] Lokki, Tapio ; Järveläinen, Hanna: Subjective Evaluation of Auralization of Physic-Based Room Acoustics Modeling. In: *Proceedings of the 2001 International Conference on Auditory Display, Espoo, Finland* (2001) 1.2

[16] Marcelo M. Wanderley, Philippe D. ; Warusfel, Olivier: Improving instrumental sound synthesis by modeling the effects of performer gesture. (1999) 1.2

[17] Meyer, Jürgen: Musikalische Akustik. In: *Handbuch der Audiotechnik*. Stefan Weinzierl, 2008, Kapitel 4 2.2, 2.2

[18] Mito, Yuki ; Kawakami, Hiroshi ; Miura, Masanobu ; Shinoda, Yukitaka: The examination of the performance motion and emotional valence by a pianist. In: *Acoustical Society of America* (2013) 1.1, 1.2

[19] Nusseck, Manfred ; Wanderley, Marcelo M.: Music and motion - how musical-related ancillary body movements contribute to the expirience of music. (2009) 1.1, 1.2

[20] Oppenheim, Alan V. ; Schafer, Ronald W. ; Buck, John R.: *Zeitdiskrete Signalverarbeitung*. Bd. 2., überarbeitete Auflage. Pearson Studium, 2004 2.3

[21] Pollow, Martin ; Behler, Gottfried K. ; Schultz, Frank: Musical Instrument Recording for Building a Directivity Database. (2010) 2.2

[22] Pullin, Andrew: *Import data from an OptiTrack CSV file*. Unter: http://pastebin.com/0MGbMSd8 (abgerufen am 19.12.2013), 2012 3.3.1

[23] Rindel, Jens H. ; Otondo, Felipe: The interaction between room and musical instruments studied by multi-channel auralization. In: *Forum Acusticum* (2005) 1.2

[24] Schröder, Dirk: *Physically Based Real-Time Auralization of Interactive Virtual Environments*, RWTH Aachen, Diss., 2011 2.3, 2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 4.2.1

[25] Stephenson, Uwe M.: *Beugungssimulation ohne Rechenzeitexplosion: Die Methode der quantisierten Pyramidenstrahlen - ein neues Berechnungsverfahren für Raumakustik und Lärmimmissionsprognose. Vergleiche, Ansätze, Lösungen.*, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Diss., 2004 2.3.1, 2.3.2

[26] Vigliensoni, Gabriel ; Wanderley, Marcelo M.: A Quantitative Comparison of Position Trackers for the Development of a Touch-less Musical Interface. (2012) 3.1.1

[27] Vines, Bradley W. ; Krumhansl, Carol L. ; Wanderley, Marcelo M. ; Dalca, Ioana M. ; Levitin, Daniel J.: Music to my eyes: Cross-modal interactions in the perception of emotions in musical performance. In: *Cognition - International Journal of Cognitive Science* (2011) 1.1, 1.2

[28] Vorländer, Michael: *Auralization. Fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality.* 1. Aufl. Berlin: Springer-Verlag (RWTH edition / RWTH Aachen), 2008 2.2

A Anhang

Vom Autor verwendete Software:

- **Mathworks Matlab**
  Version 7.12.0.635 (R2011a)
  Website: http://www.mathworks.de/products/matlab/
  abgerufen am 11.08.2014
- **Google SketchUp**
  Website: http://www.sketchup.com/de
  abgerufen am 23.09.2014
- **Naturalpoint Motive Tracker**
  Website:
  https://www.naturalpoint.com/optitrack/products/flex-13/specs.html
  abgerufen am 05.08.2014
- **Akustiksimulationssoftware Raven**
  http://www.akustik.rwth-aachen.de/Forschung/Projekte/raven
  abgerufen am 07.09.2014
- **Audacity**
  Website: http://audacity.sourceforge.net/
  abgerufen am 11.08.2014
- **Steinberg WaveLab**
  Website: http://www.steinberg.net/de/products/wavelab/start.html
  abgerufen am 20.11.2014
- **WhisPER**
  Website: https://www.ak.tu-berlin.de/menue/digitale_ressourcen/research_tools/whisper_listening_test_toolbox_for_matlab/
  abgerufen am 21.11.2014

Weiterführende Informationen:

- **Staatliches Musikinstrumentenmuseum Berlin**
  Website: https://www.sim.spk-berlin.de/curt-sachs-saal_455.html
  abgerufen am 18.07.2014
- **Concertgebouw Amsterdam**
  Website: http://www.concertgebouw.nl/en
  abgerufen am 23.10.2014
- **Sennheiser Mikrofon MKE1**
  Website:
  http://de-de.sennheiser.com/miniatur-clip-on-lavalier-ansteckmikrofon-musicals-live-shows-broadcast-mke-1
  abgerufen am 09.08.2014
- **AKG Mikrofon C417**
  Website: http://www.akg.com/C417-1039.html?pid=969
  abgerufen am 11.08.2014
- **Mikrofonhalterungen der Firma DPA**
  Website:
  http://www.dpamicrophones.com/en/products.aspx?c=Catalog&category=279
  abgerufen am 09.08.2014
- **Audiointerface Focusrite Scarlett 8i6**
  Website: http://focusrite.de/usb-audio-interfaces/scarlett-8i6
  abgerufen am 11.08.2014

Tabelle A.1: Interquantilabstand Q_{10} - Q_{90} für die Eulerwinkel.

Instrument	Q_{10} - Q_{90} [°] - stehend (Yaw, Pitch, Roll)	Instrument	Q_{10} - Q_{90} [°] - sitzend (Yaw, Pitch, Roll)
Fagott 1	14.76, 13.77, 16.21	Fagott 1	6.53, 16.22, 9.73
Fagott 2	9.01, 7.21, 9.54	Fagott 2	6.80, 11.42, 7.48
Klarinette 1	17.11, 18.73, 27.53	Klarinette 1	10.50, 26.39, 16.18
Klarinette 2	6.08, 13.98, 9.26	Klarinette 2	4.49, 21.18, 8.22
Oboe 1	25.80, 25.69, 21.68	Oboe 1	13.47, 18.50, 11.37
Oboe 2	19.01, 20.24, 21.62	Oboe 2	12.44, 16.79, 11.20
Querflöte 1	25.22, 31.20, 20.35	Querflöte 1	25.93, 28.32, 22.77
Querflöte 2	11.74, 24.83, 13.46	Querflöte 2	12.04, 24.63, 15.46
Trompete 1	6.23, 17.78, 19.68	Trompete 1	8.59, 11.94, 8.96
Trompete 2	14.20, 14.78, 15.21	Trompete 2	8.08, 13.55, 14.80
Posaune 1	5.45, 16.21, 4.99	Posaune 1	2.24, 15.50, 5.74
Horn 1	8.90, 7.71, 9.36	Horn 1	4.65, 7.73, 6.75
Horn 2	10.93, 13.23, 16.53	Horn 2	5.66, 9.50, 10.80
Violine 1	37.58, 22.99, 23.10	Violine 1	24.27, 22.75, 24.79
Violine 2	17.30, 23.98, 19.53	Violine 2	9.81, 27.28, 14.14
Viola 2	22.58, 17.90, 18.58	Viola 2	26.05, 18.67, 31.76
Kontrabass 1	2.55, 4.99, 7.16	Viola 1	11.97, 11.13, 15.75
		Cello 1	2.61, 1.31, 4.22
		Cello 2	1.65, 0.86, 3.11

Tabelle A.2: Interquantilabstand Q_{25} - Q_{75} für die Eulerwinkel.

Instrument	Q_{25} - Q_{75} [°] - stehend (Yaw, Pitch, Roll)	Instrument	Q_{25} - Q_{75} [°] - sitzend (Yaw, Pitch, Roll)
Fagott 1	7.25, 7.70, 8.33	Fagott 1	3.53, 5.41, 3.73
Fagott 2	4.87, 3.57, 4.88	Fagott 2	3.53, 5.41, 3.73
Klarinette 1	9.96, 9.62, 14.13	Klarinette 1	5.61, 12.84, 8.71
Klarinette 2	2.89, 6.42, 4.34	Klarinette 2	2.20, 8.57, 3.56
Oboe 1	14.08, 12.86, 11.89	Oboe 1	6.52, 9.40, 5.74
Oboe 2	9.62, 10.32, 10.75	Oboe 2	5.70, 8.64, 5.67
Querflöte 1	12.87, 16.46, 10.10	Querflöte 1	12.57, 15.89, 12.84
Querflöte 2	6.08, 13.18, 7.10	Querflöte 2	5.83, 11.84, 7.87
Trompete 1	3.13, 9.92, 10.89	Trompete 1	4.24, 5.90, 4.10
Trompete 2	5.61, 6.11, 6.89	Trompete 2	3.35, 6.09, 6.76
Posaune 1	2.11, 8.58, 2.44	Posaune 1	1.23, 8.30, 2.90
Horn 1	4.21, 4.14, 4.75	Horn 1	2.22, 3.88, 3.50
Horn 2	5.68, 6.84, 8.49	Horn 2	2.66, 4.79, 5.40
Violine 1	18.04, 10.77, 11.24	Violine 1	14.30, 11.81, 14.08
Violine 2	8.05, 11.26, 9.28	Violine 2	4.49, 13.28, 5.92
Viola 2	11.11, 8.85, 8.56	Viola 2	11.81, 7.69, 9.20
Kontrabass 1	1.35, 2.73, 3.42	Viola 1	5.85, 5.60, 7.69
		Cello 1	0.92, 0.66, 1.62
		Cello 2	0.74, 0.45, 1.15

Tabelle A.3: Quantilwerte der Eulerwinkel bei stehender Aufführung (Yaw, Pitch, Roll [°]).

Instrument	Q_5	Q_{10}	Q_{25}	Q_{75}	Q_{90}	Q_{95}
Oboe 1	-18.71	-14.37	-7.70	6.38	11.44	13.57
	-13.51	-10.53	-5.51	7.35	15.16	19.00
	-13.07	-10.66	-5.99	5.90	11.03	13.30
Oboe 2	-10.55	-8.13	-4.31	5.31	10.88	14.67
	-16.20	-12.00	-5.86	4.46	8.25	10.78
	-18.43	-13.46	-6.16	4.59	8.15	10.17
Klarinette 1	-11.58	-8.51	-5.18	4.78	8.60	11.27
	-10.81	-8.34	-4.59	5.04	10.38	13.32
	-18.14	-14.11	-7.52	6.61	13.42	16.61
Klarinette 2	-3.61	-2.81	-1.45	1.44	3.28	4.40
	-8.94	-7.00	-3.27	3.14	6.97	9.27
	-6.66	-4.83	-2.20	2.14	4.43	6.02
Fagott 1	-13.15	-9.92	-4.48	2.77	4.85	6.45
	-8.47	-6.43	-3.73	3.97	7.34	9.43
	-11.76	-8.80	-4.17	4.16	7.41	9.32
Fagott 2	-5.58	-4.50	-2.33	2.58	4.51	5.57
	-4.13	-3.24	-1.59	1.97	3.97	5.46
	-5.63	-4.28	-2.33	2.55	5.26	7.03
Querflöte 1	-16.56	-12.67	-5.94	6.93	12.55	16.15
	-18.95	-14.70	-7.32	9.14	16.49	20.91
	-16.06	-11.07	-5.62	4.48	9.29	12.16
Querflöte 2	-7.96	-6.33	-3.34	2.74	5.41	7.33
	-15.09	-11.80	-6.65	6.53	13.03	16.26
	-8.47	-6.58	-3.57	3.53	6.89	8.47
Kontrabass	-1.65	-1.31	-0.69	0.66	1.23	1.58
	-3.30	-2.59	-1.36	1.37	2.41	3.00
	-3.82	-3.01	-1.57	1.85	4.15	5.92

Tabelle A.4: Quantilwerte der Eulerwinkel bei stehender Aufführung (Yaw, Pitch, Roll [°]).

