

## Holofonie für Musikinstrumente

Franz Zotter

*Institut für Elektronische Musik und Akustik (IEM)*

*Universität für Musik und darstellende Kunst, 8010 Graz, Österreich, Email: zotter@iem.at*

### Einleitung

In diesem Beitrag stelle ich Ihnen gesammelt Hintergründe und weiterführende Arbeiten vor, die sich mit Techniken zur vollständigen Aufnahme, Darstellung und Wiedergabe real gespielter Musikinstrumente auseinandersetzen. Erlauben Sie mir, das unter dem Begriff *Holofonie für Musikinstrumente* zusammenzufassen.

Musikinstrumente geben ihre Klangbestandteile mit rundum uneinheitlicher Stärke in den Raum ab. Darauf gehen bekannte räumliche Aufnahme- und wiedergabetechniken nicht explizit ein. Daher bleibt Spielraum für die Erforschung neuer, vielkanaliger Techniken, die dort weitermachen, wo die bisherige Technologie aufhört. Eigentlich benötigen wir für eine vollständige Wiedergabe von Musikinstrumenten einen räumlichen „Schallprojektor“, dessen Wiedergabelautstärke für alle Richtungen getrennt eingestellt wird, für jeden Klangbestandteil. Signale dafür müssten so aufgenommen werden, dass ein Musikinstrument mitsamt der richtungsabhängigen Klangvariation rundum vollständig erfasst wird.

Die Holofonie für Musikinstrumente als neue Übertragungstechnik ist nicht so sehr für das eigene, kleine Wohnzimmer von Interesse. Viel mehr ermöglicht sie, an akustisch interessanten Orten SolistInnen durch Übertragung auftreten zu lassen. Der Computermusik und Livemusik ermöglicht sie außerdem, räumliche Projektionseffekte künstlerisch zu nutzen. Damit beschert diese Holofonie der Musik neue Instrumente, sie lässt die musikalische Akustik neue Erkenntnisse schöpfen, sie wird der Auralisation ermöglichen, modellierte Räume natürlicher zu bespielen, und raumakustische Messverfahren hervorbringen.

### Hintergründe und Motivation

**Die musikalische Akustik** des letzten Jahrhunderts hat viele Erkenntnisse über Musikinstrumente zu Tage gefördert, indem sie versucht hat, die Funktionsweise von Musikinstrumenten im Detail zu verstehen, ihre Teiltonstrukturen, Modenstrukturen, Materialien, und Ähnliches. Wesentliche Beispiele finden sich im Buch von Fletcher und Rossing [1] und Lothar Cremer [2]. Diese Beiträge liefern Erkenntnisse zur Physik von Instrumenten und lassen uns ihre Teiltonstrukturen und Funktionsweisen verstehen. Nennenswert sind zudem die Hefte von Fleischer [3], die neben vibroakustischer und spektraler Untersuchung die psychoakustische Beurteilung von Klängen propagieren.

Dieser Beitrag nimmt von den physikalischen Betrachtung des Instruments Abstand, und geht einer verstärkt

äußerlichen Betrachtung gespielter Musikinstrumente nach. Der wichtigste Anknüpfungspunkt dazu ist im sehr frühen und zeitlosen Buch **Akustik und musikalische Aufführungspraxis** von Jürgen Meyer [4] in großem Detailreichtum, in je 3 Schnitten (2 vertikal, 1 horizontal), dargestellt: *die richtungsabhängige Schallabstrahlung von Musikinstrumenten*.

Darüber hinaus motiviert, **dass Schallabstrahlung auch für die Musik** ein Thema ist: Gabriel Weinreich, mehr zu ihm später, zitiert als Motivation seiner Arbeit den zeitgenössischen Komponisten und Dirigenten Pierre Boulez: *«Le haut-parleur anonymise la source réelle»*, der Lautsprecher entfremde also die echte Schallquelle. Nach Boulez' Erfahrung bei Kompositionen und Aufführungen klingen Lautsprecher nicht gleich natürlich im Raum wie real gespielte Instrumente. Hauptgrund bei hochwertigen Systemen ist, dass Lautsprecher statische Schallabstrahlungseigenschaften besitzen, die sich von jenen des gespielten Musikinstruments unterscheiden.

