

Dynamische Richtwirkung von Musikinstrumenten

Von der Analyse zur Synthese

Malte Kob, David Ackermann, Stefan Weinzierl, Franz Zotter

Neben den zeitlichen und spektralen Merkmalen liefert auch die Abstrahlung in den Raum einen wesentlichen Beitrag zum spezifischen Klangcharakter von Musikinstrumenten. Sowohl die Hauptabstrahlungsrichtung als auch die Abstrahlung zu seitlichen oder rückwärtigen Richtungen trägt, vermittelt über die Akustik des Aufführungsraums, zum perceptiven Eindruck des Instruments bei. Eine besondere Herausforderung ist die Darstellung der komplexen Richtcharakteristik musikalischer Instrumente bei der Simulation akustischer Klänge in virtuellen Umgebungen. Der folgende Beitrag geht auf die Grundlagen der Messung von Richtcharakteristiken ein, auf Ursachen für Messfehler, die Auswirkungen dynamischer Spielbewegungen von Musikern mit ihren Instrumenten sowie auf Methoden der elektroakustischen Simulation und der Auralisation von Schallquellen mit frequenzabhängiger Richtwirkung.

Abstrahlung von Musikinstrumenten

Dieser Beitrag wurde motiviert aus dem gemeinsamen Herbstworkshop "Richtwirkung von Musikinstrumenten – Physik, Messung und Simulation" der DEGA-Fachausschüsse "Musikalische Akustik" und "Virtuelle Akustik" am 4. und 5. Oktober 2017 an der TU Berlin, der die Komplexität des Themas und die Vielzahl noch ungelöster Probleme verdeutlicht hat. Die Beiträge reichten von der Schallentstehung bei Streichinstrumenten über verschiedene Aspekte der Messtechnik bis hin zur Synthese von Abstrahlcharakteristiken als Herausforderung für Elektroakustik und Signalverarbeitung und als Gestaltungsparameter für die musikalische Komposition. Die Spannweite und die Aktualität der einzelnen Themen (Programm und pdf-Dokumente zum Herbstworkshop finden sich auf der DEGA-Webseite [1].) war ein Anlass, dem Themenkomplex einen überblicksartigen Beitrag zu widmen.

Ursache der Abstrahlung von Musikinstrumenten

Die Abstrahlung stellt einen Zwischenschritt in der Kette der Musikübertragung vom Musizierenden über das Instrument und den Raum bis zu den Zuhörenden dar. Als akustischer Strahler wirken Luftsäulen oder Oberflächen des Instruments, die mit der Umgebung akustisch verbunden sind. Ursache dieser Schwingungen sind im musikalischen Kontext erzeugte und ggf.

Analysis and synthesis of dynamic directivity of musical instruments

Not only the temporal and spectral properties of musical instruments, but also their radiation characteristics are an important element of their specific timbre. Mediated through the acoustics of the performance space, also the lateral and rear radiation contributes to the sound of an instrument, both for the audience and the players themselves. A particular challenge is the representation of the complex directionality of musical instruments in virtual acoustic environments. This contribution addresses fundamentals of directivity measurements, origins of measurement errors, consequences of dynamic player motion as well as methods for the electro-acoustic simulation and auralization of sound sources with frequency-dependent directivities.

vom Instrument geformte Schallwellen. Die Effizienz, mit der die Abstrahlung erfolgt, ist oft vom Kompromiss geprägt zwischen der Klangformung innerhalb des Instruments und der Übertragung des Schalls für die Wahrnehmung außerhalb des Instruments. Während die Tonhöhen- und Klangeinstellung das Ergebnis einer Rückkopplung zwischen Resonatoren wie z. B. Zunge und Körper einer Pflöfe ist, stellt die Abstrahlung einen oft gezielt verursachten Verlust von Energie aus diesem Resonanzsystem dar, z. B. durch das Labium oder das passive (obere) Ende einer Pflöfe. Wie bei dieser kann die Abstrahlung an mehreren Orten simultan erfolgen. Aus den unterschiedlichen Schalldruckwerten, der räumlichen Anordnung und der relativen Phasenlage ergeben sich bei Musikinstrumenten oft sehr komplexe, meist schwer oder gar nicht analytisch beschreibbare Abstrahlungsverhältnisse.

Beschreibung und Darstellung der Abstrahlung

Die Abstrahlung von Instrumenten kann entweder über die Beschreibung aller an der Oberfläche des Instruments befindlichen Schwingungsquellen charakterisiert werden oder über die Wirkung der Summe aller Schwingungsquellen in einem Abstand zum Instrument. Die erste Beschreibung kann mit einer Vielzahl phasenrichtig erfasster Schallfeldgrößen wie Schalldruck oder Schallschnelle an der Oberfläche des Instruments erfolgen oder mit Hilfe einer Mik-

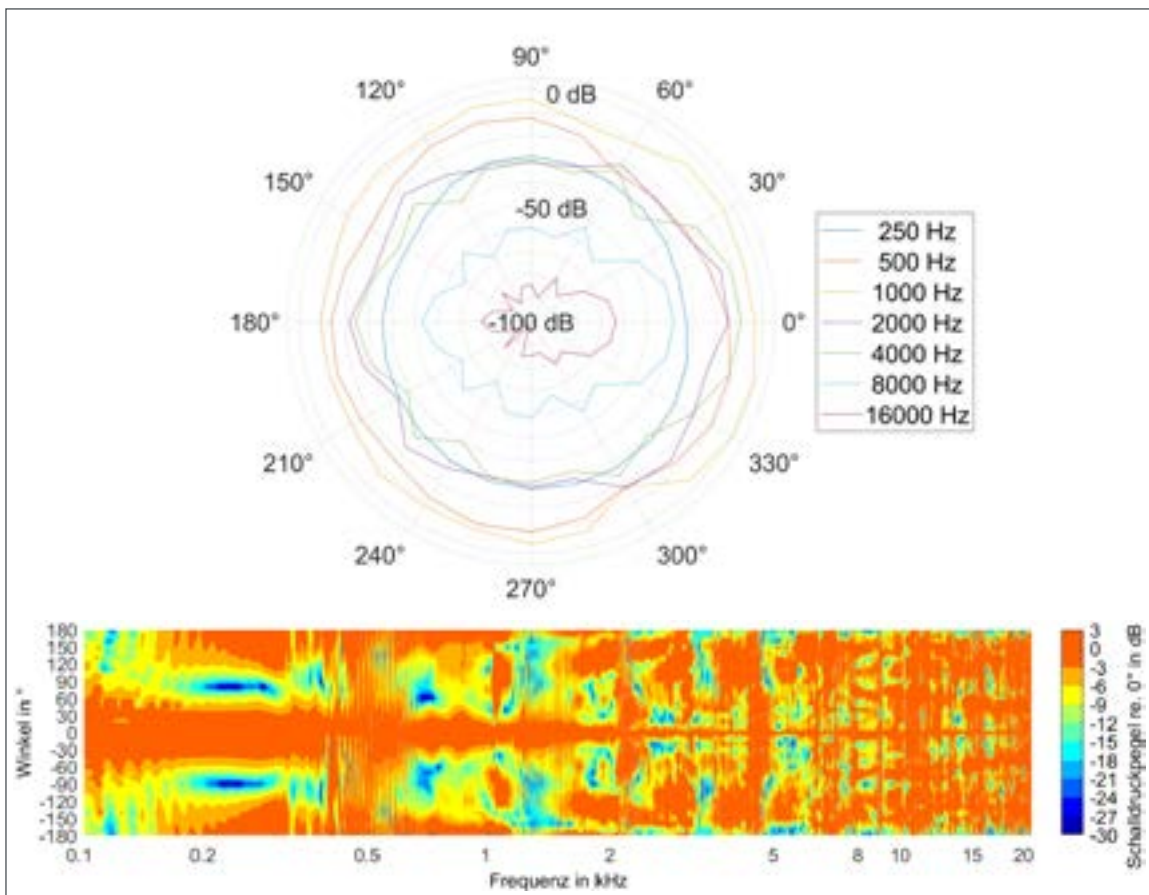


Abb. 1: Darstellung der Abstrahlcharakteristik einer Trompete mit einem Polardiagramm (oben) und einer Scheibe mit einem Isobaren-Diagramm (unten).