Instrument	Q_5	Q_{10}	Q_{25}	Q_{75}	Q_{90}	Q_{95}
Viola 2	-17.67	-12.54	-5.54	5.57	10.04	13.22
	-14.70	-10.64	-4.77	4.08	7.26	9.35
	10.82	-7.90	-3.88	4.68	10.68	15.96
Violine 1	-23.26	-19.45	-9.06	8.99	18.13	23.58
	-23.66	-15.22	-6.51	4.26	7.76	9.20
	-11.22	-9.16	-5.15	6.10	13.95	20.94
Violine 2	-11.58	-8.64	-4.04	4.01	8.66	12.09
	-18.86	-14.48	-6.56	4.70	9.51	12.05
	-13.61	-10.26	-4.77	4.51	9.27	11.98
Posaune	-2.93	-2.38	-1.05	1.07	3.07	4.68
	-9.62	-7.90	-4.36	4.23	8.31	11.16
	-4.70	-3.35	-1.52	0.92	1.64	2.07
Trompete 1	-13.23	-10.53	-5.84	5.05	9.15	11.75
	-10.59	-8.23	-4.85	5.07	9.55	12.39
	-3.76	-2.79	-1.42	1.71	3.44	4.83
Trompete 2	-13.23	-8.00	-3.42	3.47	7.21	10.12
	-9.75	-7.20	-2.90	3.21	7.58	10.32
	-5.4	-3.93	-2.16	3.44	10.27	13.42
Horn 1	-5.49	-4.20	-2.38	2.37	5.16	6.80
	-5.38	-3.96	-2.08	2.07	3.73	4.78
	-5.95	-4.48	-1.99	2.22	4.42	5.59
Horn 2	-10.72	-8.50	-4.47	4.02	8.03	10.58
	-8.60	-6.82	-3.40	3.44	6.42	8.09
	-7.63	-5.99	-2.90	2.78	4.94	6.33

Tabelle A.5: Quantilwerte der Eulerwinkel bei sitzender Aufführung (Yaw, Pitch, Roll [°]).

Instrument	Q_5	Q_{10}	Q_{25}	Q_{75}	Q_{90}	Q_{95}
Oboe 1	-10.16	-7.63	-3.24	3.27	5.83	7.60
	-11.16	-9.08	-4.84	4.56	9.43	12.19
	-7.58	-6.00	-2.99	2.75	5.37	7.18
Oboe 2	-5.98	-4.74	-2.49	3.21	7.70	10.45
	-12.56	-9.94	-5.09	3.55	6.85	9.12
	-9.54	-6.44	-3.07	2.60	4.76	5.89
Klarinette 1	-6.61	-5.07	-2.61	3.00	5.43	6.75
	-15.92	-11.65	-5.73	7.11	14.74	19.93
	-11.40	-8.61	-4.59	4.12	7.57	10.32
Klarinette 2	-3.40	-2.41	-1.18	1.02	2.08	2.98
	-14.84	-11.96	-4.07	4.49	9.22	12.29
	-4.95	-3.89	-1.73	1.83	4.33	6.83
Fagott 1	-4.12	-3.19	-1.49	1.76	3.34	4.84
	-9.69	-7.79	-4.47	4.35	8.43	10.39
	-6.66	-5.08	-2.17	2.49	4.65	5.87
Fagott 2	-3.92	-3.16	-1.82	1.71	3.63	5.00
	-7.40	-5.87	-2.78	2.63	5.55	7.51
	-4.95	-3.69	-1.79	1.94	3.78	5.39
Querflöte 1	-17.85	-13.08	-6.12	6.45	12.85	16.15
	-17.00	-14.16	-8.49	7.41	14.17	19.07
	-14.22	-11.58	-6.40	6.44	11.19	14.25
Querflöte 2	-8.94	-6.78	-3.43	2.40	5.26	7.64
	-15.53	-11.61	-5.67	6.18	13.02	16.26
	-8.64	-6.82	-3.70	4.17	8.64	10.98
Cello 1	-2.01	-1.34	-0.45	0.47	1.27	1.77
	-1.01	-0.70	-0.34	0.32	0.62	0.81
	-2.40	-1.63	-0.83	0.79	2.59	3.19
Cello 2	-1.03	-0.72	-0.31	0.43	0.92	1.43
	-0.56	-0.44	-0.23	0.21	0.42	0.53
	-2.10	-1.32	-0.57	0.58	1.79	2.91

Tabelle A.6: Quantilwerte der Eulerwinkel bei sitzender Aufführung (Yaw, Pitch, Roll [°]).

Instrument	Q_5	Q_{10}	Q_{25}	Q_{75}	Q_{90}	Q_{95}
Viola 1	-7.89	-5.88	-3.02	2.83	6.10	8.10
	-7.33	-5.45	-2.71	2.89	5.69	7.40
	-10.38	-8.16	-3.57	4.12	7.59	10.49
Viola 2	-17.29	-12.97	-5.83	5.98	11.49	14.97
	-12.75	-8.92	-4.08	3.62	6.97	8.58
	-9.83	-7.94	-4.19	5.01	11.73	16.96
Violine 1	-14.13	-11.93	-7.37	6.94	12.34	15.86
	-19.81	-14.84	-7.25	4.56	7.91	9.73
	-10.41	-8.63	-5.77	8.31	16.15	21.16
Violine 2	-6.03	-4.45	-2.02	2.47	5.37	7.09
	-18.49	-14.23	-7.04	6.24	13.06	16.37
	-9.60	-6.18	-2.67	3.26	7.96	10.56
Posaune	-1.29	-0.95	-0.50	0.72	1.30	1.73
	-8.15	-6.45	-3.60	4.71	9.05	12.24
	-4.67	-3.76	-1.80	1.10	1.99	2.47
Trompete 1	-7.07	-5.19	-2.30	1.81	3.77	5.24
	-6.88	-5.34	-2.74	3.16	6.59	8.61
	-5.55	-4.17	-2.16	2.08	4.43	6.62
Trompete 2	-8.98	-7.06	-3.37	3.39	7.74	11.55
	-11.85	-6.79	-2.58	3.51	6.76	8.96
	-5.02	-3.60	-1.76	1.60	4.48	6.93
Horn 1	-3.95	-3.16	-1.63	1.87	3.59	5.08
	-5.39	-3.92	-1.84	2.03	3.81	4.93
	-3.35	-2.46	-1.15	1.07	2.19	2.71
Horn 2	-7.07	-5.46	-2.76	2.63	5.34	7.00
	-7.10	-5.30	-2.54	2.24	4.20	5.21
	-4.08	-3.20	-1.42	1.24	2.46	3.51

Tabelle A.7: Darstellung der Ergebnisse im reflexionsarmen Raum (RAR).

Instrument	größte Abweichung stehend [dB]	Frequenz [Hz]	geringste Abweichung stehend [dB]	Frequenz [Hz]	mittlere Abweichung stehend [dB]	größte Abweichung sitzend [dB]	Frequenz [Hz]	geringste Abweichung sitzend [dB]	Frequenz [Hz]	mittlere Abweichung sitzend [dB]	Frequenzbereich [Hz]
Oboe 1	14.43	2500	1.36	250	7.69	19.43	12500	0.77	250	6.72	250-12000
Oboe 2	19.93	12500	1.27	630	8.33	21.67	12500	0.80	250	7.25	
Klarinette 1	11.53	800	0.56	315	4.73	16.39	8000	0.90	200	6.64	125-10000
Klarinette 2	11.55	6350	0.57	400	3.84	14.64	8000	0.51	160	4.91	
Fagott 1	14.07	1600	0.90	2500	5.00	11.42	1600	0.79	125	4.68	80-12500
Fagott 2	8.70	10000	0.50	250	3.08	8.51	4000	0.62	125	3.28	
Querflöte 1	14.25	315	1.02	1250	6.58	12.63	8000	1.29	1250	6.45	250-8000
Querflöte 2	10.35	315	0.36	6350	4.21	10.33	400	0.99	1000	5.01	
Trompete 1	13.42	1250	0.87	160	3.98	11.12	1250	0.78	160	3.08	160-16000
Trompete 2	14.33	1250	0.73	160	4.13	15.09	1250	0.82	160	3.87	
Posaune	9.82	100	0.47	800	2.12	6.39	100	1.09	500	2.31	100-10000
Horn 1	25.78	1600	3.98	8000	13.87	22.74	80	4.14	8000	12.18	60-7000
Horn 2	28.47	1600	6.64	8000	16.24	18.29	1250	4.14	8000	10.14	
Viola 1						9.02	4000	1.35	125	4.27	125-10000
Viola 2	13.94	1600	1.67	500	5.87	14.56	1600	2.76	125	6.25	
Violine 1	13.54	500	3.52	400	8.11	13.52	10000	3.04	200	7.72	200-10000
Violine 2	14.38	10000	1.08	200	6.51	12.68	10000	1.59	200	6.40	
Kontrabass	5.41	80	0.26	4000	2.26						80-8000
Cello 1						11.07	500	0.18	1000	2.96	80-8000
Cello 2						5.89	500	0.01	160	1.44	

B Grafische Darstellung der Ergebnisse

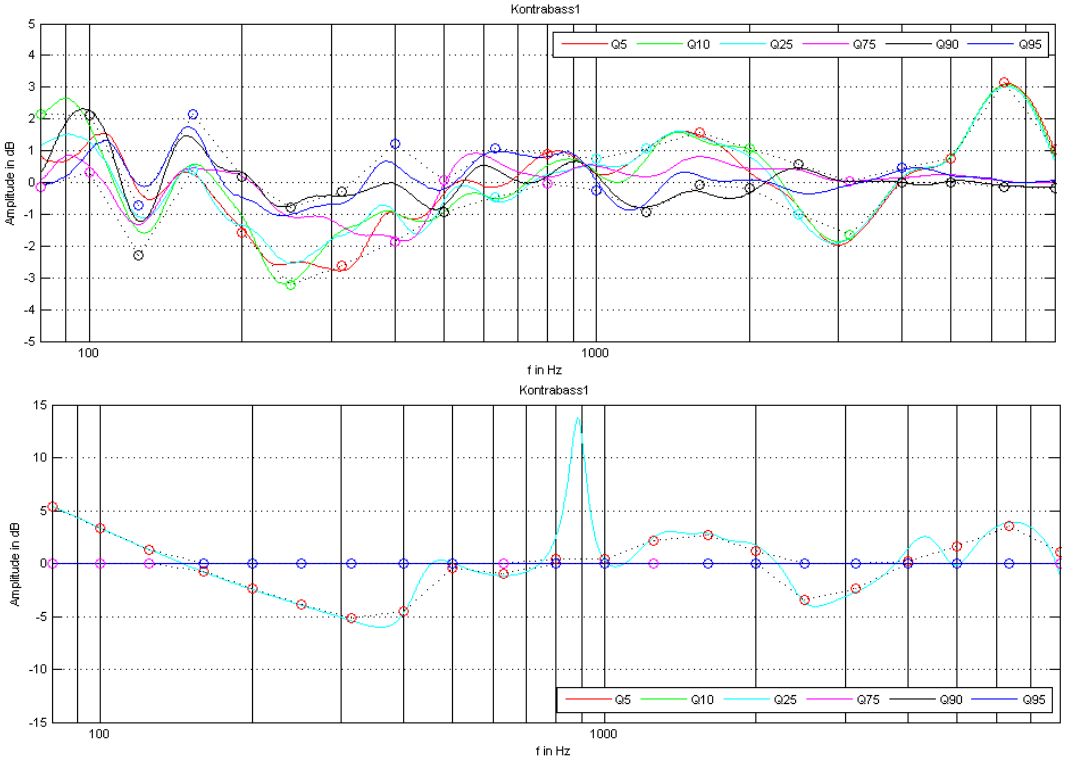

Abbildung B.1: Kontrabass 1: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, unten: RAR stehend (RAR: Q5=Q10=Q25 und Q75=Q90=Q95).