Um den komplexen Schallabstrahlungsmustern der Geige nahezukommen, baute der Physiker Gabriel Weinreich ein Lautsprechergehäuse mit Röhren, das durch verschiedenen lange Umwege Interferenzen erzeugt [5]. Er beschrieb auch die Grundlage zur **holografisch vollständigen Rundumvermessung** von Schallabstrahlung [6].

Etwas später beschrieb Olivier Warusfel [7] mit seinen Kollegen die Lautsprecheranordnung *«la timée»*, eine würfelige oder dodekaedrische Lautsprecheranordnung zur **einstellbaren Rundumerzeugung** von Schallabstrahlung, den ersten „Schallprojektor“. Weil bis dahin unklar war, wie solche Anordnungen gesteuert werden, beschreibt der Artikel ein kurzes Modell, noch ohne den realistischen, fehlerfreien Frequenzbereich zu nennen.

Cook und Trueman [8] haben die andere Seite, jene der Erfassung von Schallabstrahlung, weiterentwickelt. Dazu wurde festgehalten, dass eine technische Anregung niemals so gut wie jene einer fähigen Person am Instrument sein wird. Das Instrument (Geige) wurde in eine **umgebende, ikosaedrische Mikrofonanordnung** gestellt, und von außerhalb händisch gespielt. Die Schallabstrahlung kann dabei gleichzeitig in zwölf Richtungen als Ton-signal, als *akustisches Hologramm*, aufgezeichnet werden.

Parallel dazu wurde dieses Thema auch für die Auralisation von Otondo und Rindel [9] aufgegriffen, dieses Mal zwar nur in einem horizontalen und zwei vertikalen Schnitten, dafür aber so, dass **Musikerin oder Musiker mitsamt Instrument** in die Aufnahmeanordnung passen, also eine natürliche Spielhaltung einnehmen können.

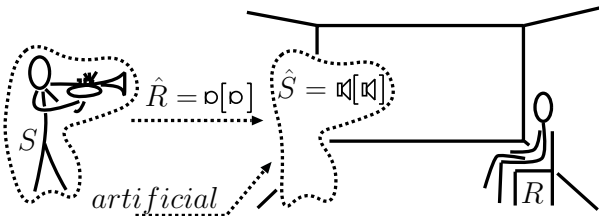


Abbildung 1: Freischneiden des Musikinstruments mitsamt MusikerIn aus dem Konzertsaal.

### Freischneiden: das „Seifenblasenmodell“

Welche Wechselwirkungen der Schall eines Musikinstruments mit dem umgebenden Raum eingeht, wird am besten durch „Freischneiden“ sichtbar, wie in der Mechanik gebräuchlich, siehe Abb. 1. Der durch die Schnittfläche austretende Schall ist, was im schalltoten Raum mit Mikrofonen aufgefangen und mit Lautsprechern im Zielraum nachgebildet werden soll.

Das Modell legt auch offen, was vernachlässigt wird: Instrument und MusikerIn beeinflussen als Beugungskörper und Abschattungsobjekt die Raumakustik. Umgekehrt, verhalten sich MusikerInnen in verschiedenen Räumen unterschiedlich. Raumbedingte Strahlungsimpedanzen haben größtenteils vernachlässigbare Auswirkungen auf die Ausklingzeiten des Instrumentes.

Trotz hochwertiger Literatur über die nach innen laufende Schallprojektion, z.B. [10], ist die Wellenfeldsynthese zur eindeutigen und gleichmäßigen Schallprojektion nach außen laufender Wellen nicht gut geeignet.

Das Freischneidemodell und zuvorgenannte Arbeiten motivieren, über die Wünsche an eine gelungene Holofonie von Musikinstrumenten nachzudenken:

- Wir möchten alle Abstrahlungsrichtungen mit rundum gleichförmiger Auflösung beachten, nicht bloß wenige Schnitte davon.
- Das Instrument sollte bei der Erfassung innerhalb der Aufnahmeanordnung von einer/einem MusikerIn gespielt werden, um natürliche Spieltechniken und Spielbewegungen abzubilden.

