

Dominik Steger, Hauke Egermann, Stefan Weinzierl

Spielbewegungen von Musikinstrumenten und deren Bedeutung für das Klangergebnis

Ein experimenteller Zugang durch Motion Tracking klassischer Orchesterinstrumente
und Auralisation der Bewegungsdaten

Conference paper | Published version

This version is available at <https://doi.org/10.14279/depositonce-8776>



Steger, Dominik; Egermann, Hauke; Weinzierl, Stefan (2015): Spielbewegungen von Musikinstrumenten und deren Bedeutung für das Klangergebnis - Ein experimenteller Zugang durch Motion Tracking klassischer Orchesterinstrumente und Auralisation der Bewegungsdaten. In: Fortschritte der Akustik - DAGA 2015: 41. Jahrestagung für Akustik, 16. - 19. März 2015 in Nürnberg. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. pp. 1425-1428.

Terms of Use

Copyright applies. A non-exclusive, non-transferable and limited right to use is granted. This document is intended solely for personal, non-commercial use.

WISSEN IM ZENTRUM
UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK

Technische
Universität
Berlin

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

Dominik Steger, Hauke Egermann, Stefan Weinzierl

TU Berlin, Fachgebiet Audiokommunikation, 10587 Berlin

E-Mail: stefan.weinzierl@tu-berlin.de

Einleitung

Die Bewegung eines Musikers während eines Live-Auftritts spielt eine wichtige Rolle für die Wahrnehmung der Expressivität der Darstellung [1][2][3]. Wird eine Schallquelle bewegt, so hat diese Bewegung jedoch auch unmittelbaren Einfluss auf das Klangergebnis, aufgrund der veränderten relativen Position von Schallquelle und Zuhörer zueinander, aufgrund der veränderten orientierten Richtcharakteristik der Schallquelle, sowie des aus diesem Grund unterschiedlich angeregten Raums, in dem die Aufführung stattfindet [4]. In der Virtuellen Akustik wird die Spielbewegung eines Musikers und seines Instruments bei der Auralisation typischerweise nicht berücksichtigt, so dass sich die Frage stellt ob die durch die Spielbewegung bedingten Modulationen des Klangs hörbar sind und ob deren Modellierung einen Beitrag leisten, die Simulation realistischer und lebendiger wirken zu lassen.

Messaufbau

Eine Messung von Spielbewegungen bei elf klassischen Orchesterinstrumenten wurde im Curt-Sachs-Saal des Staatlichen Instituts für Musikforschung (SIMPK) in Berlin durchgeführt (198 Sitzplätze, $T_{60} = 1,1$ s). Insgesamt nahmen 20 professionelle Musiker an der Versuchsreihe teil. Jeder Musiker führte jeweils drei Stücke unterschiedlichen Charakters mit einer Dauer von zwischen 1:30 und 2:30 Minuten je einmal stehend und sitzend auf der Bühne des Konzertsaals auf. Die stehende Position entspricht der Situation bei einer solistischen Aufführung, während die sitzende Position die Situation im Orchester wiedergibt. Während des Auftritts wurden am jeweiligen Instrument reflektierende Marker befestigt, welche von einem kamerabasierten Motion-Tracking-System (OptiTrack, 8 Kameras, Typ Flex13) verfolgt wurden und die Aufzeichnung von Position und Orientierung des Instruments im Raum ermöglichten. Zusätzlich wurde an jedem Instrument ein Mikrofon (AKG C417) befestigt, welches aufgrund des geringen Abstands relativ zum Instrument eine nahezu nachhallfreie Audioaufnahme ermöglichte. Eine Synchronisation der Audio- und Bewegungsdaten wurde mit Hilfe einer Starterklappe realisiert. Abbildung 1 zeigt eine Musikerin während der Messung im Konzertsaal.