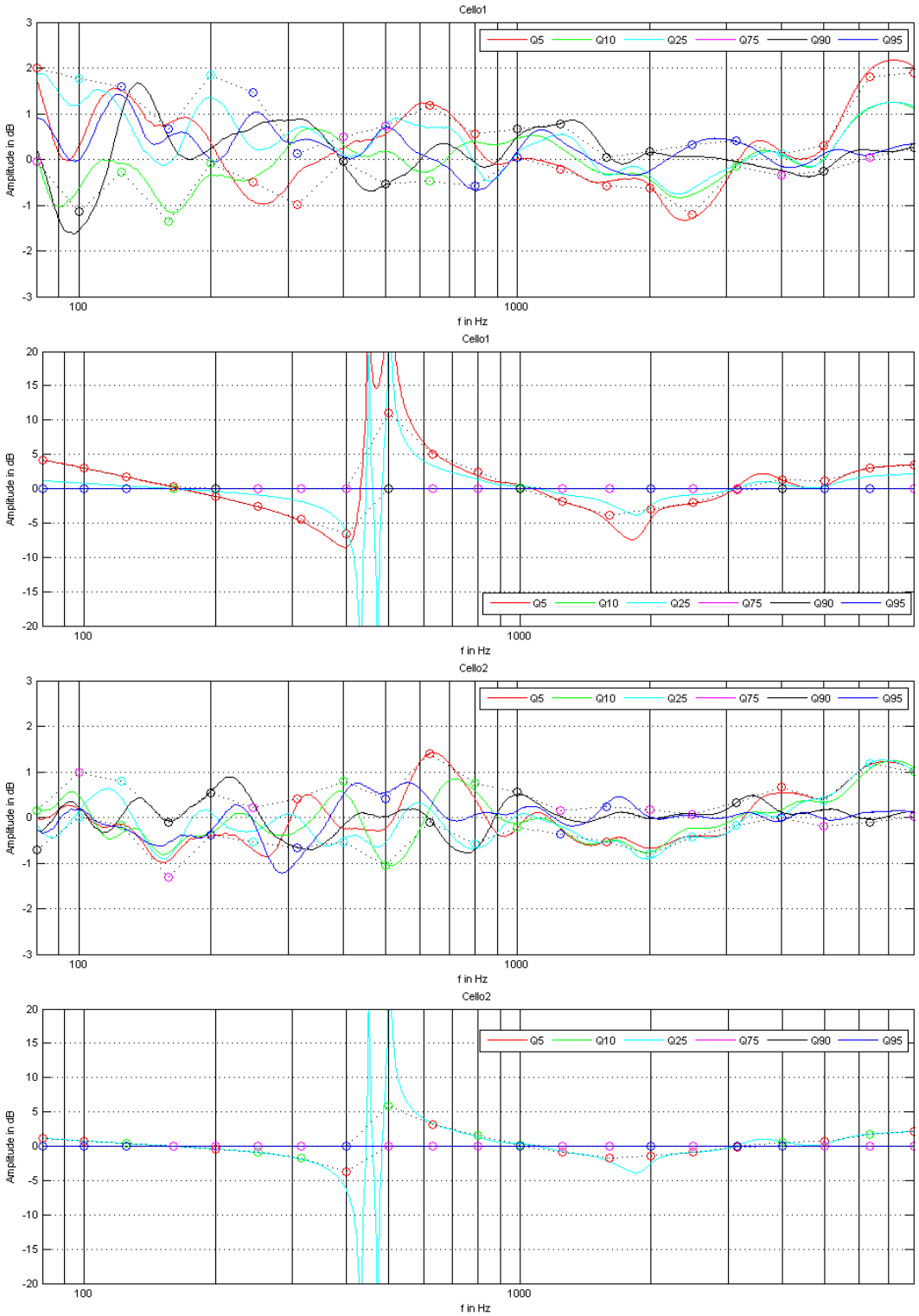

Abbildung B.2: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Cello 1: Oben: Concertgebouw sitzend, 2. von oben: RAR sitzend, Cello 2 : 2. von unten: Concertgebouw sitzend, unten: RAR sitzend.(RAR: Q5=Q10=Q25 und Q75=Q90=Q95).

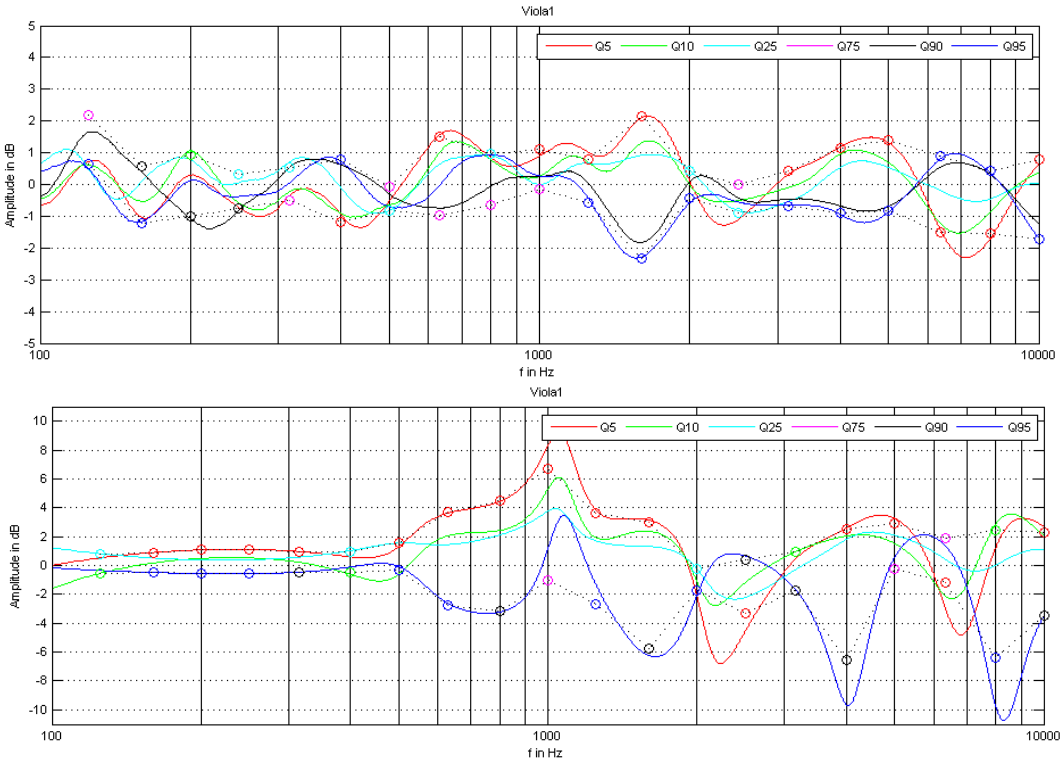

Abbildung B.3: Viola 1: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw sitzend, unten: RAR sitzend (RAR: Q75=Q90=Q95).

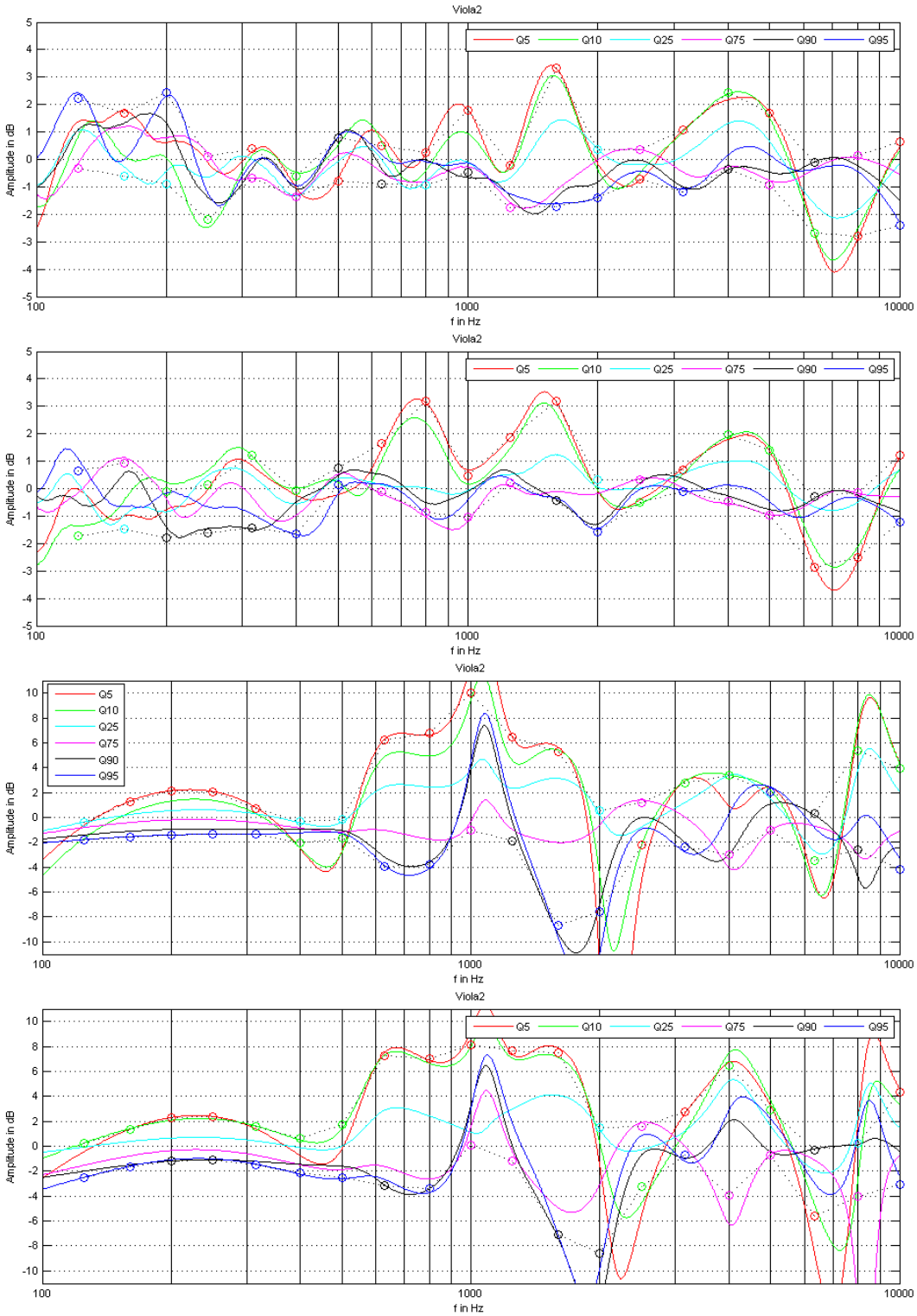

Abbildung B.4: Viola 2: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend, unten: RAR sitzend.