Eine geeignete Vorstellung der Schnittfläche habe ich



Abbildung 2: Seifenblasenmodell: eine Seifenblase (masselos, reibungsfrei, steifigkeitsfrei) um Instrument und MusikerIn stellt bereits ein holografische Abbild der Schallabstrahlung ins Freifeld dar. Die Blase schwingt an allen Punkten der richtungsabhängig abgestrahlten Schallschnelle entsprechend.

in meiner Dissertation [11] als „Seifenblasenmodell“ bezeichnet, siehe Abb. 2. Es legt eine kugelförmige Schnittfläche nahe.

### Akustisches Hologramm mit umgebender Mikrofonkugel

Die vollständige Vermessung einer „Seifenblasenschwingung“ ist noch nicht praktisch umsetzbar. Mikrofonanordnungen mit abzählbaren Mikrofonen lassen sich allerdings konstruieren, siehe Abb. 3. Ähnliche Anordnungen

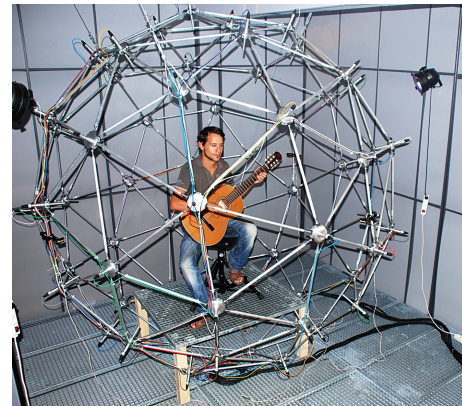


Abbildung 3: Autor als Gitarrist in der 64-kanaligen Mikrofonkugel des IEM, die von Fabian Hohl [12] für die Aufnahme umfassender akustischer Hologramme konstruiert wurde.

existieren auch in Aachen [13] und Espoo [14]. Damit wir der Vorstellung eines kontinuierlichen, vollständigen Abbildes der Schallabstrahlung näher kommen, müssen wir interpolieren.

### Interpolation gemessener Schallabstrahlung mit Kugelflächenfunktionen

Damit wir interpolieren können, spekulieren wir damit, dass die Schallabstrahlung nicht stark zwischen den Mikrofonpunkten variiert, also begrenzte Richtungsauflösung besitzt. Mathematisch wird das durch eine Zerlegung diskret aufgenommener Signale in Kugelflächenfunktionen angesetzt, vgl. [15].

Dazu werden im einfachsten Fall reellwertige Kugelflächenfunktionen verwendet, siehe Abb. 4,

$$Y_n^m(\boldsymbol{\theta}) = N_n^m P_n^m(\cos \vartheta) \begin{cases} \cos(m\varphi), & \text{für } m \geq 0 \\ \sin(m\varphi), & \text{sonst.} \end{cases}$$

Sie setzen sich aus trigonometrischen Funktionen, den Legendre-Funktionen  $P_n^m$  und einem Energienormierungsausdruck  $N_n^m$  zusammen und besitzen eine mit  $n$  steigende Auflösung. Wir dürfen die Abhängigkeit zu den sphärischen Winkeln komfortabel mit einem Richtungsvektor  $\boldsymbol{\theta} = [\cos \varphi \sin \vartheta, \sin \varphi \sin \vartheta, \cos \vartheta]^T$  beschreiben.

Um die Schalldrucksignale  $p_i|_r(t) = p|_r(t, \boldsymbol{\theta}_i)$  an den ortsfesten Punkten  $r \boldsymbol{\theta}_i$  der Messkugel zu interpolieren, werden nun die Koeffizienten der endlichen Summe gesucht:

$$p|_r(t, \boldsymbol{\theta}) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n Y_n^m(\boldsymbol{\theta}) \psi_{nm}|_r(t). \quad (1)$$