rofonarrayanordnung aus einer Distanz von wenigen cm auf die Oberfläche zurückgerechnet werden [2]. Die alternative Methode zur Erfassung der Abstrahlung ist die Mikrofonierung des Schallfelds in einigen Metern Entfernung vom Instrument, so dass an einem potenziellen Abhörort der von allen Abstrahlflächen und -öffnungen bewirkte überlagerte Schalldruck aufgezeichnet wird, so wie er an das Ohr eines Zuhörers oder einer ZuhörerIn gelangen würde. Diese Mikrofonierung müsste – um alle Richtungen zu erfassen – entweder auf einer Kugelfläche um das Instrument herum mit sehr vielen Mikrofonen oder aber wiederholt mit einem Mikrofon bei gedrehtem Instrument erfolgen. Ergebnisse umfangreicher Messungen an den meisten Orchesterinstrumenten finden sich in dem Standardwerk “Akustik und Musikalische Aufführungspraxis” von Jürgen Meyer [3], eine neuere Messreihe entstand in Kooperation des ITA Aachen und der TU Berlin [9].

Da die Abstrahlcharakteristik stark frequenzabhängig ist, ist ihre Auswertung in Frequenzbändern sinnvoll. Die Frequenzbreite der Bänder hängt von der Anwendung ab; oft genügt eine qualitative Beschreibung in Oktav- oder Terz-Frequenzbändern, manchmal ist eine genauere Analyse in Halbtonschritten oder noch feiner sinnvoll.

In Abbildung 1 ist oben die Abstrahlung einer Trompete in einem Polardiagramm dargestellt. Für jedes Frequenzband – hier Terzbänder im Oktavabstand – ist eine geschlossene Linie sichtbar, deren Radius dem Schalldruckpegel in einer Schnittebene (meist Horizontal- oder Vertikalebene senkrecht zur Hauptabstrahlrichtung des Instruments) entspricht. Oft erfolgt – wie hier – eine Normierung der Darstellung auf den maximalen Pegel aller Messungen. Diese Darstellung lässt erkennen, dass die Abstrahlung dieses Instruments bei tiefen Frequenzen kugelförmig, bei hohen jedoch zunehmend gerichtet ist. Beim Isobaren-Diagramm (Abb. 1 unten) werden die Schalldruckpegel über der Frequenz (Horizontalachse) und dem Winkel (Vertikalachse) aufgetragen. Weitere Darstellungsformen der Richtcharakteristik sind z. B. der Isobarenplot, der häufig für Lautsprecher Anwendung findet und die 3D-Ballon-Darstellung (siehe Abb. 2). Die Messdaten stammen aus der Richtcharakteristik-Datenbank von Musikinstrumenten der TU Berlin [4].

Auswirkungen der Abstrahlung für die musikalische Performance

Die Abstrahlung bestimmt den Höreindruck der musikalischen Aufführung an einem Hörort im Raum und ist somit von großer Bedeutung sowohl

für z. B. die Aufstellung von Musikern auf einer Bühne als auch für die Position von Zuhörenden. Ist die Abstrahlung auf reflektierende Flächen in der Umgebung des Instruments gerichtet, wird von diesen der Schall zurückgeworfen und überlagert sich dem direkt vom Instrument abgestrahlten Schall. Dies führt zu einer Zunahme des Schalldruckpegels an der Position der Musizierenden aber auch benachbarter Personen, so dass z. B. Ensembles einander besser akustisch wahrnehmen und z. B. besser rhythmisch, intonatorisch und klanglich zusammen spielen können. Starke Reflexionen aus der Nähe können jedoch auch zu Auslöschung einiger Frequenzanteile des Klangs führen (destruktive Interferenz), was bei der Mikrofonierung zu beachten ist [5].

Auswirkungen reflektierender Körper bei Richtcharakteristik-Messungen

Idealerweise sollte die Messung der Schallabstrahlung von Instrumenten in einer reflexionsarmen Umgebung stattfinden, wie z. B. Freifeldräumen, um den Einfluss der Raumbegrenzungen und anderer schall-

reflektierender Flächen zu minimieren. Oftmals stellt aber bereits der Messaufbau mit den Befestigungen von Mikrofon(en), Drehteller und Halterungen für das Musikinstrument eine erhebliche Beeinträchtigung der Reflexionsfreiheit dar. In Abbildung 2 ist das Ergebnis einer Abstrahlungsmessung im Freifeldraum dargestellt, wobei im einen Fall keine besonderen Maßnahmen zur Unterdrückung von Reflexionen am Messaufbau durchgeführt wurden, im anderen Fall fast alle reflektierenden Flächen mit Absorptionsmaterial belegt wurden. Im Vergleich wird deutlich, dass die vermeintlich komplexe Abstrahlung im linken oberen Bild tatsächlich ein Artefakt unerwünschter Reflexionen ist. Weitere Einflüsse auf die Abstrahlung stellen auf Bühnen neben dem Boden, Wänden und anderen Musikinstrumenten insbesondere die Notenständer dar, deren Reflexionen ähnliche Schalldrücke erreichen wie der Direktschall [5]. Weitere Einflussfaktoren auf die Messung sind der Abstand des Messmikrofons bzw. der -mikrofone sowie der Einfluss der spielenden Musiker [6].