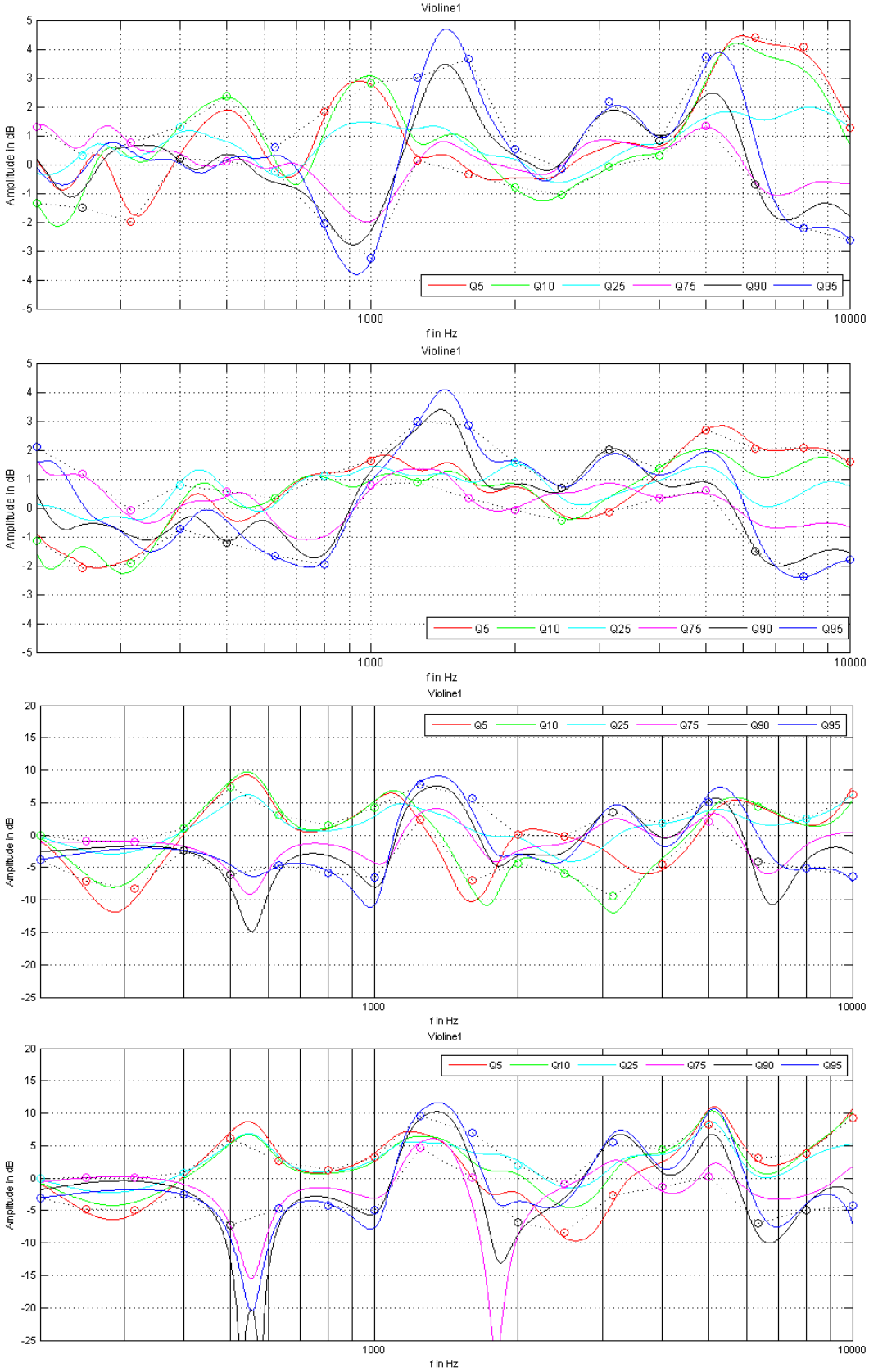

Abbildung B.5: Violine 1: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend, unten: RAR sitzend.

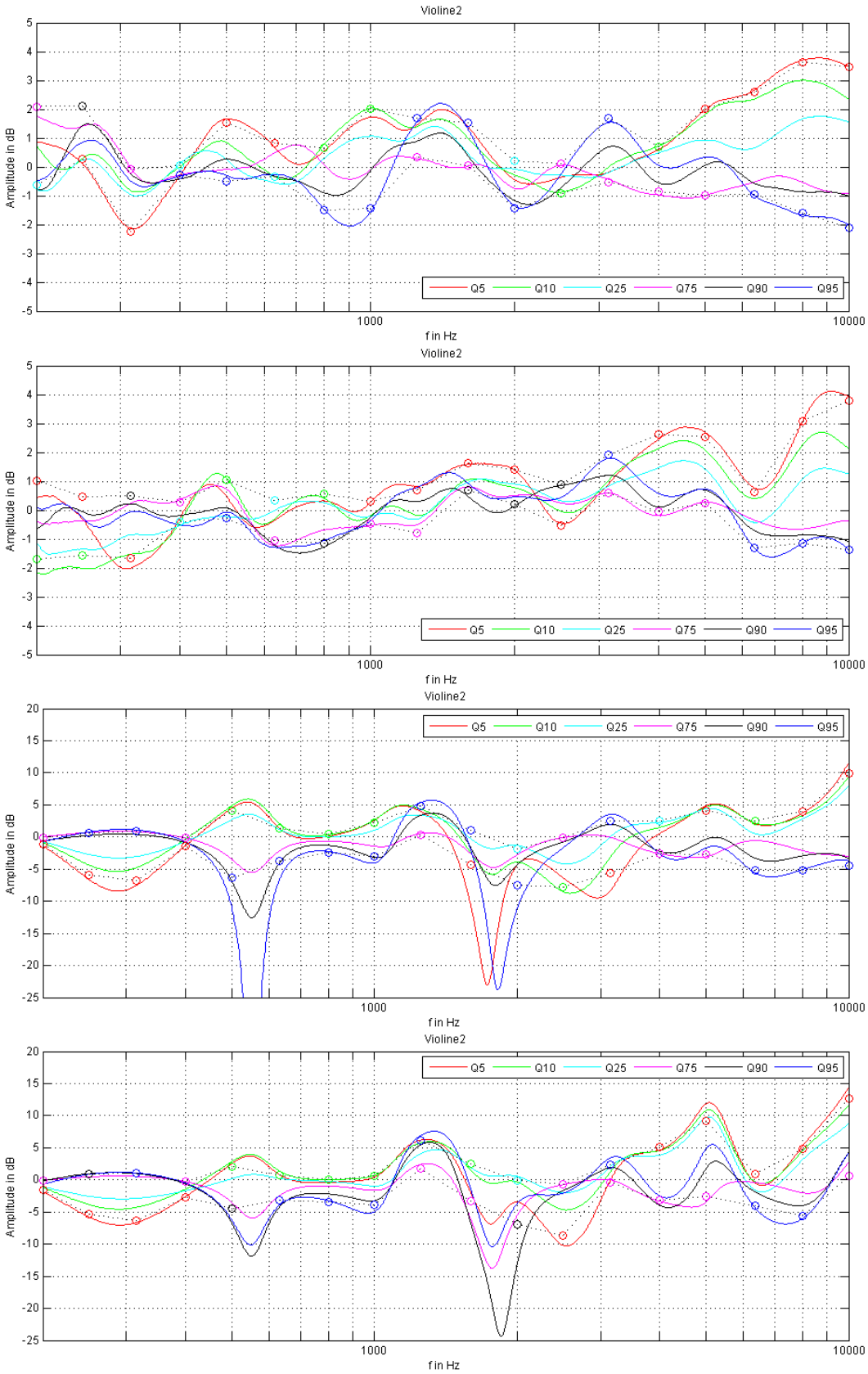

Abbildung B.6: Violine 2: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend, unten: RAR sitzend.

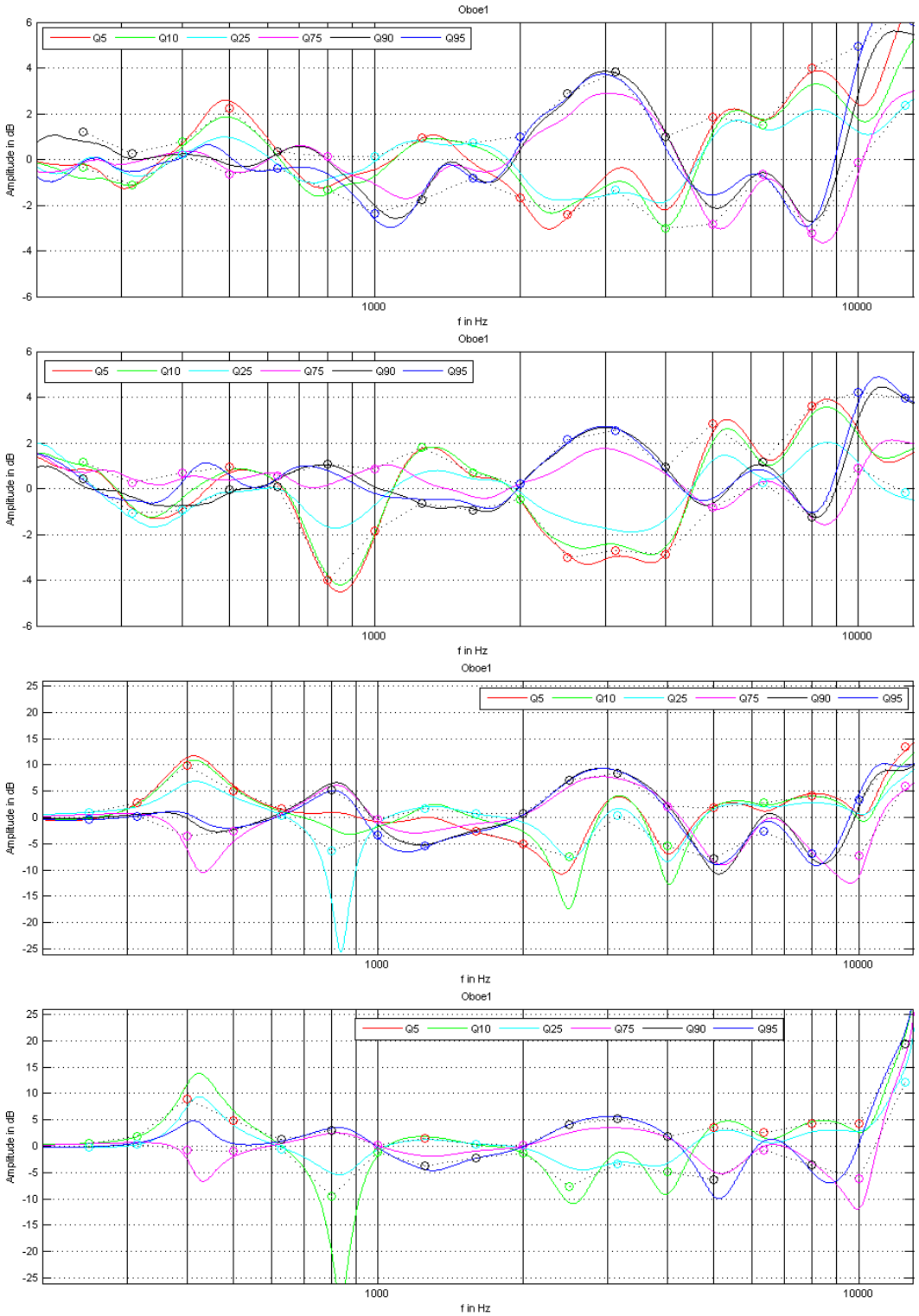

Abbildung B.7: Oboe 1: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend, unten: RAR sitzend (hier Q5=Q10 und Q90=Q95).