Analyse der Bewegungsdaten

Zur Analyse der Bewegungsdaten wurde zunächst aus den in kartesischen Positionsdaten und als Eulerwinkel Yaw, Pitch

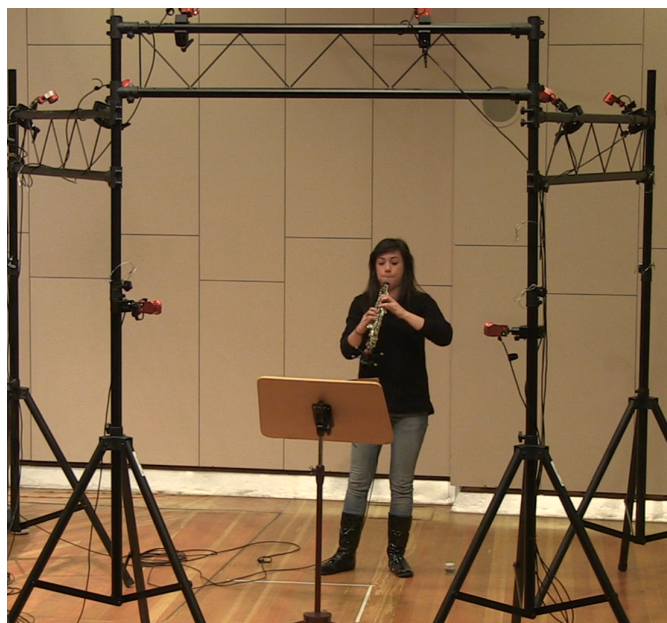


Abbildung 1: Messung der Spielbewegung einer Oboe im Curt-Sachs-Saal des Musikinstrumentenmuseums Berlin mit einem Kamera-basierten Motion-Tracking-Systems und reflektierenden Markern am Instrument.

und Roll (siehe Abbildung 2) vorliegenden Bewegungsdaten durch komponentenweise Subtraktion des Median der Position und der Orientierung ein relativer Bewegungsdatensatz erstellt, dessen Positions- und Orientierungswerte die Abweichung vom Median beschreiben, welcher als die mittlere, „natürliche“ Spielhaltung des Instruments angenommen wurde. Anschließend wurden die Bewegungsdaten der drei im Stehen und im Sitzen gespielten Stücke jeweils als ganzes betrachtet, so dass im weiteren Verlauf nur zwischen einer stehenden und einer sitzenden Aufführungsform unterschieden wurde. Da die räumliche Orientierung, d.h. die Ausrichtung des Instruments größeren Einfluss auf das klangliche Resultat nimmt als die relativ zum Hörabstand geringen absoluten Positionsänderungen, wurden im Folgenden nur die Orientierungsdaten eines jeden Instruments und Musikers, d.h. die drei Eulerwinkel Yaw, Pitch und Roll berücksichtigt. Aus der Verteilung dieser Daten über die Dauer der Aufnahme wurden für jedes Instrument und für jeden Musiker die Quantile $Q_{0,05}$, $Q_{0,1}$, $Q_{0,25}$, $Q_{0,5}$, $Q_{0,75}$, $Q_{0,9}$ und $Q_{0,95}$ berechnet, d.h. die Orientierungen, die in beide Richtungen relativ zur mittleren Haltung ($Q_{0,5}$) nur in 5%, 10% und 25% der Zeit überschritten wurden.

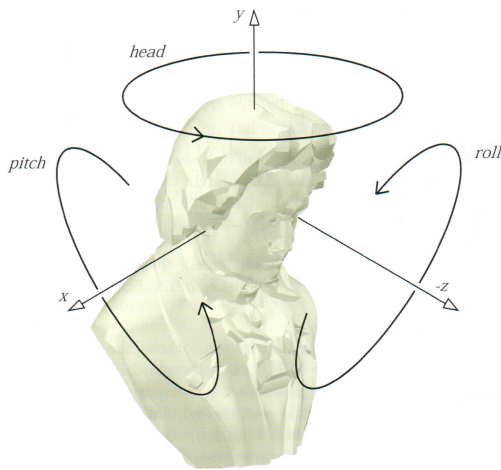


Abbildung 2: Beschreibung der Orientierung durch 3 Eulerwinkel: Yaw (Rotation um y, entspricht einem Kopfschütteln), Pitch (Rotation um x, einem Kopfnicken) und Roll (Rotation um $-z$, einem Kippen des Kopfes zur Seite).