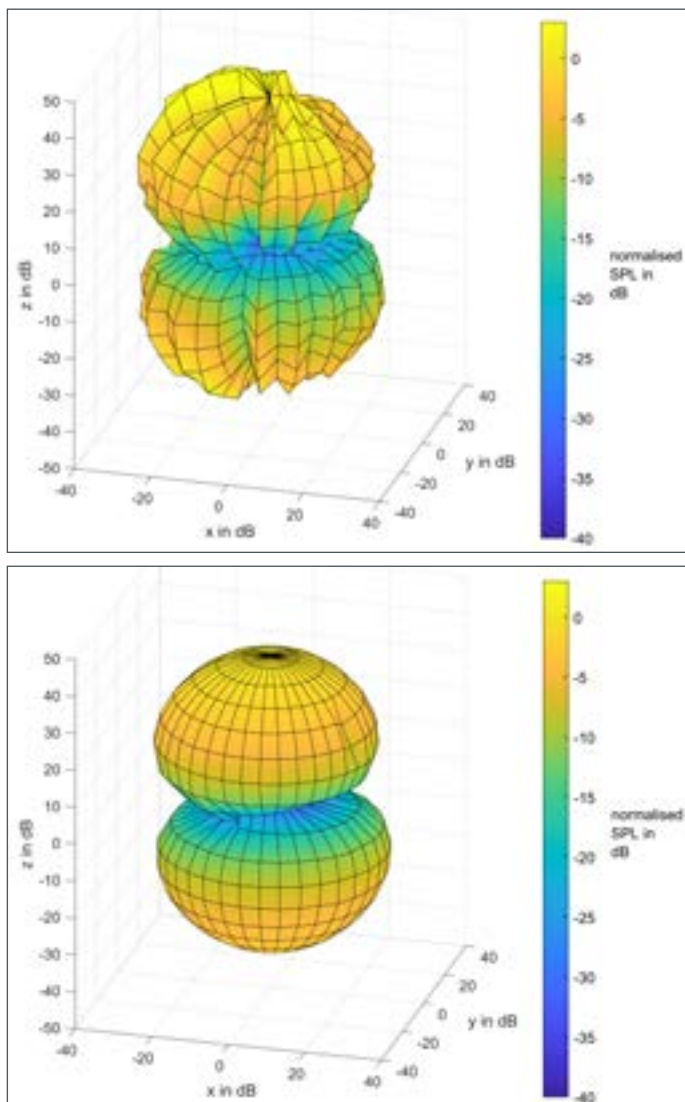


Abb. 2: Vergleich der Balloon-Darstellungen von Richtcharakteristik-Messung einer Scheibe ohne (links oben) und mit (links unten) optimierter Absorption auf reflektierenden Flächen (rechts).

Abbildungen: Nathan Flipo.



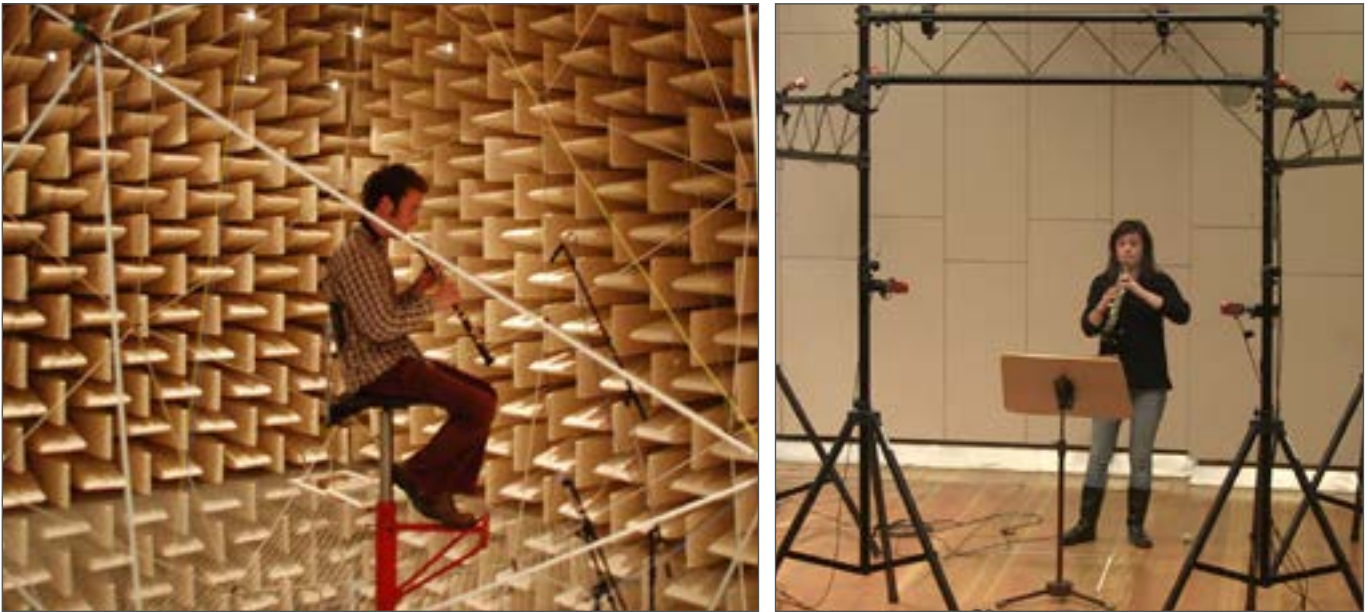


Abb. 3: Messung der Richtcharakteristik im reflexionsarmen Raum der TU Berlin (links) und Aufbau zum Aufzeichnen der Bewegungsdaten und des Audiosignals (rechts). Das Mikrophon wurde am Instrument befestigt, welches von acht Motion Tracking Kameras umgeben ist.

Dynamische Effekte

Akustische Musikinstrumente weisen, anders als technische Schallquellen, eine dynamische Richtwirkung auf. Diese variiert nicht nur mit dem gespielten Ton, sondern auch mit der Bewegung von Interpret/innen und ihrem Instrument während einer musikalischen Darbietung. Diese Spielbewegungen sind ein wichtiges Element der musikalischen Aufführungspraxis. Sie unterstützen die Kommunikation zwischen Musiker/in und Publikum nicht nur visuell [7], sondern führen auch zu einer Modulation des abgestrahlten Schallfeldes und damit zu einer Modulation des wahrgenommenen Schallereignisses am Hörerplatz. Die Größe und die perzeptive Relevanz dieser durch Spielbewegungen ausgelösten Änderungen des Schallfeldes wurde in der im Folgenden beschriebenen Studie empirisch untersucht.

Eine durch Spielbewegungen bedingte Modulation des Schallfeldes am Hörerplatz entsteht einerseits durch spektrale Änderungen, die sich aus einem Schwenken der frequenzabhängigen Richtcharakteristik ergeben, andererseits aus einer Änderung in der Anregung des Raums, wenn die frequenzabhängige Richtcharakteristik durch die Reorientierung des Instruments auf unterschiedliche Teile der Primär- und Sekundärstruktur des Raums trifft. Um den Einfluss der Bewegungen von Interpreten und Instrument auf das Klangerlebnis quantitativ zu untersuchen, wurde daher zum Einen die spektrale Modulation des Schallfeldes in nachhallfreier- und nachhallbehafteter Umgebung analysiert, zum Anderen wurde die Fluktuation raumakustischer Parameter nach ISO 3382 [8] ausgewertet. Der physikalischen

Auswertung folgte eine perzeptive Evaluation, um die Hörbarkeit von Spielbewegungen zu prüfen.

Mit Hilfe eines optischen Motion Tracking Systems (OptiTrack, Abb. 3, rechtes Bild) wurden die Spielbewegungen von 20 professionellen Musikern und Musikerinnen und ihrer Instrumente unter konzertähnlichen Bedingungen in stehender und sitzender Darbietung aufgezeichnet. Zusätzlich wurde das Audiosignal mit einem am Instrument befestigten Mikrophon aufgezeichnet. Die so erhaltenen Bewegungsdaten lassen sich auf bereits im Vorfeld gemessene Richtcharakteristiken ([4],[9]) aufprägen und somit das Abstrahlverhalten jedes Instruments synchron zu den erfassten Bewegungen virtuell rotieren. Daraus ergibt sich für den nachhallfreien Fall unmittelbar die spektrale Modulation an einem bestimmten Punkt im Raum. Eine Analyse des Schallfeldes in nachhallbehafteter Umgebung und die Untersuchung der Fluktuation raumakustischer Parameter erfolgte dann durch sequentielle raumakustische Simulationen der virtuell rotierten Schallquellen mit Hilfe der Software RAVEN, ein an der RWTH Aachen entwickeltes Programm zur raumakustischen Simulation und Auralisation [10]. Die zeitliche Auflösung der nacheinander durchgeführten Simulationen betrug 3 Hz. Bei einer Dauer der eingespielten Musiksequenzen von etwa 1 bis 4 Minuten ergaben sich so pro Musiksequenz zwischen 150 und 700 Datenpunkte. Als virtuelle akustische Umgebung diente ein Modell des Theater an der Wien, einer bekannten Aufführungsstätte für Musiktheater und Konzerte mit einer Nachhallzeit von $T_m = 1,4$ s. Der Empfänger befand sich im Zuhörerraum und 10 m entfernt von der schallabstrahlenden Quelle.