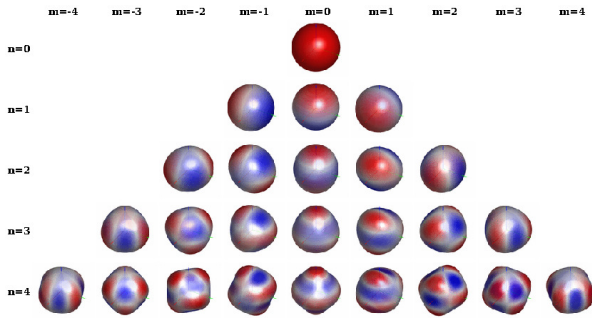
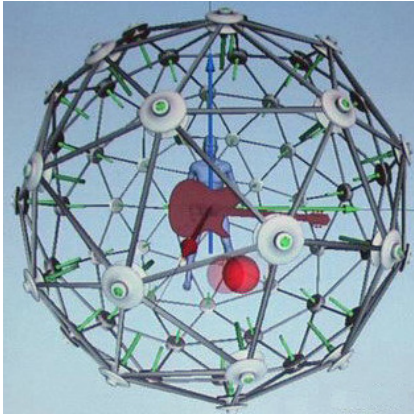
Abbildung 4: Kugelflächenfunktionen bis  $n = 4$ .

Abbildung 5: Grafische Benutzeroberfläche zum Abhören an einem frei einstellbaren Punkt (rot) zwischen diskret aufgenommenen Mikrofonsignalen [16]

Dazu wird die Vektor-/Matrixschreibweise über dem Index  $q = n^2 + n + m + 1$  und Messpunktindex  $i$  eingeführt

$$\begin{aligned} \mathbf{p}|_r(t) &= \mathbf{Y}_N \boldsymbol{\psi}_N|_r(t), \\ \text{mit } \boldsymbol{\psi}_N &= [\psi_{nm}]_q, & \mathbf{p}|_r(t) &= [p|_r(\boldsymbol{\theta}_i, t)]_i, \\ \mathbf{y}_N(\boldsymbol{\theta}) &= [Y_n^m(\boldsymbol{\theta})]_q, & \mathbf{Y}_N &= [\mathbf{y}_N^T(\boldsymbol{\theta}_i)]_i, \end{aligned} \quad (2)$$

und die Kugelflächenfunktionen in die Messwerte eingepasst. Das geschieht durch Matrix(pseudo)inversion:

$$\boldsymbol{\psi}_N|_r(t) = \mathbf{Y}_N^{-1} \mathbf{p}|_r(t). \quad (3)$$

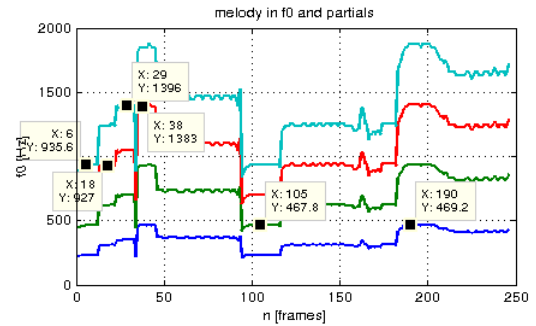
Mit der vektorisierten Gl. (1) ist der Instrumentalklang am variablen Punkt des Radius  $r$  das Signal

$$p|_r(t, \boldsymbol{\theta}) = \mathbf{y}_N^T(\boldsymbol{\theta}) \boldsymbol{\psi}_N|_r(t), \quad (4)$$

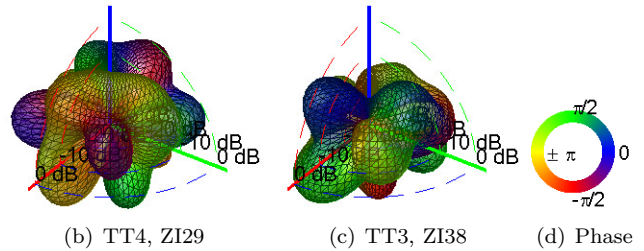
kann also an frei wählbarer Richtung abgehört werden, was in [16] mit einer grafischen Benutzeroberfläche (Abb. 5) demonstriert wurde. Radiale Extrapolation ist prinzipiell möglich und z.B. in [11] gezeigt, andernorts oft als HELS abgekürzt.