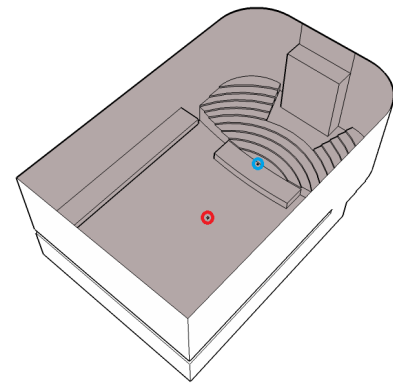


Abbildung 3: 3D-Computermodell (nachempfunden dem Concertgebouw Saal in Amsterdam) zur Simulation von Raumimpulsantworten. Empfängerposition in rot, Position der Schallquelle in blau.

Simulation von Raumimpulsantworten

Für jedes Instrument und jeden Musiker wurden anschließend unter Berücksichtigung der spezifischen Richtcharakteristik des Instruments für die mittlere Spielhaltung sowie die durch die jeweiligen Quantilwerte gegebenen, davon abweichenden Orientierungen Raumimpulsantworten simuliert. Für die Simulation der Richtcharakteristiken wurden die Daten einer Messreihe verwendet, bei der Orchesterinstrumente – darunter alle im vorliegenden Versuch eingesetzten – mit einem 32-kanaligen, sphärischen Mikrofonarray im reflexionsarmen Vollraum der TU Berlin vermessen wurden [5]. Für die Simulation der Raumimpulsantwort wurde ein dem Concertgebouw Saal in Amsterdam nachempfundenes 3D-Computermodell verwendet ($V = 22.700 \text{ m}^3$, $T_m = 2.41 \text{ s}$, s. Abbildung 3). Zur Simulation der Freifeld-Situation wurden alle Absorptionsgrade auf $\alpha = 1$ gesetzt, so dass bei gleicher räumlicher Konfiguration nur der Direktschall berücksichtigt wurde. Schallquelle und Empfänger wurden mittig im Konzertsaal platziert, wobei der Abstand zwischen Quelle und Empfänger mit 10 Meter etwa dem doppelten Hallradius entsprach. Anschließend wurden mit der Raumakustiksimulationssoftware RAVEN omnidirektionale Raumimpulsantworten simuliert (Ray Tracing mit etwa 75.000 Strahlen, Filterlänge 3485 ms, Zeitfenster: 13ms) [6]. Nachdem vor allem der Unterschied im Klangergebnis zwischen der mittleren Spielhaltung des Instruments (Medianorientierung des Bewegungsdatensatzes) und den davon abweichenden, seitlichen Orientierungen (Quantilwerte, s.o.) von Interesse ist, wurde in einem zweiten Schritt wiederum für jedes Instrument und jeden Musiker die Differenz der Amplitudenfrequenzgänge dieser abweichenden Orientierungen und der Medianorientierung berechnet. Abbildung 4 zeigt diese Differenzen exemplarisch für Trompete 1. Mit einem Kreis ist jeweils der Effektivwert des Schalldrucks in Terzbändern markiert [7].