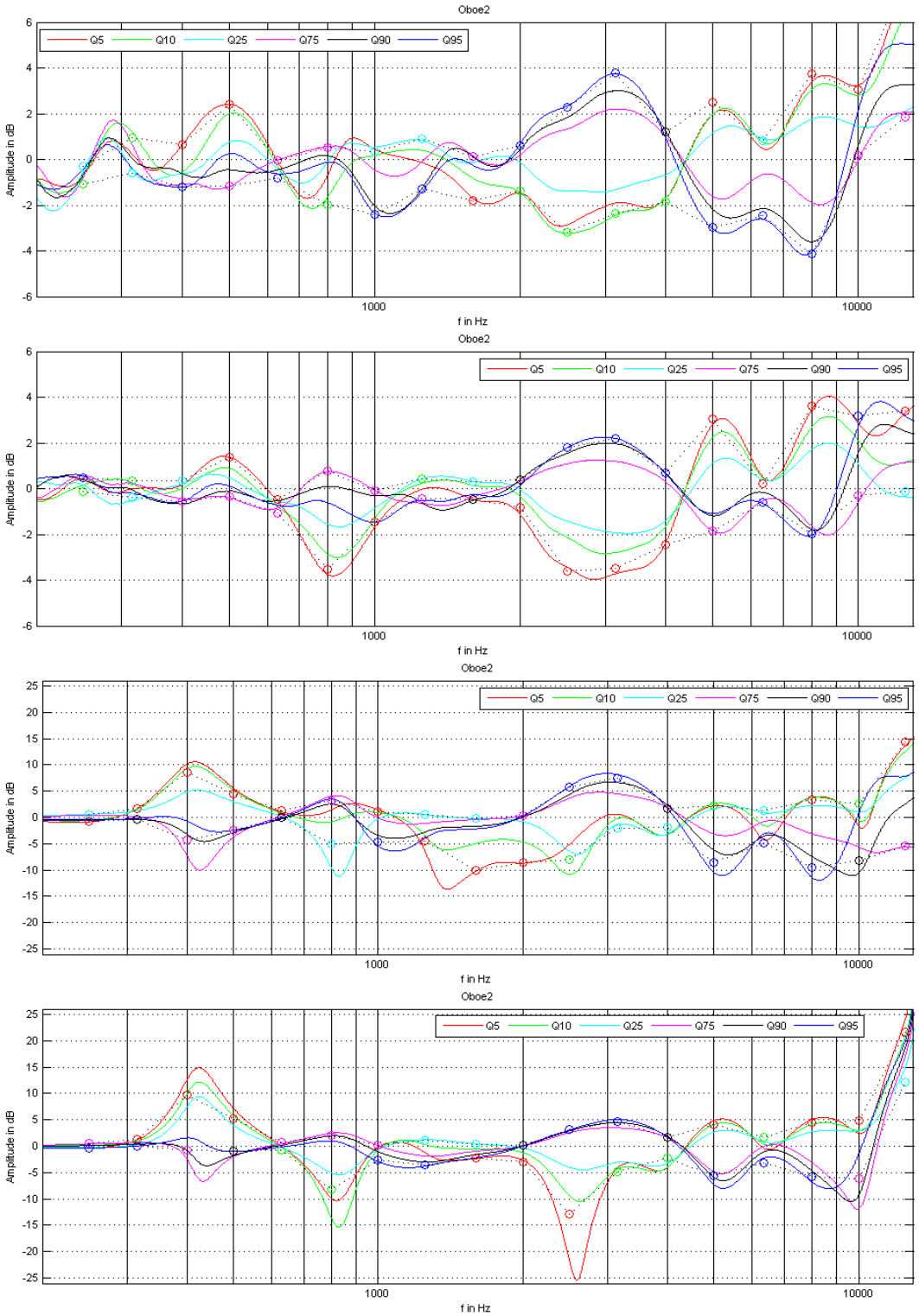

Abbildung B.8: Oboe 2: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend, unten: RAR sitzend.

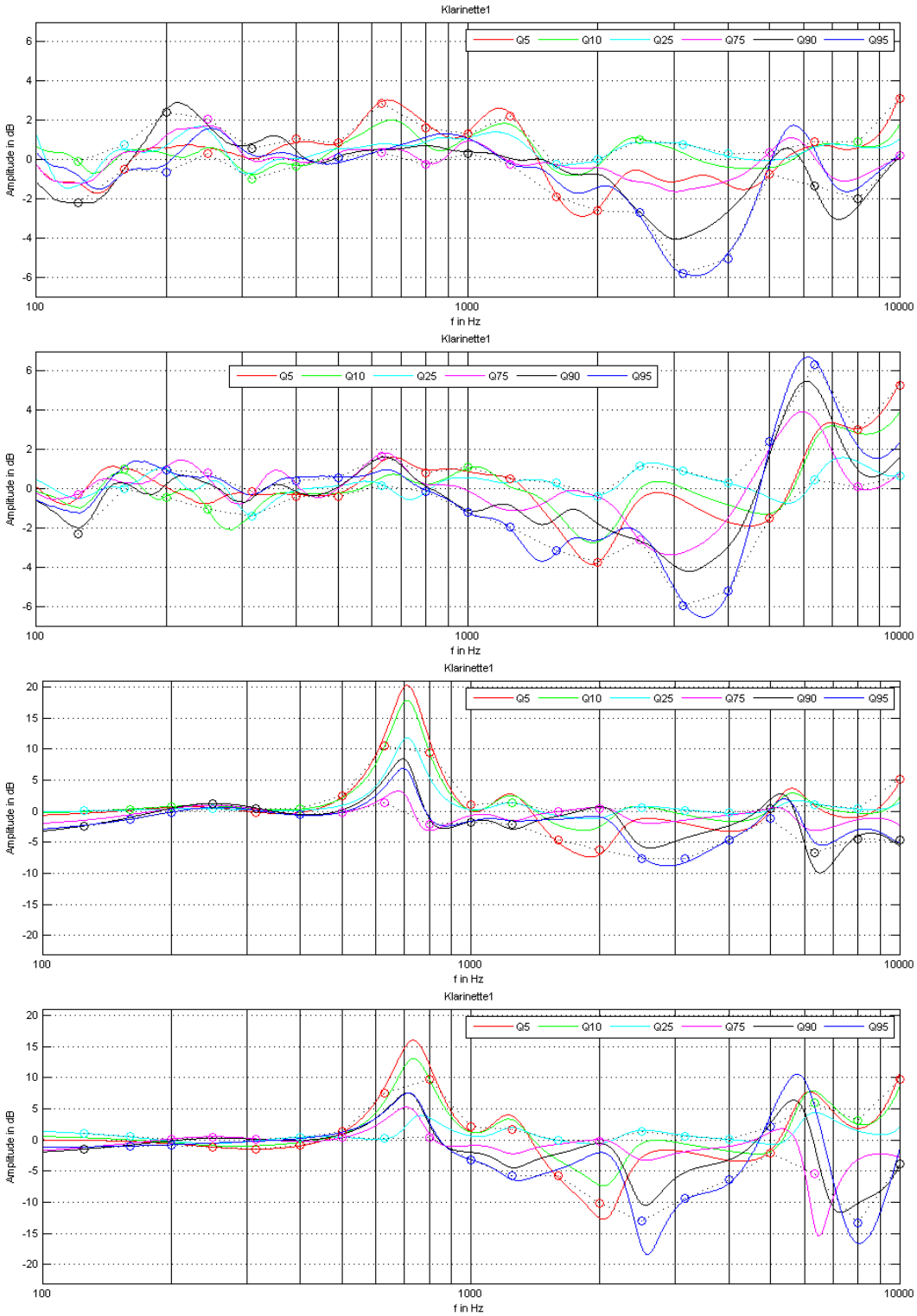

Abbildung B.9: Klarinette 1: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend, unten: RAR sitzend.

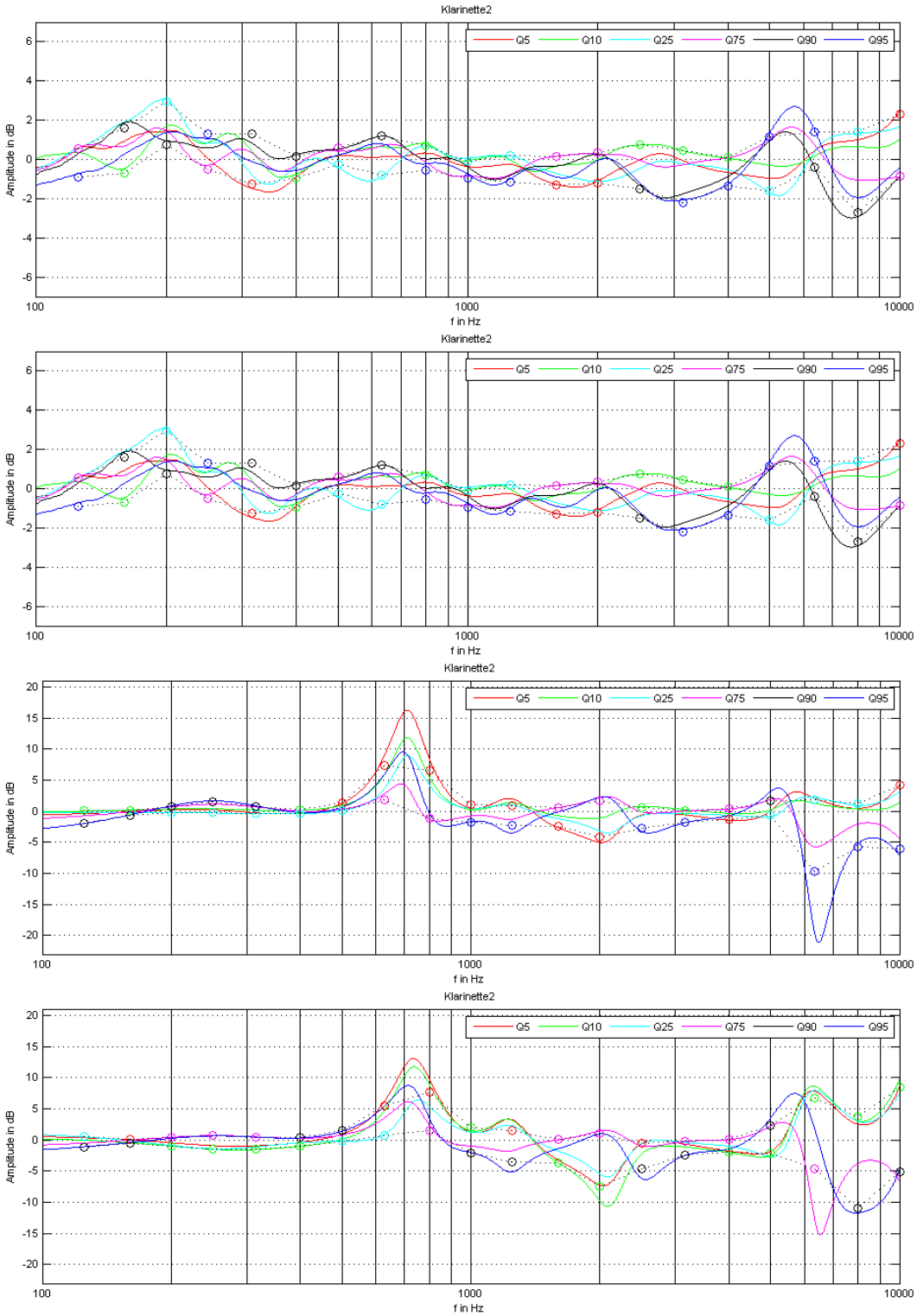

Abbildung B.10: Klarinette 2: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend, unten: RAR sitzend (RAR: Q90=Q95).