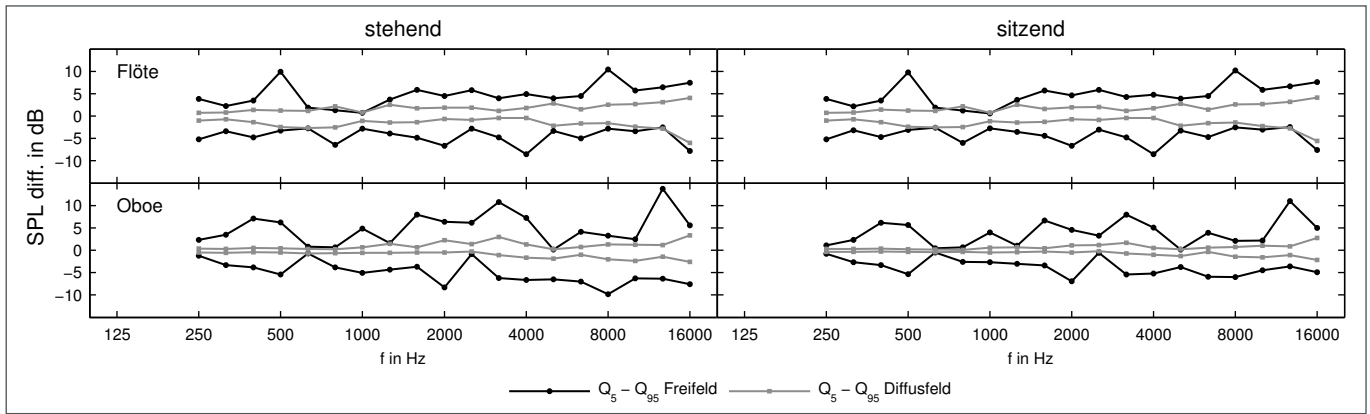


Abb. 4: Die durch die natürliche Bewegung des Musikinstruments induzierte, spektrale Fluktuation (5%/95% Quantile der Verteilung über die Dauer der Aufführung) für eine simulierte Schallquelle relativ zu einer statischen Quelle mit identischem Abstrahlverhalten. Gezeigt sind die Werte im Freifeld (schwarz) und im Diffusfeld (grau) sowie in sitzender und stehender Position für die Instrumente Flöte und Oboe. Bezugswert (0 dB-Linie) ist der Frequenzgang, der sich bei mittlerer Orientierung des Instruments (Medianwert der Bewegungsdaten) relativ zur Hörerposition ergibt.

Abbildung 4 zeigt, exemplarisch für die Instrumente Flöte und Oboe, die spektrale Fluktuation, welche durch die Bewegungen des Instruments, relativ zu einer statischen Quelle mit gleichem Abstrahlverhalten, am Hörerplatz induziert werden.

Die über alle spielbaren Terzbänder gemittelte spektrale Fluktuation beträgt in nachhallfreier akustischer Umgebung und in stehender Spielweise für die Flöte 9,2 dB und für die Oboe 10,1 dB. Die Werte sind etwas kleiner für die sitzende Position, ebenso in nachhallbehafteter Umgebung (Werte für alle Ins-

trumente in Tabelle 1).

Um den Einfluss der Spielbewegung auf das sich im Raum ausbildende Schallfeld zu charakterisieren, wurden zusätzlich zu den spektralen Änderungen raumakustische Parameter nach ISO 3382 aus den simulierten Raumimpulsantworten berechnet [11]. Dazu gehören gängige Werte zur Beschreibung musikalischer Aufführungsräume wie die Nachhallzeit (T_{20}), die Early Decay Time (EDT), das Klarheitsmaß (C_{80}) und die Deutlichkeit (D_{50}), das Stärkemaß (G) sowie der frühe seitliche Energieanteil (J_{LF})

Tabelle 1: Maximale sowie über alle spielbaren Terzbänder gemittelte spektrale Fluktuation (Abstand der 5% und 95% Quantile der Verteilung über die Dauer der Aufführung), im Freifeld und Diffusfeld, in sitzender und stehender Position. Bezugswert (0 dB-Punkt) ist das Spektrum bei mittlerer Orientierung des Instruments (Medianwert der Bewegungsdaten) relativ zur Hörerposition.

	stehend						sitzend					
	Freifeld			Diffusfeld			Freifeld			Diffusfeld		
	mean in dB	max in dB	f_{max} in Hz	mean in dB	max in dB	f_{max} in Hz	mean in dB	max in dB	f_{max} in Hz	mean in dB	max in dB	f_{max} in Hz
Violine	9,7	17,8	500	2,8	5,6	10.000	8,1	14,5	3.150	2,7	6,0	6.300
Viola	8,8	18,1	800	2,0	3,7	500	7,8	15,8	800	1,7	3,3	500
Cello	-	-	-	-	-	-	0,9	3,5	630	0,4	0,8	10.000
Bass	1,6	4,7	2.000	0,4	0,6	3.150	-	-	-	-	-	-
Flöte	9,2	15,3	8.000	3,7	10,0	8.000	9,1	15,2	8.000	3,6	9,7	8.000
Oboe	10,1	20,1	12.500	2,1	5,9	8.000	7,6	14,6	6.300	1,4	4,9	8.000
Klarinette	4,9	10,4	8.000	1,8	4,8	6.300	5,4	11,9	6.300	2,2	6,6	6.300
Fagott	4,7	9,6	2.000	1,7	3,7	16.000	5,3	12,0	2.000	1,9	4,4	16.000
Trompete	3,9	8,4	1.600	3,9	5,3	1.600	2,9	6,1	1.600	2,9	4,2	1.600
Horn	6,9	12,3	5.000	1,4	2,7	16.000	4,7	8,2	5.000	1,0	2,2	800
Posaune	2,3	8,1	2.000	2,9	4,9	2.000	1,9	7,1	2.000	2,4	4,2	2.000

Tabelle 2: Die durch die natürliche Bewegung des Musikinstruments induzierte Modulation raumakustischer Parameter nach ISO 3382-1 (5%/95% Quantile der Verteilung über die Dauer der Aufführung). Werte, die den ebenwahrnehmbaren Unterschied (JND) überschreiten, sind rot markiert; st = stehend, si = sitzend.