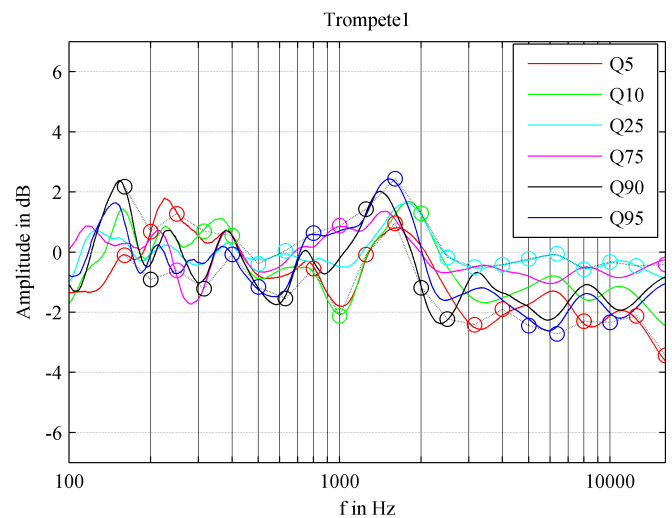


Abbildung 4: Darstellung der Abweichungen der Extremorientierungen von der Medianorientierung im Amplitudenfrequenzgang für die erste Trompete bei stehender Aufführung im nachhallbehafteten Modell des Konzertsaaes.

Um den Einfluss der Spielbewegung zwischen verschiedenen Instrumenten und Musikern im Vergleich zu ermitteln, wurde für jedes Instrument und jeden Musiker jeweils die größte maximale Abweichung im Frequenzgang in einem Terzband sowie die über alle Terzbänder gemittelte Abweichung im Frequenzgang ermittelt. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Tabelle 1 für das nachhallbehaftete und in Tabelle 2 für das nachhallfreie Modell des Konzertsaaes dargestellt. Die Werte zeigen, dass in der nachhallbehafteten Situation (Tabelle 1) etwa aus der Gruppe der Rohrblattinstrumente Oboe 2 bei stehender Spielweise mit 3,5 dB die größte mittlere Abweichung erreicht. In der Instrumentengruppe der Blechbläser liegt die größte mittlere Abweichung mit 2,1 dB bei Trompete 1 und in der Gruppe der Streicher mit 3,0 dB bei Violine 1 jeweils bei stehender Aufführung vor. Überraschend ist, dass die mittlere Abweichung im Stehen nur geringfügig höhere Werte annimmt als im Sitzen, und das bei bestimmten Instrumenten wie Posaune, Fagott 2 und Klarinette 2 sogar bei sitzender Aufführung geringfügig höhere Werte als im stehenden Fall erreicht werden.

Tabelle 1: Größte Abweichung ΔL_{\max} und mittlere Abweichung ΔL_m des innerhalb der Quantile $Q_{0,05}$ und $Q_{0,95}$ der Bewegungsamplitude über die Zeit veränderten und in Terzbändern analysierten Amplitudenfrequenzgangs für den nachhallbehafteten Fall (Konzertsaal, Abb. 3).

Instrument	ΔL_{\max} stehend [dB]	ΔL_m stehend [dB]	ΔL_{\max} sitzend [dB]	ΔL_m sitzend [dB]
Oboe 1	7,2	3,3	5,3	2,8
Oboe 2	7,9	3,5	5,7	2,6
Klarinette 1	6,6	2,5	6,9	3,0
Klarinette 2	4,1	2,0	4,0	2,3
Fagott 1	3,6	1,8	3,2	1,7
Fagott 2	2,1	1,2	2,7	1,4
Querflöte 1	7,2	3,2	7,4	3,0
Querflöte 2	5,2	2,3	6,9	2,6
Trompete 1	3,4	2,1	3,1	2,0
Trompete 2	4,1	2,0	4,1	2,1
Posaune 1	4,1	1,5	3,4	2,1
Horn 1	4,0	1,7	2,9	1,7
Horn 2	5,3	2,0	4,0	1,9
Viola 1	-	-	4,5	1,8
Viola 2	5,1	2,3	4,1	2,1
Violine 1	6,3	3,0	4,5	2,5
Violine 2	5,6	2,4	5,2	2,1
Kontrabass 1	3,3	1,8	-	-
Violoncello 1	-	-	2,9	1,4
Violoncello 2	-	-	1,5	1,0

Grundsätzlich liegen die mittleren Abweichungen durchgängig oberhalb von 1 dB, so dass sowohl bei stehender als auch bei sitzender Aufführung eine wahrnehmbare Klangmodulation aufgrund der Bewegung bei allen Instrumenten erwartet werden kann.