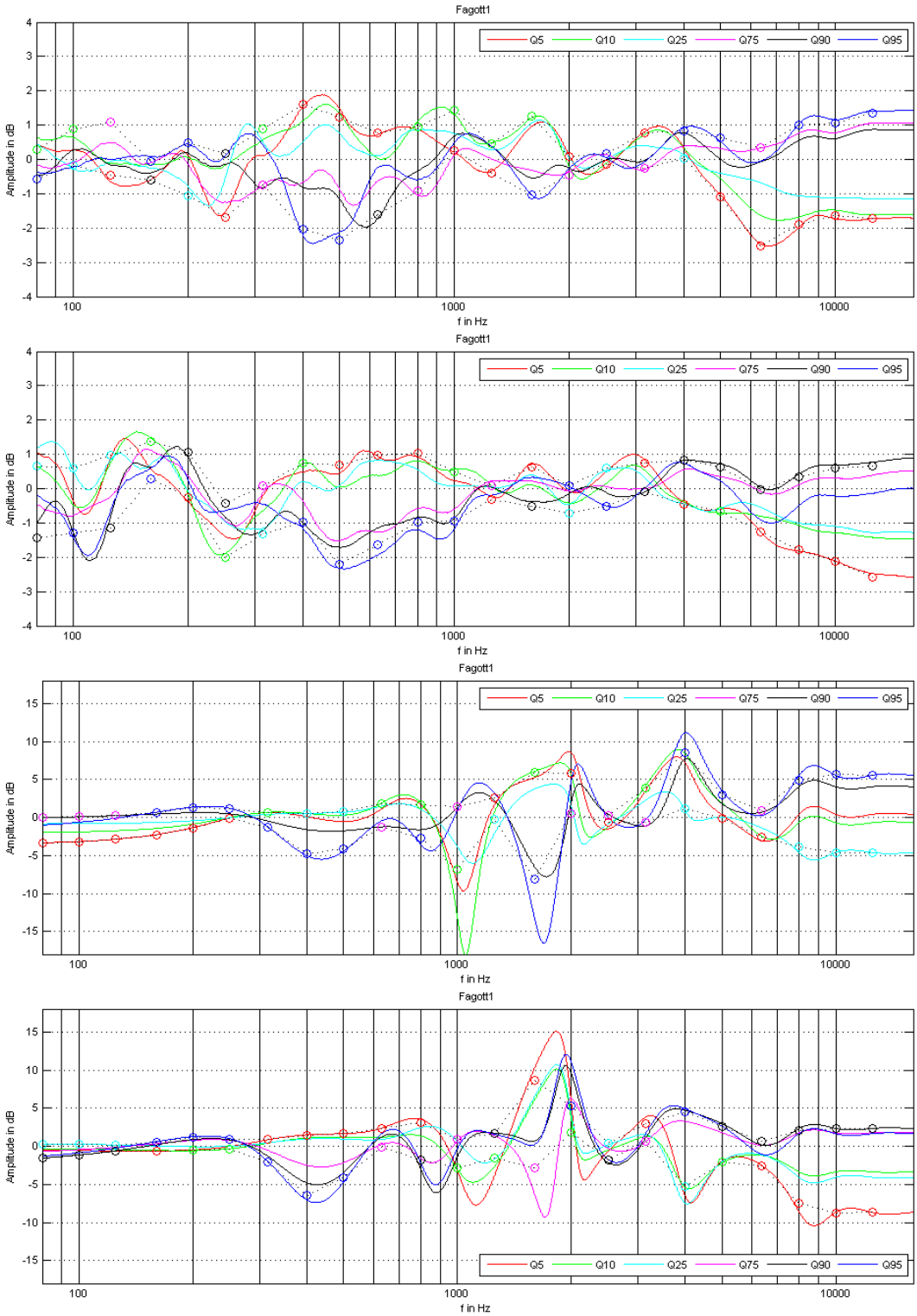

Abbildung B.11: Fagott 1: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend (hier Q75=Q90), unten: RAR sitzend.

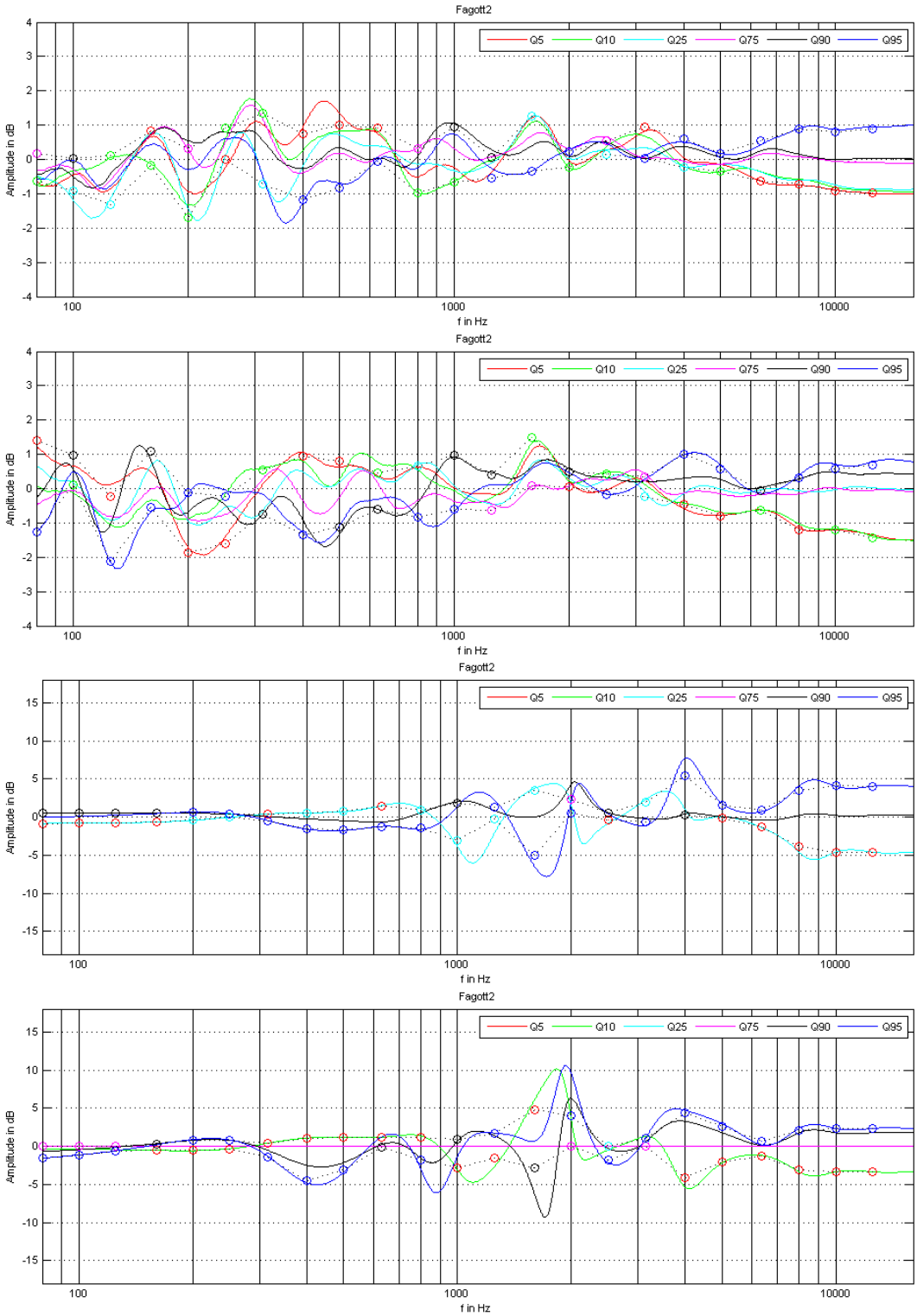

Abbildung B.12: Fagott 2: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend (hier Q5=Q10 und Q25=Q75), unten: RAR sitzend (hier Q5=Q10 und Q25=Q75=Q90).

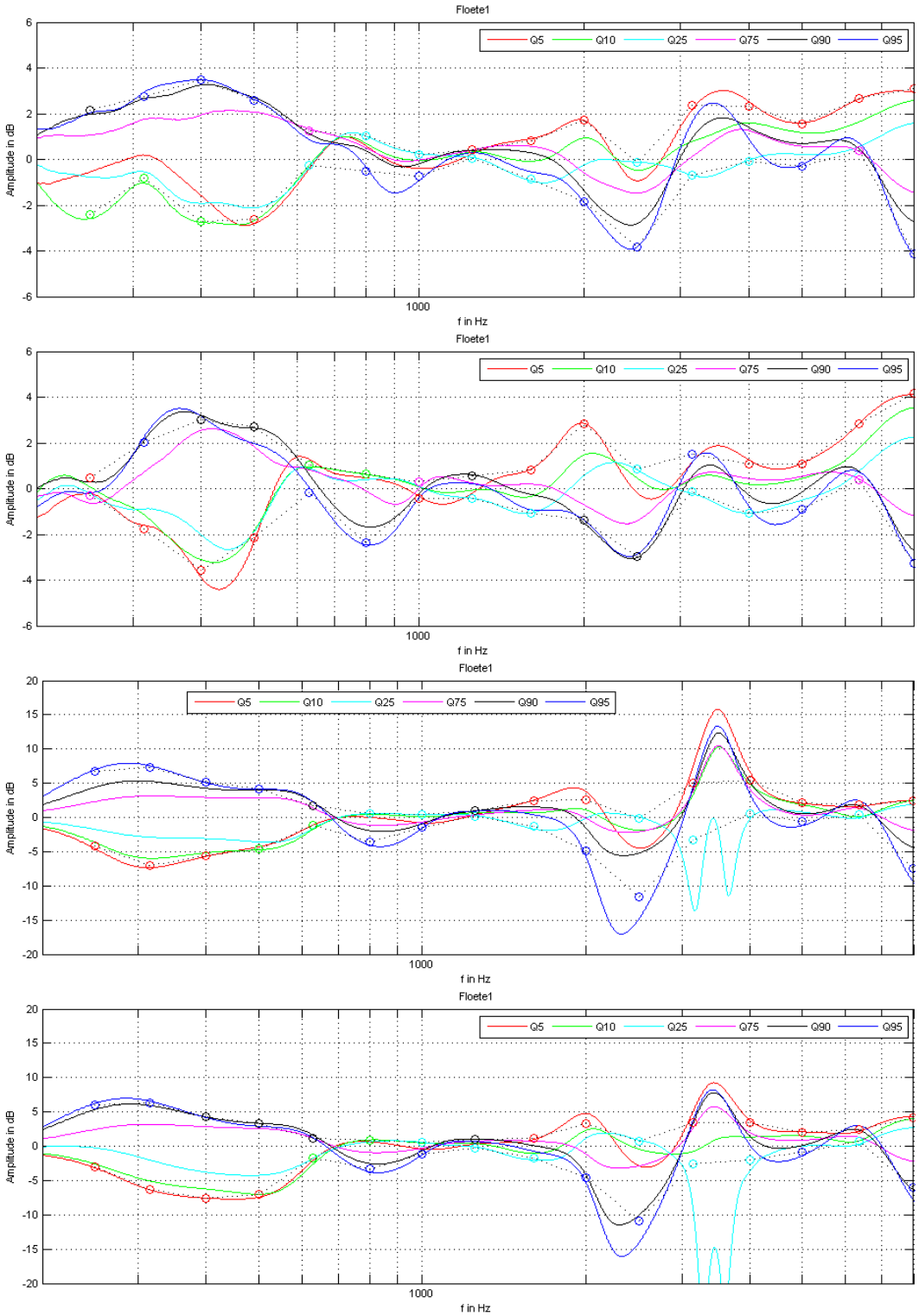

Abbildung B.13: Querflöte 1: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend, unten: RAR sitzend.