### Signalzusammenfassung: das Ursignal

Um eine systematische Signalzerlegung zu erleichtern, ist eine Zusammenfassung aller aufgenommenen Signale eine erstrebenswerte Vereinfachung. Eine lineare Überlagerung aufgenommenener Signale ist aber ungeeignet, weil sie durch unbekannte Phasenbeziehungen der Mikrofonsignale zueinander unerwünschte Interferenzen hervorruft.



(a) Verlauf 4 Teiltöne Saxofonmelodie.

Abbildung 6: (a) Ursignal-Teiltonverläufe einer Saxofonmelodie<sup>1</sup> (aus [18]) und zugehörige Abstrahlungsmuster (Phase in Farbe). Abstrahlung ist bei Holzbläsern nicht nur Frequenz- sondern auch überblas-/griffabhängig, siehe frequenzgleiche Teiltöne 4 und 3 in (b) und (c), beim Intervall einer Quint, vgl. Zeitindizes 29 u. 38 in (a).

Vom Instrument zu den Mikrofonen können unterschiedliche Pfadlängen auftreten, die geschätzt bis zu maximal 3ms unterschiedliche Ankunftszeiten der Signale bewirken. Eine interferenzbefreite Überlagerung der Kurzzeit-Fourierzerlegungen ist daher durchaus sinnvoll, weil die Zeitverschiebungen noch keine Zerstörung wahrnehmbarer zeitlicher Strukturen bedeuten. Ich definiere diese Überlagerung als „Ursignal“, das mit dem Zeitfenster  $w(\tau)$  und der Transformation

$$p_i(t, \omega) = \int p_i(\tau - t) w(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau, \quad (5)$$

$$p_{UR}(t, \omega) = \sqrt[\alpha]{\sum_i |p_i(t, \omega)|^\alpha} \quad (6)$$

die  $L_\alpha$ -Norm aller Kurzzeit-Fouriertransformationen bildet. Für  $\alpha \rightarrow \infty$  beinhaltet das Ursignal an allen Zeit-Frequenz-Koordinaten  $(t, \omega)$  das Signal des lautesten Mikrofons. Sofern gewünscht [17], lässt sich daraus durch Spektrogramminversion ein reines Zeitsignal gewinnen.

### Teiltonabstrahlung

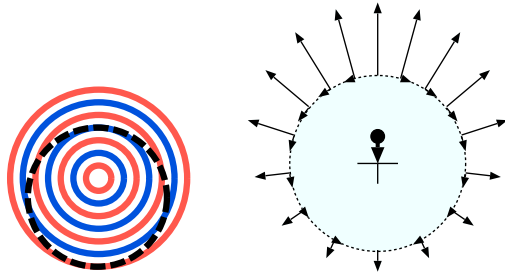
Aus dem Ursignal in der Zeit-Frequenz-Ebene lassen sich tonale Komponenten, die *Teiltonverläufe* siehe Abb. 6(a), finden. Für jeden Punkt eines Teiltonverlaufes beinhalten die Mikrofondaten über die Richtungen verteilte Phasen- und Amplitudenwerte. Dieses phasenbehaftete *Abstrahlungsmuster* lässt sich für jeden Teilton als Video darstellen [18]. Abb. 6(b) und 6(b) zeigen zwei Ballondiagramme von Abstrahlungsmustern frequenzgleicher Teiltöne aus zwei Stellen einer Saxofonmelodie. Der Unterschied

<sup>1</sup>Dank gilt dem ITA in Aachen für das Audiodatenmaterial.

verdeutlicht, dass die Abstrahlung mancher Instrumente auch von der Grifftechnik abhängt, vgl. [19].

### Zentrierungs- und Ausrichtungsverfolgung

Unzureichende, oft auch praktisch unmögliche akustische Zentrierung bei der holografischen Aufnahme verkomplizieren das Abstrahlungsmuster. Anhand eines ungerichteten Strahlers ist das leicht vorstellbar: Geringe Dezentrierung bewirkt zwar kaum Amplitudenschwankungen auf der umgebenden Messkugel aber erhebliche Phasenschwankungen, vgl. Abb. 7.



**Abbildung 7:** Bei dezentrierten Quellen ergibt sich ein Phasenverlauf auf der Messoberfläche und eine tangentielle Intensität, deren Summe gegen die Verschiebungsrichtung zeigt.