Tabelle 2: Größte Abweichung ΔL_{\max} und mittlere Abweichung ΔL_m des innerhalb der Quantile $Q_{0,05}$ und $Q_{0,95}$ der Bewegungsamplitude über die Zeit veränderten und in Terzbändern analysierten Amplitudenfrequenzgangs für den nachhallfreien Fall.

Instrument	ΔL_{\max} stehend [dB]	ΔL_m stehend [dB]	ΔL_{\max} sitzend [dB]	ΔL_m sitzend [dB]
Oboe 1	14,4	7,7	19,4	6,7
Oboe 2	20,0	8,3	21,7	7,3
Klarinette 1	11,5	4,7	16,4	6,6
Klarinette 2	11,6	3,8	14,6	4,9
Fagott 1	14,1	5,0	11,4	4,7
Fagott 2	8,7	3,1	8,5	3,3
Querflöte 1	14,3	6,6	12,6	6,5
Querflöte 2	10,4	4,2	10,3	5,0
Trompete 1	13,4	4,0	11,1	3,1
Trompete 2	14,3	4,1	15,1	3,9
Posaune 1	9,8	2,1	6,4	2,3

Horn 1	25,8	13,9	22,7	12,2
Horn 2	28,5	16,2	18,3	10,1
Viola 1	-	-	9,0	4,3
Viola 2	13,9	5,9	14,6	6,3
Violine 1	13,5	8,1	13,5	7,7
Violine 2	14,4	6,5	12,7	6,4
Kontrabass 1	5,4	2,3	-	-
Violoncello 1	-	-	11,1	3,0
Violoncello 2	-	-	5,9	1,4

Bei der Analyse der nachhallfreien Situation (Tabelle 2), in der Abweichungen allein durch die spezifische Abstrahlcharakteristik des Instruments bestimmt sind, ergaben sich durchweg höhere Werte für die Abweichung im Frequenzgang. Über alle Instrumente hinweg liegt die mittlere Abweichung im nachhallfreien Modell im stehenden und im sitzenden Fall im Mittel etwa 4 dB höher als in der nachhallbehafteten Situation.

Auralisation und Hörversuch

Eine Analyse des Einflusses der Spielbewegung auf den Amplitudengang der korrespondierenden Raumimpulsantwort auf der Grundlage der statistischen Verteilung der räumlichen Orientierungen kann nur ein erstes Indiz für Veränderungen im klanglichen Ergebnis beim Zuhörer sein. Sie berücksichtigt nicht, wie schnell die Positionswechsel der Orientierungen geschehen, und ob dieser fließende Positionswechsel hörbar ist. Ebenso wird nicht berücksichtigt, wie viel Energie zu einem bestimmten Zeitpunkt im Audiosignal der Live-Aufführung im jeweiligen Frequenzband enthalten ist. Um diese Faktoren mit einzubeziehen, wurde eine Auralisation der bewegten Schallquelle erzeugt. Hierbei wurde aus jeder Instrumentengruppe jeweils dasjenige Instrument ausgewählt, welches die größte mittlere Abweichung bei der Simulation der Raumimpulsantworten erzielte (vgl. Tabelle 1). Für Oboe 1, Violine 1 sowie Trompete 1 wurde je ein Ausschnitt von 15 s Dauer mit signifikanter Bewegungsamplitude aus der Live-Aufführung gewählt. Die Auralisation wurde wiederum mit der Raumakustiksimulationssoftware RAVEN durchgeführt, dessen Animationsmodul die Möglichkeit bietet, bewegte Schallquellen und Empfänger zu modellieren [6]. Hierbei wurde für jedes der drei Instrumente jeweils eine Auralisation unter Berücksichtigung der Spielbewegung (Veränderung der Positions- und Orientierungswerte des Instruments über die Zeit) sowie eine Variante mit unveränderter Haltung des Instruments erstellt. Die Lage des Instruments bei der unbewegten Variante im Raum entsprach hierbei der Startposition und -orientierung der Bewegungssimulation.