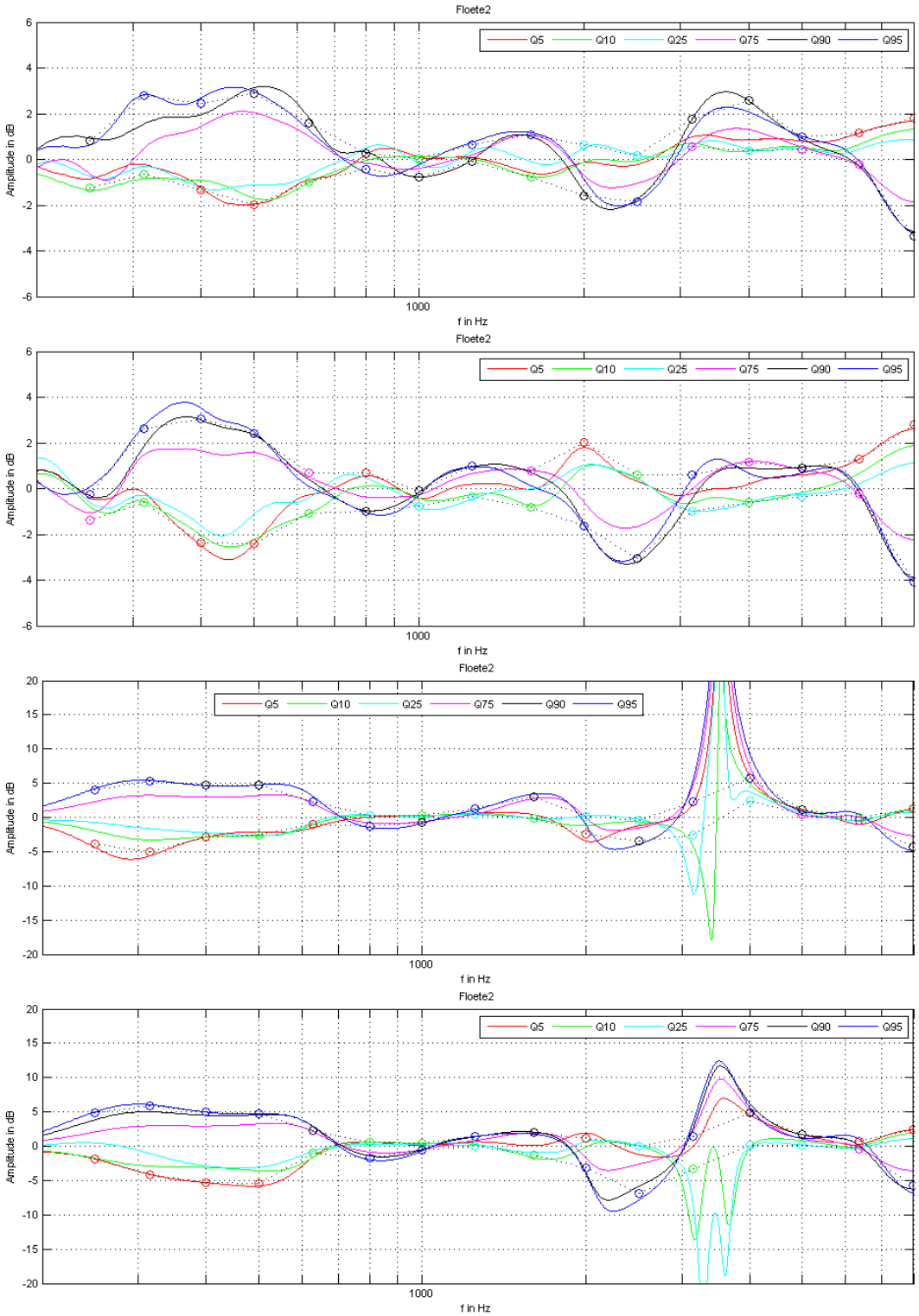

Abbildung B.14: Querflöte 2: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend (hier Q90=Q95), unten: RAR sitzend.

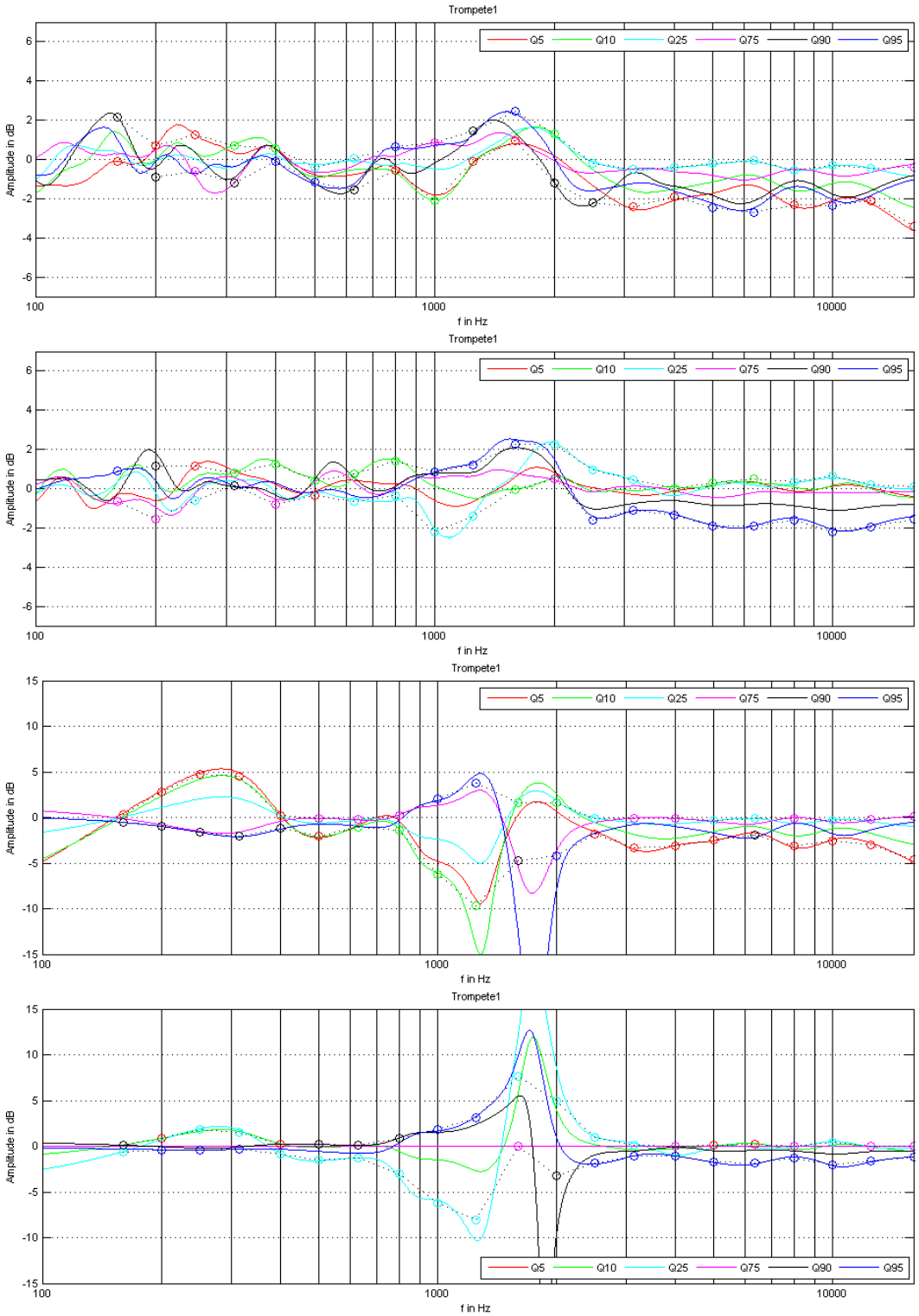

Abbildung B.15: Trompete 1: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend (hier Q90=Q95), unten: RAR sitzend (hier Q5=Q10).

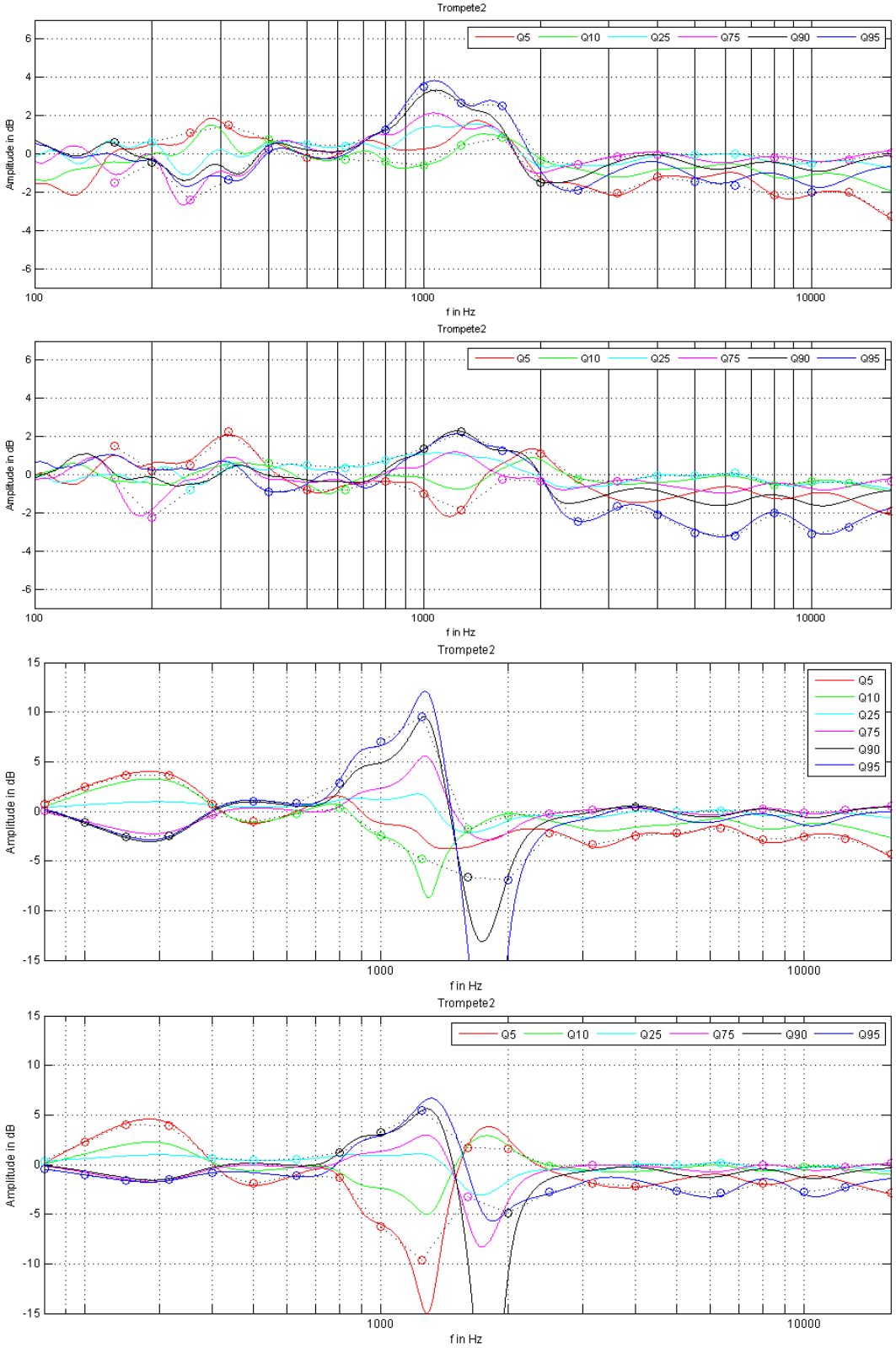

Abbildung B.16: Trompete 2: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend, unten: RAR sitzend.