Nachdem dieses *akustische Zentrierungsproblem* im Rahmen meiner Doktorarbeit [11] auftauchte, versuchen die Arbeiten [20, 21, 22] Dezentrierung aufgenommener Klangbestandteile zu erkennen. Eine spätere Kompensation ist dazu geeignet, das holografische Abbild von Musikinstrumenten stark zu vereinfachen und den Aufwand bei der Wiedergabe realistisch zu halten.

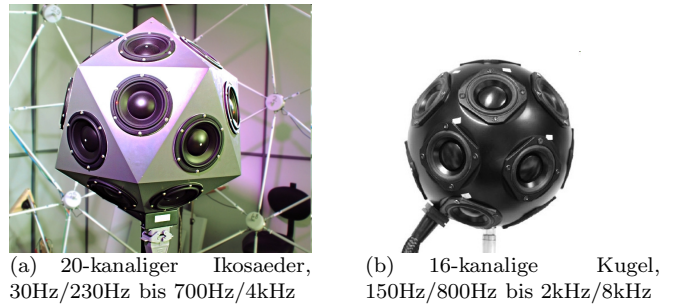
Akustische Verschiebungen entsprechen frequenzabhängigen Neuzerlegungen des Hologramms, die zur Berechnung in Echtzeit noch zu aufwändig sind. Daher werden einfachere Lösungen gesucht; z.B. die Dezentrierungsschätzung über die tangentielle Schallintensität [23], die Implementierung von Verschiebungen im Zeitbereich [24] oder Wege zur Zerlegung in Betrag und abgewinkelte Phase [25].

Die Ausrichtungsänderung ist dagegen vergleichsweise einfach zu erkennen, vgl. [20], und bringt wertvolle Information über die Bewegungen des Instrumentes. Ihre Kompensation bringt aber kaum eine Vereinfachung des holografischen Abbilds, viel mehr eine Reduktion der Zeitvarianz.

### Kompakte Kugellautsprecheranordnung: die Schallprojektion

Auf der anderen Seite einer holofonen Wiedergabekette für Musikinstrumente steht eine kompakte Kugellautsprecheranordnung. Sie hat die Aufgabe, das akustisch-holografische Abbild des Musikinstrumentes detailgetreu wieder in den Raum zu werfen. Unter Annahme von Rückwirkungsfreiheit genügt es, die Lautsprecheranordnung so anzusteuern, dass sie möglichst das selbe holografische Abbild wie das Instrument bewirkt, vgl. Abb. 2.

Dazu sind Lautsprecheranordnungen prinzipiell in der



(a) 20-kanaliger Ikosaeder, 30Hz/230Hz bis 700Hz/4kHz (b) 16-kanalige Kugel, 150Hz/800Hz bis 2kHz/8kHz

**Abbildung 8:** Kompakte Kugellautsprecheranordnungen des IEM für den Tief- und Mitteltonbereich.

Lage, siehe Abb. 8, die in einer festen Kugel oder einem platonischen Körper eingebaut sind, [26, 27].

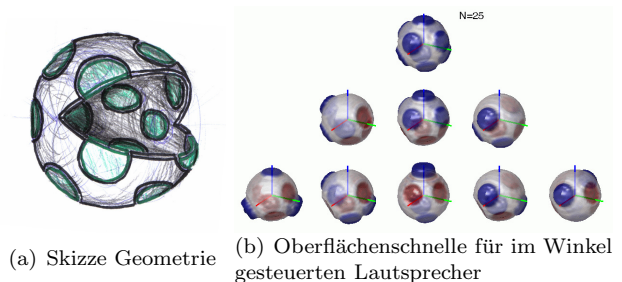
Typischerweise geschieht eine Ansteuerung von Lautsprecherzeilen zur Erzeugung von Schallstrahlen durch Vorgabe unterschiedlich verzögerter Signale. Diese einfache Ansteuerungsweise ist aber bei Kugellautsprechern nicht zielführend, wir benötigen ein akustisches Modell der Schallabstrahlung. Jedoch auch ohne Modell lässt sich trotz verschiedener Wirkungsweise zum Minimum-Varianz-Strahlformer von Lautsprecherzeilen, vgl. [32], ein ähnliches Verhalten voraussagen: die Auflösung ist bei tiefen Frequenzen durch Baugenauigkeit und Dynamikumfang begrenzt und bei hohen Frequenzen durch räumliche Mehrdeutigkeiten.