Der Hörversuch wurde als ABX-Test durchgeführt, in welchem die Bewegungssimulation mit der unbewegten Auralisation verglichen wurde. Die drei Instrumente (Oboe, Violine, Trompete) wurden sowohl im nachhallbehafteten wie im nachhallfreien Modell miteinander verglichen. So wurden für jede Versuchsperson (VP) 6 ABX-Tests (drei Instrumente in je zwei raumakustischen Bedingungen) à 20 Trials durchgeführt. Insgesamt nahmen 11 VP teil, ohne Ausnahme Studierende der Audiokommunikation der TU

Berlin mit Erfahrung als Probanden in Hörversuchen. Somit wurden pro Instrument und Raum insgesamt 220 Trials durchgeführt (11 Versuchspersonen, 20 Trials pro ABX-Test). Die α -Fehler-Kumulation bei multiplen Testen wurde durch eine Bonferroni-Korrektur berücksichtigt, so dass ein Signifikanzniveau von $5\% / 6 = 0,83\%$ bzw. $1\% / 6 = 0,17\%$ angesetzt wurde. Bei einer Anzahl von 220 Trials müssen pro Instrument und Raum somit mindestens 129 korrekte Antworten vorliegen, um von einer überzufälligen Erkennung in der gepoolten Analyse der Daten auszugehen [8]. Wie die Erkennungsraten zeigen (Abb. 5), wird dieser Wert in 5 von 6 Fällen übertroffen. Lediglich für Trompete in der nachhallbehafteten Situation wurden die durch die Bewegung induzierten Klangveränderungen nicht signifikant detektiert. Bei Trompete und Violine wurden im nachhallfreien Fall jeweils mehr korrekte Antworten als im nachhallbehafteten Modell gegeben, bei Oboe wurde der Unterschied jedoch im Modell des Konzertsaals häufiger erkannt als in der Freifeld-Situation. Einige Versuchsteilnehmer haben im Anschluss an den Hörversuch angegeben, dass sie bei der Oboe im nachhallbehafteten Modell an einigen Stellen einen Unterschied anhand von Raumreflexionen identifiziert hätten, so dass dies ein Grund dafür sein könnte, dass ein Unterschied zwischen den Stimuli bei diesem Instrument im nachhallbehafteten Fall besser erkannt wurde.

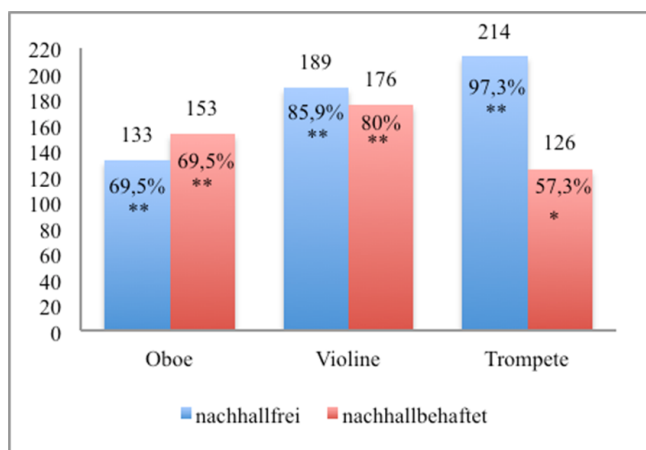


Abbildung 5: Anzahl an korrekten Detektionen für insgesamt 220 Trials bei 11 Versuchsteilnehmern bei der Auralisation bewegter und unbewegter musikalischer Aufführungen im ABX-Test (absolut und prozentual) für drei Instrumente und zwei raumakustische Bedingungen (** für $p < 0.0017$, * für $p < 0.0083$).

Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Studie wurden Spielbewegungen für elf klassische Orchesterinstrumente aufgezeichnet, gespielt von insgesamt 20 professionellen Musikern. Der Einfluss der Bewegung auf das klangliche Ergebnis beim Hörer wurde zum einen durch eine Analyse der durch die Bewegung induzierten Veränderungen im Amplitudengang der zugehörigen Raumimpulsantwort untersucht, zum anderen durch einen Hörversuch, bei dem Auralisationen einer musikalischen Aufführung mit bewegtem und unbewegtem Instrument für drei exemplarische Instrumente in einem ABX-Test verglichen wurden.

Bei einer Analyse der in Terzbändern ausgewerteten Veränderungen im Amplitudengang, die durch Bewegungen im Bereich von 5 % und 95 % der Bewegungsamplitude über die Zeit induziert werden, ergaben sich in der nachhallbehafteten Situation Abweichungen von 2 dB bis 8 dB in einzelnen Terzbändern und 1 dB bis 3,5 dB im Mittel über alle Terzbänder. Im Freifeld (Direktschall) liegen die Abweichungen im Mittel etwa 4 dB höher als in der nachhallbehafteten Situation. Im Hörversuch konnten die bewegungsinduzierten Klangveränderungen in 5 von 6 Fällen hochsignifikant erkannt werden.

Die Ergebnisse belegen das expressive Potential, das von Spielbewegungen nicht nur im Hinblick auf das visuelle Erleben, sondern auch auf akustischer Ebene ausgeht. Wenn musikalische Aufführungen in virtuellen akustischen Umgebungen authentisch nachgebildet werden sollen, muss dies in geeigneter Weise berücksichtigt und nachgebildet werden. In welcher zeitlichen und räumlichen Auflösung dies erfolgen muss, wäre durch weitergehende Analysen zu ermitteln und durch neue Ansätze zur Kodierung der Richtungswirkung und deren zeitlicher Modulation zu realisieren. Ebenso wichtig ist die Frage nicht nur ob, sondern *wie* sich bewegte und unbewegte Stimuli unterscheiden, ob etwa der Grad an Realismus oder die ‚Lebendigkeit‘ der musikalischen Darstellung davon berührt ist, was auf Grundlage der vorliegenden Daten nur vermutet werden kann.

Literatur

- [1] Nussek, M., Wanderley, M.M.: Music and motion – how music-related ancillary body movements contribute to the experience of music. *Music Perception* 26 (2009), 335–353
- [2] Vines, B.W., Krumhansl, C.L.; Wanderley, M.M., Dalca, I.M., Levitin, D.J.: Music to my eyes: Cross-modal interactions in the perception of emotions in musical performance. *Cognition* 118 (2010), 157–170
- [3] Mito, Y., Kawakami, H., Miura, M., Shinoda, Y.: The examination of the performance motion and emotional valence by a pianist. *J. Acoust. Soc. Am.* 133 (2013), 3366
- [4] Otondo, F., Rindel, J.H.: The influence of the directivity of musical instruments in a room. *Acta Acustica united with Acustica* 90 (2004), 1178–1184
- [5] Pollow, M., Behler, G., Masiero B.: Measuring natural sound sources with a spherical microphone array, *Ambisonics Symposium*, Graz 2009
- [6] Akustiksimulationssoftware Raven, URL: <http://www.akustik.rwth-aachen.de/Forschung/Projekte/raven>
- [7] Couvreur, C.: Implementation of a One Third-Octave Filter Bank in Matlab. URL: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/30942-one-third-octave-filter-bank--including-additional-inputs-and-outputs/content/oct3bankFc.m>
- [8] Leventhal, L.: Type 1 and Type 2 Errors in the Statistical Analysis of Listening Tests. *J. Audio Eng. Soc.* 34 (1986), 437–453