	T ₂₀ in ms		C ₈₀ in dB		D ₅₀ in %		EDT in ms		G in dB		L _j in dB		J _{LF} in %	
	st	si	st	si	st	si	st	si	st	si	st	si	st	si
Violine	20	17	2,0	1,6	12,2	9,8	35	42	1,8	1,4	4,3	4,4	8,4	7,4
Viola	20	20	3,4	3,4	24,2	23,6	77	54	4,9	4,5	4,3	3,7	7,7	6,4
Cello	–	6	–	0,3	–	1,9	–	34	–	0,4	–	0,4	–	2,4
Bass	2	–	0,3	–	1,8	–	20	–	0,4	–	0,6	–	0,5	–
Flöte	29	30	2,9	2,9	12,6	13,0	461	461	1,9	1,9	3,7	3,8	16,4	16,4
Oboe	3	3	1,0	0,6	6,8	3,8	57	29	1,2	0,7	2,4	1,7	3,0	2,0
Klarinette	6	7	1,0	1,3	6,9	9,4	54	54	0,4	0,4	1,1	1,6	1,8	1,5
Fagott	22	30	1,4	1,3	10,4	9,1	35	25	1,7	1,5	4,0	4,4	7,1	7,8
Trompete	19	17	2,2	1,6	7,1	4,7	331	218	0,9	0,6	3,4	2,2	3,3	2,4
Horn	5	3	1,5	1,2	8,0	6,1	147	123	1,1	0,9	4,0	2,9	9,0	7,9
Posaune	18	13	1,5	1,3	3,6	2,8	152	155	0,6	0,5	3,3	2,7	1,5	1,1

und der späte seitliche Schallpegel (L_j). Sie beschreiben den Einfluss des Raums auf die Lautstärke der Schallquelle, die Dauer des Nachhalls, die Klarheit und Deutlichkeit von Musik und Sprache im Raum sowie die räumliche Verteilung der Schallreflexionen am Hörerplatz. Auch hier wurden die 5%/95% Quantile der Verteilung über die Dauer der Aufführung als Indikator für die Stärke der Modulation des räumlichen Schallfelds berechnet (siehe Tab. 2). Sie können im Hinblick auf ihre Wahrnehmbarkeit mit den in [8] angegebenen Unterscheidungsschwellen (just notable differences, JND) verglichen werden. Parameteränderungen oberhalb des JND sind ein Hinweis auf die Hörbarkeit dieser Modulationen. Sie sind in Tabelle 2 rot markiert.

Es zeigt sich, dass Parameter, die vor allem den frühen Anteil der Impulsantwort auswerten, wie C_{80} , D_{50} , EDT, J_{LF} empfindlicher gegenüber Bewegungseinflüssen sind als Parameter für den späten Anteil der Impulsantwort, wie L_j und T_{20} . Für fast alle Instrumente überschreiten die Modulationen von C_{80} , D_{50} , EDT, J_{LF} und Modulationen des Stärkemaßes G die Schwelle der Hörbarkeit.

Da diese Streuungsmaße jedoch aus der Verteilung der Werte über die gesamte Dauer der musikalischen Darbietung abgeleitet sind, wurde zusätzlich ein Hörversuch durchgeführt, bei dem Versuchspersonen (VP) die Hörbarkeit des konkreten zeitlichen Verlaufs dieser spektralen und räumlichen Schallfeldmodulationen bewerten sollten. Es wäre schließlich denkbar, dass diese Änderungen jeweils so graduell erfolgen, dass sie während einer musika-

lischen Aufführung zu keinem Zeitpunkt hörbar in Erscheinung treten.

Im Hörversuch wurden 11 Probanden binaurale Auralisationen der Instrumente Violine, Flöte und Trompete vorgespielt. Jedes der drei Instrumente wurde dafür mit korrekter Richtcharakteristik im Raummodell des Theater an der Wien einmal mit statischer und einmal mit natürlich bewegter Richtwirkung simuliert. Die VP führten ABX-Tests durch, die aus jeweils 23 Trials bestanden. Konnte die VP den randomisiert vorgespielten Teststimulus X 18-mal oder häufiger richtig den beiden Referenzstimuli A (unbewegte Simulation) oder B (bewegte Simulation) zuordnen, so kann auf einem Signifikanzniveau von 5% davon ausgegangen werden, dass sie die Simulation mit natürlich bewegtem Instrument zuverlässig von der statischen Simulation unterscheiden kann.

Abbildung 5 zeigt die Erkennungsrate des Tests für alle Versuchspersonen und Testbedingungen. Die nachhallfreien Auralisationen konnten von fast allen Probanden richtig zugeordnet werden. Nur zwei VP verfehlten das Signifikanzniveau um jeweils eine falsche Zuordnung. In nachhallbehafteter Umgebung sind die Unterschiede, wie bereits die technische Analyse gezeigt hat, geringer. Die nachhallbehafteten Auralisationen konnten von 6 VP nicht richtig zugeordnet werden, in 3 Fällen lag die Erkennungsrate nahe der Ratewahrscheinlichkeit von 50%.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Spielbewegungen von musikalischen Interpreten als gestaltendes Element nicht nur einen visuellen Einfluss auf das wahrgenommene Musikereignis ausüben, sondern auch

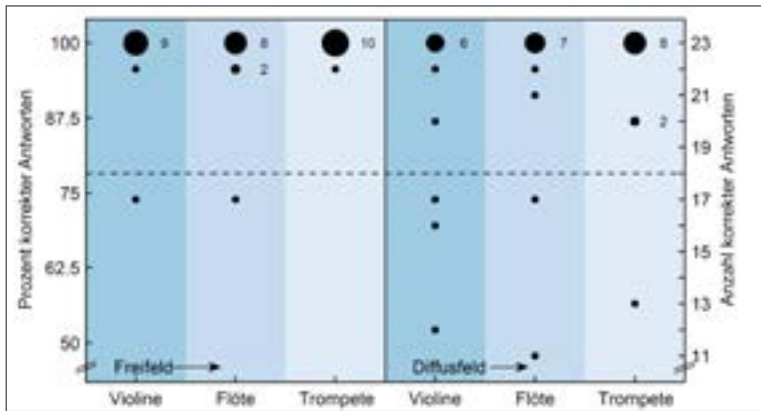


Abb. 5: Hörbarkeit von klanglichen Modulationen, die durch die natürliche Bewegung von Musikinstrumenten ausgelöst werden. Gezeigt sind die Erkennungsraten eines ABX-Tests für 11 Versuchspersonen und 6 Testbedingungen (drei Musikinstrumente \times 2 räumliche Bedingungen). Die Größe der Punkte und die nebenstehenden Zahlen geben die Anzahl der Versuchspersonen mit identischen Ergebnissen an. Werte auf oder über der gestrichelten Linie sind signifikant über der Ratewahrscheinlichkeit und zeigen, dass der Unterschied zwischen einer statischen und einer bewegten Quelle zuverlässig erkennbar war.

auf akustischem Weg als Teil der Kommunikation zwischen Musiker/in und Publikum wirksam werden. Für die virtuelle Akustik stellt sich somit die Aufgabe, auch das bewegungsbedingte, dynamische

Verhalten musikalischer Instrumente und musikalischer Aufführungen bei der Auralisation natürlicher Schallquellen zu berücksichtigen, wenn alle perceptiv relevanten Aspekte des akustischen Geschehens in der Simulation erhalten bleiben sollen.

Repräsentation und Wiedergabe

Musikinstrumente (einschließlich Musikerin/Musiker, etc.) können als kompakte Klangkörper aufgefasst werden, deren Richtwirkung am besten in ausreichend großer Entfernung in Richtungsanteile zerlegt wird. Ein solches richtungsbezogenes Klangabbild des Instruments ist theoretisch ein Zeitsignal $s(t)$, das für jede Abstrahlrichtung anders klingen darf, $s(t) = s(\theta, t)$, wobei θ der betrachtete Richtungsvektor ist. In dieser Form lässt sich ein richtungskontinuierliches Klangabbild in einer virtuellen Umgebung leicht durch Entnahme von Signalen an den benötigten Abstrahlrichtungen auralisieren, die über Schallausbreitungspfade im Raum an den Hörort übertragen werden. Alternativ kann die Auralisation durch einen geeigneten Kugellautsprecher erfolgen, der in den umgebenden physikalischen Raum projiziert. Dazu werden die Einzeltreiber des Kugellautsprechers so betrieben, dass sie das richtungskontinuierliche Klangabbild möglichst gut nachbilden.