**Das Kugelkappenmodell** beschreibt die Abstrahlung kompakter Kugellautsprecheranordnung über eine Oberflächennormalschnelle  $v|_{r_0}(\theta)$  am Kugelradius  $r_0$ . Diese Schnelle ist die Summe einzelner Lautsprechermembranen an den Stellen  $\theta_l$ , die jeweils ein Kugelsegment der Größe  $\alpha$  abgedeckt. Einzelne Membranschnellen sind durch  $v^{(l)}$  gesteuert, vgl. [28] und Abb. 9(a),

$$v|_{r_0}(\theta) = \sum_{l=1}^L v^{(l)} u(\cos(\alpha/2) - \theta^T \theta_l). \quad (7)$$

$u(\cdot)$  ist eine solcherart ausgewertete Sprungfunktion, dass sich für Positionen  $\theta$  innerhalb des  $l$ -ten Lautsprechersegmentes 1, sonst 0 ergibt. Die Schallabstrahlung wird über eine kugelförmige Randbedingung der Schallschnelle berechnet. Dazu werden die Lösungen der Helmholtzgleichung (=im Frequenzbereich) in Kugelkoordinaten verwendet, mit dem Ergebnis

$$\psi_{nm}|_{r_0} = \frac{i}{\rho c} \frac{h_n(kr)}{h'_n(kr_0)} \sum_{l=1}^L v^{(l)} a_{nm}^{(l)}. \quad (8)$$



(a) Skizze Geometrie (b) Oberflächenschnelle für im Winkel gesteuerten Lautsprecher

**Abbildung 9:** Kugelkappenmodell

Darin sind  $h_n(\cdot)$  und  $h'_n(\cdot)$  die sphärischen Hankelfunktionen und ihre Ableitung,  $kr$  Wellenzahl mal Radius,  $c$  die Schallgeschwindigkeit,  $i = \sqrt{-1}$  die imaginäre Konstante, und das Ergebnis  $\psi_{nm}(kr)$  ist der in Kugelflächenfunktionen zerlegte Schalldruck am Radius  $r$ . Die Sprungfunktionen aus Gl. (7) sind laut [29] leicht in Kugelflächenfunktionen zerlegt, in Gl. (7) ausgedrückt durch  $a_{nm}^{(l)}$ . Das Randwertproblem mit ausreichend hoher Ordnung  $n \leq Q \rightarrow \infty$  ist in Matrixschreibweise

$$\psi_Q|_r = \frac{i}{\rho c} \text{diag}\{\mathbf{h}_Q(kr)\} \text{diag}\{\mathbf{h}'_Q(kr_0)\}^{-1} \mathbf{A}_Q \mathbf{v} \quad (9)$$

und ergibt nach Inversion die Lautsprecherschnellen  $\mathbf{v} = \frac{\rho c}{i} \mathbf{A}_N^{-1} \text{diag}\{\mathbf{h}'_N(kr_0)\} \text{diag}\{\mathbf{h}_N(kr)\}^{-1} \psi_N|_r$  für ein vorgegebenes Abstrahlmuster  $\psi_N|_r$  niedrigerer Ordnung  $N < Q$ . Offenbar ist die *anguläre Ansteuerung* frequenzunabhängig  $\mathbf{A}_N^{-1}$  und ergibt z.B. Oberflächenschnellen laut Abb. 9(b), vgl. [30, 31]. *Radiale Scharfstellfilter*  $\frac{\rho c}{i} \text{diag}\{\mathbf{h}'_N(kr_0)\} \text{diag}\{\mathbf{h}_N(kr)\}^{-1}$  gleichen die ordnungs- und wellenzahlabhängige Schallausbreitung zwischen  $r_0$  und  $r$  aus.