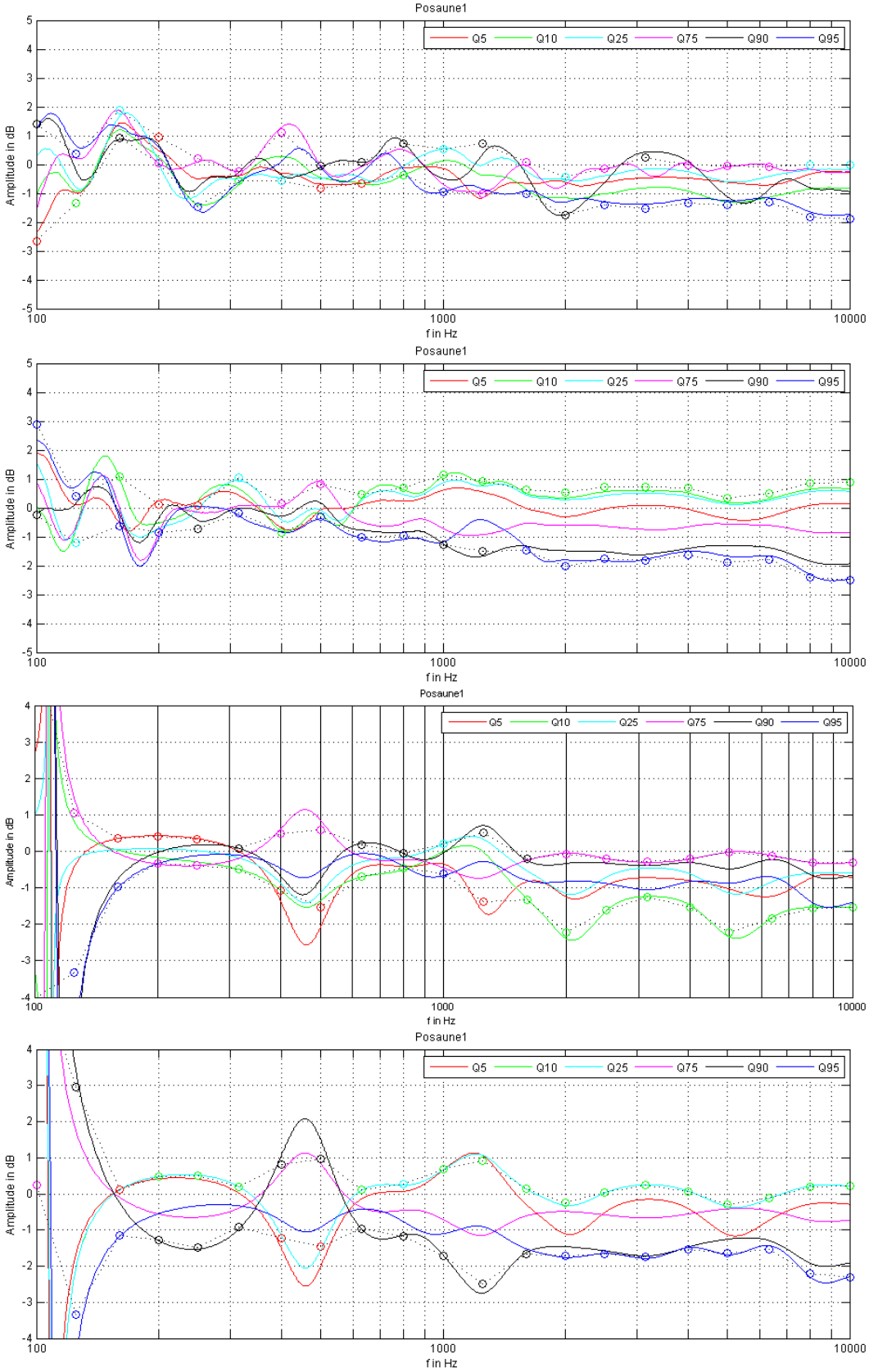

Abbildung B.17: Posaune 1: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend, unten: RAR sitzend (hier Q10=Q25).

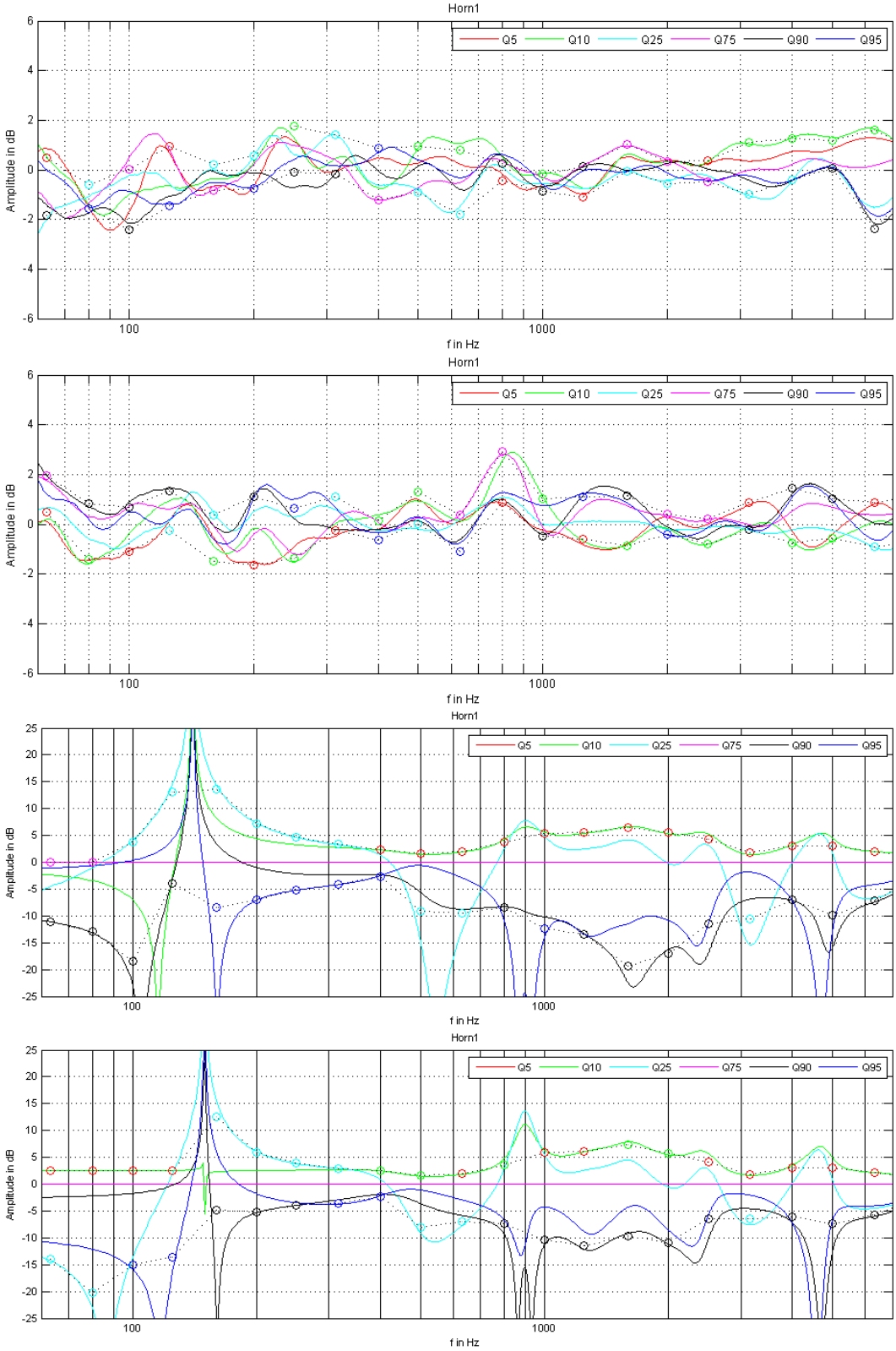

Abbildung B.18: Horn 1: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend, unten: RAR sitzend (RAR: Q5=Q10).

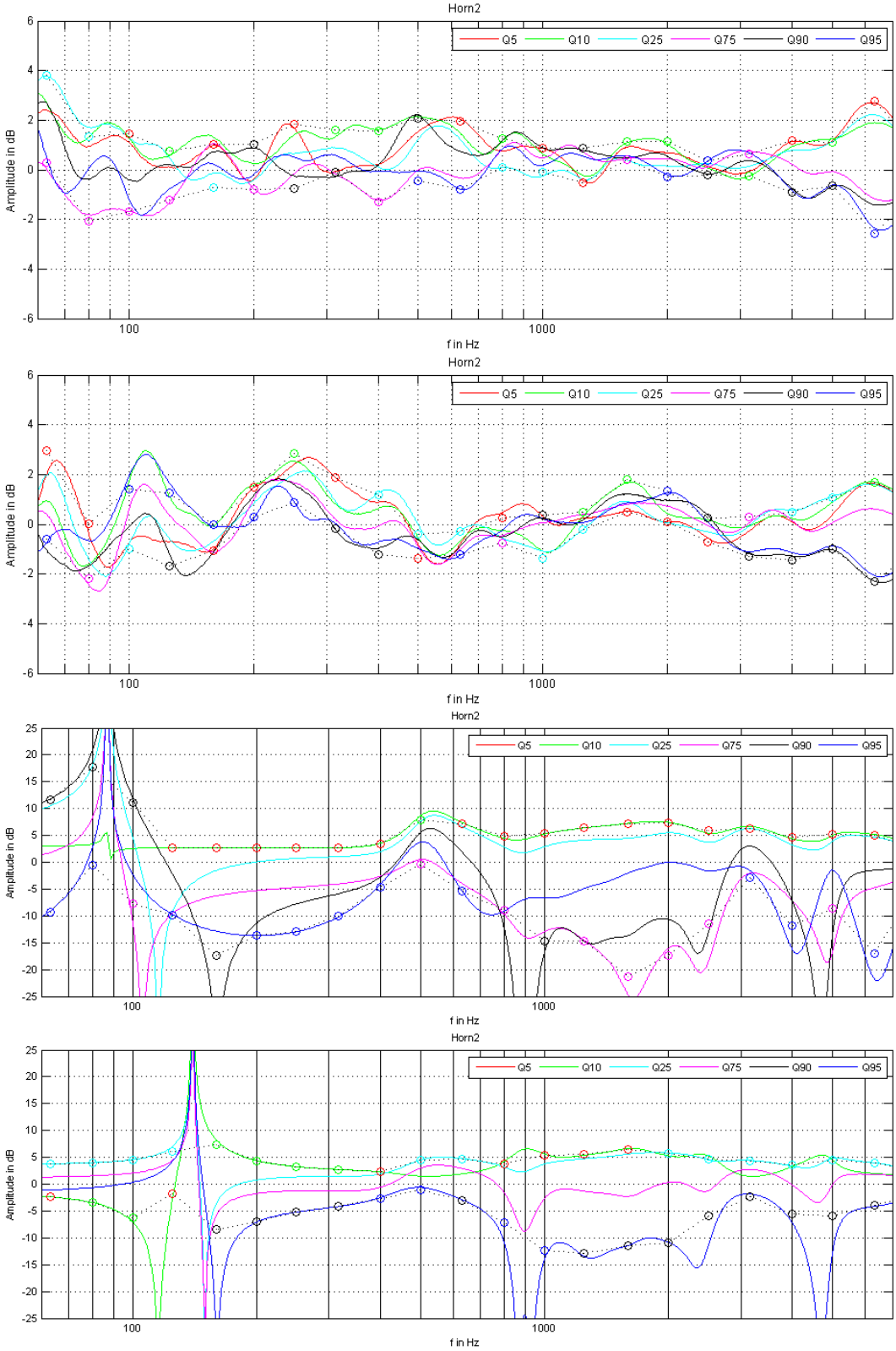

Abbildung B.19: Horn 2: Differenzplot der natürlichen Spielhaltung zu den Quantil-Orientierungen. Oben: Concertgebouw stehend, 2. von oben: Concertgebouw sitzend, 2. von Unten: RAR stehend (hier Q90=Q95), unten: RAR sitzend (hier Q5=Q10 und Q75=Q90).