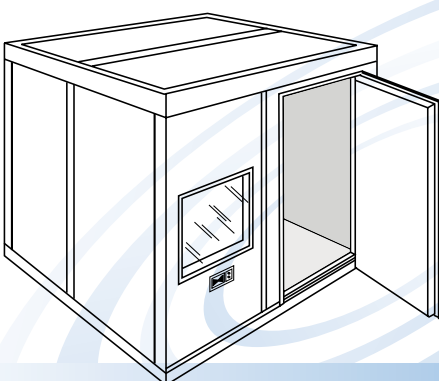
IAC Acoustics für Medizin und Forschung

Ein- und doppelwandige Akustikkabinen

IAC ist weltweit führender Hersteller und Lieferant von Akustik-Räumen, Kabinen und echofreien Kammern für die Hörforschung und -entwicklung sowie einer Vielzahl von Akustikprodukten mit nachgewiesener Wirksamkeit.

Akustiklösungen von IAC Acoustics

Langjährige Expertise, der Sie vertrauen können.



deutschland@iac-gmbh.de
www.iac-gmbh.de

Dem benötigten Ideal eines richtungskontinuierlich auslesbaren Klangabbilds kann man sich mit endlichem Speicheraufwand nähern. Dazu wird ein in reflexionsarmer Umgebung an diskreten Richtungen aufgenommenes Instrument zur Interpolation in Kugelfunktionen $Y_n^m(\theta)$ zerlegt (Abb. 6). Ihre Richtungsauflösung lässt sich auf die Ordnung N begrenzen, und daraus resultiert ein begrenzter Bedarf an $(N + 1)^2$ Koeffizientensignalen $\sigma_{nm}(t)$ für das richtungskontinuierliche Klangabbild

$$s(\theta, t) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n \sigma_{nm}(t) Y_n^m(\theta). \quad (1)$$

Das Signal des Klangabbilds $s(\theta, t)$ und seine zugehörigen Koeffizientensignale $\sigma_{nm}(t)$ werden häufig auch im Frequenzbereich ausgedrückt. Die Zerlegung $s(\theta, f) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n \sigma_{nm}(f) Y_n^m(\theta)$ gilt dort auch für die Signale $s(\theta, f)$ und $\sigma_{nm}(f)$ der zugehörigen Frequenzkomponenten.

Manche Instrumente führen zu starker Bündelung des Klangs, so z. B. Trompeten oder Posaunen, die den Schall stark gebündelt in die Austrittsrichtung am Schalltrichter abgeben. Solche Instrumente können gezielt Wandreflexionen bespielen, die dann im Publikum als scheinbarer Ursprung des Klanges gehört werden. Steht das Instrument selber nicht zur Verfügung, kann die Wirkungsweise durch Auralisation erzeugt werden.

Auralisation im physikalischen Raum: Kugellautsprecher

Kugellautsprecher (Abb. 7) bieten eine Möglichkeit, richtungsabhängige Klangabbilder in den umgebenden physikalischen Raum zu projizieren. Die Ansteuerung eines Kugellautsprechers ist mehrkanalig und erwartet im Falle des Ikosaederlautsprechers (IKO, [12]) die Koeffizientensignale $\sigma_{nm}(t)$

Abb. 7: Kugellautsprecher zur Projektion von Klängen mit Richtwirkung in den umgebenden Raum. Aus praktischen Gründen bildet häufig ein hohler Polyeder das tragende Gehäuse, auf dessen Flächen einzeln gespeiste Lautsprecher sitzen.

(a) 20-Kanal Ikosaederlautsprecher (IKO)



(b) 4-Kanal Würfellautesprecher



Abb. 6: Kugelflächenfunktionen bis zur Ordnung 3.

bis zur Ordnung $N = 3$ als Eingang. Die Aufgabe der Signalverarbeitung bleibt somit, für jeden Eingang eine Richtwirkung entsprechend der Kugelflächenfunktionen (Abb. 6) zu erzeugen. Abbildung 8 zeigt die Bündelungswirkung des Ikosaederlautsprechers (IKO) beim Erzeugen einer technisch maximal möglichen Schallbündelung. Zum Zeichnen wurden offene Datensätze und Software verwendet: $12^\circ \times 11,25^\circ$ Richtwirkungsmessungen der Einzellautesprecher (<http://phaidra.kug.ac.at/o:67614>), ein 20×16 Filtersatz (<http://phaidra.kug.ac.at/o:67618>), und freie Softwarewerkzeuge (<http://opendata.iem.at>). Es wird deutlich, dass Schallbündelung ab 250 Hz bis 1.500 Hz auf $\pm 30^\circ$ fokussiert werden kann, und darüber hinaus mit räumlichen Fehlabbildungen gerechnet werden muss.

Auch bereits ohne die Bündelung natürlicher Instrumente zu simulieren, wird die künstliche Schallbündelung in der elektroakustischen Musik als kompositorisches Ausdrucksmittel genutzt. Wendt [13] hat für diese Anwendung zeitlich variierte Schallbünde-

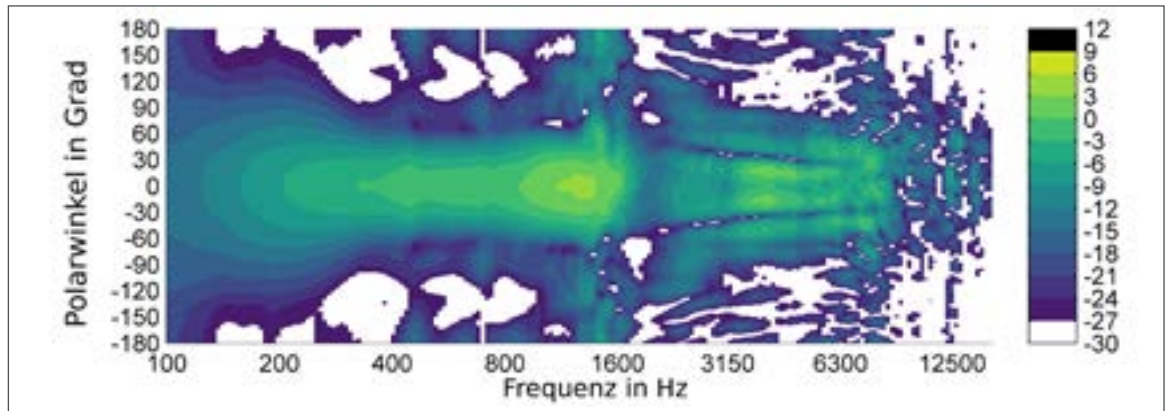


Abb. 8: Bündelungswirkung des Ikosaederlautsprechers (IKO) mit Farbstufen für den Schalldruck in dB für einen Horizontalschnitt, wenn die Bündelung auf 0 Azimut eingestellt ist. Die Bündelung fokussiert den Schallstrahl zwischen 150 Hz und 800 Hz auf den Winkelbereich von $\pm 30^\circ$ um die eingestellte Richtung. Bei hohen Frequenzen wird sie durch räumliche Aliase chaotischer, bleibt aber ausgerichtet.

lung untersucht. Die Ergebnisse in Abbildung 9 zeigen, wo man ein am Horizont abgegebenes Schallbündel hören würde, dessen Bündelungsrichtung entlang einer gleichförmig rotierenden Bahn kreist (Abb. 9(a)), oder ein solches, das auf den Hörplatz bündelnd beginnt, an Bündelung verliert, und wieder an Bündelung zunimmt (Abb. 9(b)).

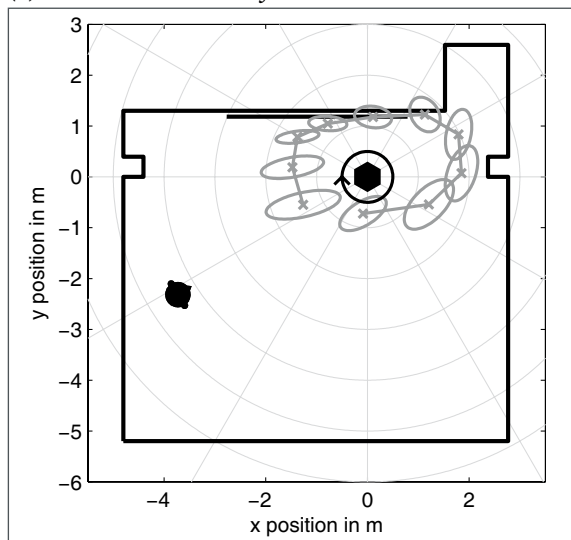
Mit der einstellbaren Schallbündelung wird nun auch beispielhaft ein gesamtes Richtungsabbild eines Instrumentes vorgestellt. Der Datensatz von TU Berlin und RWTH Aachen [4] bildet die Grundlage für das folgende Beispiel. Die Richtwirkungsdaten liegen für vereinfachte Richtwirkungskoeffizienten $\sigma_{nm}(f)$ in Terzbänder zusammengefasst im Frequenzbereich vor. Abbildung 10 zeigt für die laut gespielte, moderne Tenorposaune und ausgewählte Terzbänder um 1 kHz, 2 kHz und 4 kHz die Bündelung aus

diesem Datensatz (schwarz gestrichelt) und die mit dem IKO erreichbare Nachbildung im energetischen Terzbandmittel.

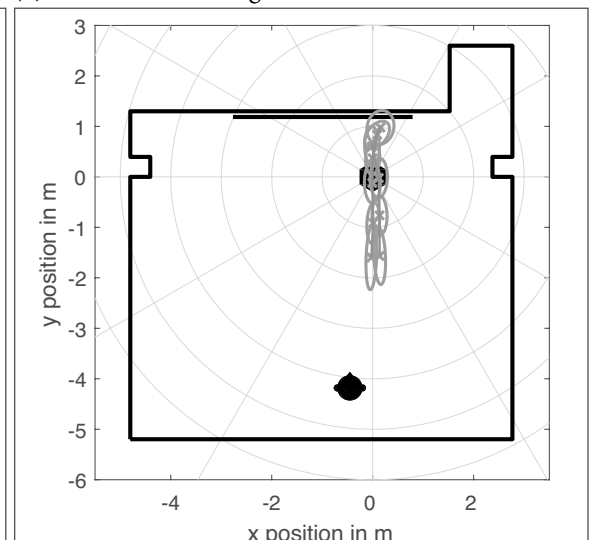
Dabei ergeben sich teilweise erhebliche Unterschiede aufgrund der begrenzten Bündelung des Kugellautsprechers (der Ikosaederlautsprecher bündelt bis maximal 3. Ordnung, die Messung bis 4. Ordnung), und über 1 kHz aufgrund räumlicher Fehlabbilder, hier stark ausgeprägt bei 2 kHz. Diese Abweichungen wirken groß, sie erweisen sich aber auch als etwas weniger kritisch im Vergleich zu Richtmustern, die ein beliebiger, nicht an die Abstrahlung der Trompete angepasster, fest orientierter Mehrweglautsprecher liefern würde. Entscheidend ist aber, dass sich nicht alle der technisch fehlerhaften Abbildungen perceptiv als störend im Wiedergaberaum in Erscheinung erweisen. Ein fehlerbehafteter, gut gemachter Versuch, Schall-

Abb. 9: Positionen, die bei einer Projektion eines entlang des Horizont rotierenden Schallstrahls im Raum gehört werden können; Hörposition und Lautsprecher sind eingezeichnet, die Ellipsen geben die 95%-Vertrauensbereiche der halbsekündlich abgefragten Antworten an.

(a) Schallstrahl in umlaufender Kreisbahn



(b) variiertes Bündelungsstärke



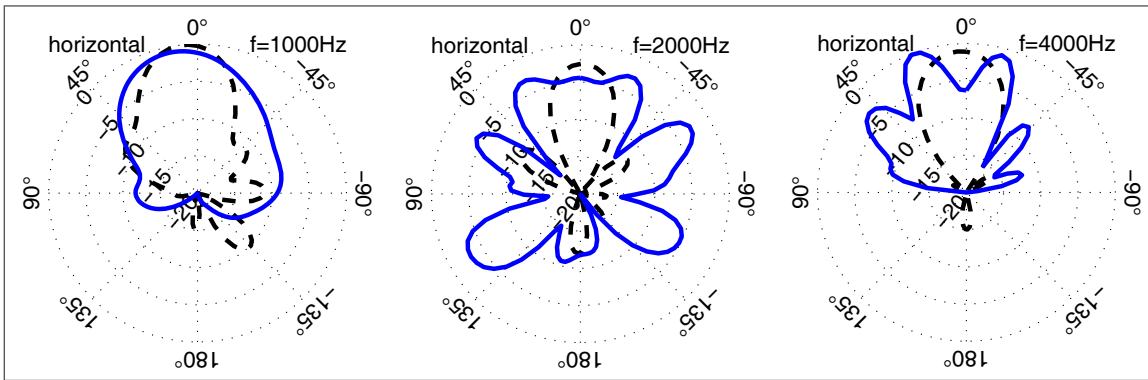


Abb. 10: Richtcharakteristik einer Tenorposaune (Polardiagramm, gestrichelt) und mit dem Icosaederlautsprecher (blau) erreichbare Nachbildung in der Horizontalebene.

wiedergabe mit korrekter Schallbündelung über Kugellautsprecher zu erreichen, kann durch Anpassung des Direkt-zu-Diffusverhältnisses und der Wiedergabe dynamischer Spielbewegungen zu einer erfreulichen Natürlichkeitssteigerung führen.

Wiedergabe in der virtuellen Welt

Auralisationen bilden den Gesamtklang einer akustischen Umgebung in der computergestützten, virtuellen Welt nach, unter Einbeziehung der richtungsabhängigen Abstrahlung der Schallquellen $s(\theta, t)$. Dazu wird jeder einzelne akustische Ausbreitungsweg des Schalls, Reflexionen an Boden, Decke, Wänden, mit den betreffenden Richtungssignalen beschickt und an einem frei wählbaren Hörort zum Beispiel zu einem binauralen Signal zusammengesetzt. Anhand von Koeffizientensignalen $\sigma_{nm}(t)$ und einer Raumimpulsantwort mit der Richtungsabhängigkeit auf Quell- und Empfangsseite in Kugelflächenfunktionen $h_{nm}^{n'm'}(t)$ kann ein Ambisonisches Surround-Wiedergabesignal $\chi_{n'm'}(t)$ berechnet werden, vgl. [14, 15],

$$\chi_{n'm'}(t) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n h_{nm}^{n'm'}(t) * \sigma_{nm}(t). \quad (2)$$

Die gesuchte Raumimpulsantwort $h_{nm}^{n'm'}(t)$ mit Quell- und Empfangsrichtmustern in Kugelflächenfunktionen kann entweder gemessen [16] oder in hoch entwickelten Raumakustiksimulationsumgebungen simuliert werden [17, 18].

Dabei geht die Anwendung der Technologie schon über die raumakustische Betrachtung hinaus. Für die Musikproduktion in Digital Audio Workstations existieren mittlerweile des Plugins wie RoomEncoder und FdnReverb (<https://plugins.iem.at/>), die eine Auralisierung unter Berücksichtigung der Richtcharakteristik von Quelle und Empfänger durchführen. Auch moderne Spieleumgebungen und Simulationen im Bereich Augmented wie Virtual Reality bauen heutzutage auf diese Auralisierungskonzepte auf.

Zusammenfassung

Die Abstrahlung von Musikinstrumenten ist ein physikalisch besonders komplexes Phänomen, das sich unmittelbar auf die Wahrnehmung musikalischer Klänge im Raum auswirkt. Die Beschreibung der frequenzabhängigen Richtcharakteristik ist bereits für die akustische Messtechnik eine Herausforderung, die aufgrund der räumlichen Komplexität, aufgrund von Störeinflüssen durch den messtechnischen Aufbau und nicht zuletzt durch den Einfluss der Spielerinnen und Spieler selbst einen erheblichen Aufwand erfordert. Ein weiterer Aspekt sind die natürlichen Bewegungen von Musikerinnen und Musikern mit ihrem Instrument, die zu dynamischen Änderungen der Richtcharakteristik führen. Mit diesen Änderungen geht eine hörbare Modulation des Klangeindrucks im Raum einher, wie in einem Hörversuch gezeigt werden konnte. Eine perzeptiv überzeugende Simulation von Musikinstrumenten erfordert daher eine Nachbildung sowohl ihrer statischen wie dynamischen Eigenschaften. Im physischen Raum kann dies durch mehrflächig abstrahlende Lautsprecher erreicht werden, die eine Annäherung an die komplexen Richtcharakteristiken realer Instrumente liefern. In raumakustischen Simulationen können Raumimpulsantworten erzeugt werden, welche die Richtcharakteristik von Quelle und Empfänger als Parameter enthalten. Beide Verfahren beruhen auf der Zerlegung der Richtwirkung in Kugelflächenfunktionen. Für eine natürliche Darstellung musikalischer Instrumente in akustischen Simulationen könnte sich eine solche Behandlung der statischen und dynamischen Abstrahlung in ausreichend hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung als ein entscheidender Schritt erweisen.

Literatur

- [1] Programm und Folien des gemeinsamen Workshops der Fachausschüsse Musikalische Akustik und Virtuelle Akustik, Berlin, 2017.
<https://www.dega-akustik.de/fachausschuesse/ma/dokumente/herbstworkshop-2017/>

- [2] Bader, R.: Reconstruction of radiating sound fields using minimum energy method. *J. Acoust. Soc. Am.* 127(1), S. 300–308, 2010.
- [3] Meyer, J.: *Acoustics and the Performance of Music – Manual for Acousticians, Audio Engineers, Musicians, Architects and Musical Instrument Makers*. 5th Edition. Springer, New York, 2009.
- [4] Weinzierl, S.; Vorländer, M.; Behler, G.; Brinkmann, F.; von Coler, H.; Detzner, E.; Krämer, J.; Lindau, A.; Pollow, M.; Schulz, F.; Shabtai, N.R.: *A Database of Anechoic Microphone Array Measurements of Musical Instruments*. 2017. <http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-5861.2>
- [5] Amengual Garí, S. V.; Kob, M.: Investigating the impact of a music stand on stage using spatial impulse responses. 142nd Convention of the Audio Engineering Society, Berlin, May 2017.
- [6] Kob, M.: Impact of Excitation and Acoustic Conditions on the Accuracy of Directivity Measurements. *Proc. ISMA, Le Mans, France*, S. 639–643, 2014.
- [7] 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(2), S. 157–170, 2011.
- [8] ISO 3382–1:2009 *Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces*, 2009.
- [9] Shabtai, N.R.; Behler, G.; Vorländer, M.; Weinzierl, S.: Generation and analysis of an acoustic radiation pattern database for forty-one musical instruments. *J. Acoust. Soc. Am.* 141(2), S. 1.246–1.256, 2017.
- [10] Schröder, D.; Vorländer, M.: RAVEN: A Real-Time Framework for the Auralization of Interactive Virtual Environments. *Proc. of Forum Acusticum, Aalborg, Denmark*, S. 1.541–1.546, 2011.
- [11] Berzborn, M.; Bomhardt, R.; Klein, J.; Richter, J.G.; Vorländer, M.: The ITA-Toolbox: An Open Source MATLAB Toolbox for Acoustic Measurements and Signal Processing. *Fortschritte der Akustik – DAGA 2017, Kiel*, S. 222–225, 2017.
- [12] Zotter, F.; Zaunschirm, M.; Frank, M.; Kronlachner, M.: The Icosahedral Loudspeaker: A Beamformer to Play with Wall Reflections. *Computer Music Journal* 41(3), S. 50–68, 2017. https://doi.org/10.1162/comj_a_00429
- [13] Wendt, F.; Sharma, G.K.; Frank, M.; Zotter, F.; Höldrich, R.: Perception of Spatial Sound Phenomena Created by the Icosahedral Loudspeaker. *Computer Music Journal* 41(1), S. 76–88, 2017. https://doi.org/10.1162/COMJ_a_00396
- [14] Weinzierl, S.; Vorländer, M.: Room Acoustical Parameters as Predictors of Room Acoustical Impression: What Do We Know and What Would We Like to Know? *Acoustics Australia* 43(1), S. 41–48, 2015. <https://doi.org/10.1007/s40857-015-0007-6>.
- [15] Zotter, F.; Staackmann, A.U.: Simulation of Room Transfer Functions with Directivity on the Basis of Modes. *Fortschritte der Akustik – DAGA 2017, Kiel*, S. 1.430–1.433, 2017.
- [16] Noisternig, M.; Klein, J.; Berzborn, M.; Recher, A.; Warusfel, O.: High-Resolution MIMO DRIR Measurements in an Opera Hall. *Fortschritte der Akustik – DAGA 2016, Aachen*, S. 1.115–1.117, 2016.
- [17] Pelzer, S.; Aspöck, L.; Schröder, D.; Vorländer, M.: Interactive Real-Time Simulation and Auralization for Modifiable Rooms. *Building Acoustics* 21(1), S. 65–73, 2014. <https://doi.org/10.1260/1351-010X.21.1.65>.
- [18] Poirier-Quinot, D.; Katz, B.F.G.; Noisternig, M.: EVERTims: Open source framework for real-time auralization in architectural acoustics and virtual reality. *DAFx-2017, Edinburgh*. ■

Prof. Dr.**Malte Kob***Hochschule für Musik, Detmold***David Ackermann***TU Berlin,**Fachgebiet Audio-kommunikation***Prof. Dr.****Stefan Weinzierl***TU Berlin,**Fachgebiet Audio-kommunikation***Dr. Franz Zotter***Kunstuniversität**Graz, Institut für**Elektronische Musik und Akustik*