Weil die anguläre Ansteuerung nur Komponenten der Ordnungen  $n \leq N$  steuert, wird das Resultat insbesondere bei hohen Frequenzen fehlerbehaftet. Bei tiefen Frequenzen strahlt nur mehr das Muster nullter Ordnung effizient ab, alle anderen müssen durch Filterung forciert werden, vgl. [33], um am Projektionsradius  $r$  gleich laut anzukommen. Abb. 10(a) zeigt den verbleibenden Arbeitsbereich. Die horizontale Achse lässt sich als Frequenzachse verstehen, und die vertikale Achse beschreibt das Verhältnis zwischen Projektionsradius und Kugelradius  $r/r_0$ . Die durchgezogene Linie ist die Fehlergrenze hin zu hohen Frequenzen. Die gestrichelten Linien grenzen jene tieffrequente Bereiche ab, unterhalb welcher Lautsprecher unrealistisch stark gefiltert betrieben werden; beispielsweise wird hundertfache Filterverstärkung als Grenze angenommen. Zwischen den Linien ergibt sich für unterschiedliche Ordnungen ein nutzbarer Frequenz- und Abstandsbereich. Für  $N = 3$  bleiben etwa 2 Oktaven.

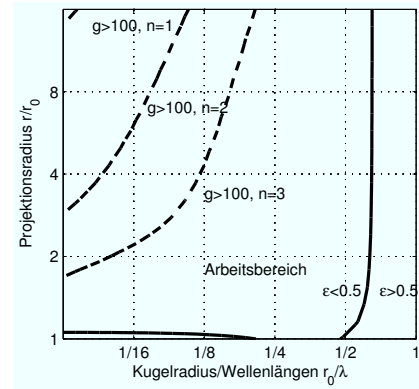
### Übersprechen, vollständiges Modell

Das Kappenmodell ist gewissermaßen eine oberflächliche Beschreibung von kompakten Kugellautsprecheranordnungen. Die Spannungen an Lautsprechern steuern die Membranschnelle nur indirekt über ein elektroakustisches Modell. Wirken die Lautsprecher auf ein gemeinsames inneres Luftvolumen, so tritt zudem noch Übersprechen auf. Ein analytisches Modell dafür und effiziente Methoden zur Kompensation des gemessenen Übersprechens wurden in [29, 34, 35] vorgestellt. Weitere Modelle finden sich in [36, 37, 38].

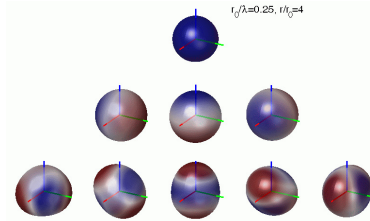
Ob individuell gekapselte oder ein gemeinsames Luftvolumen die günstigere Bauweise darstellen, wurde in den Arbeiten [39, 11] diskutiert; es gibt für beide Bauweisen Vor- und Nachteile.

### Messungsbasierte, realistische Ansteuerung

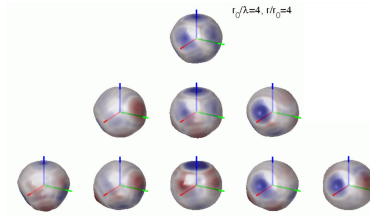
Weil Modelle nur in der Lage sind, die anguläre Ansteuerung für echte Lautsprecher zu modellieren, soll-



(a) Arbeitsbereich Abstrahlungssynthese



(b) Ergebnis im Arbeitsbereich



(c) Ergebnis bei hoher Frequenz

**Abbildung 10:** Arbeitsbereiche eines kompakten 16-Kanal-Kugellautsprechers, hier mit  $N = 3$ .

te die tatsächliche Ansteuerung auf Messungen beruhen, vgl. [30, 35]. In Abb. 11 sind geeignete Experimentalaufbauten mit Mikrofonen und Laservibrometer dargestellt.

Insbesondere im Mittel- und Hochtonbereich wirken sich geometrische Ungenauigkeiten bei der Vermessung stark verkomplizierend auf die Ansteuerung aus, vgl. [40], weshalb ein Algorithmus zur Kompensation von Positionsfehlern vorgeschlagen wird. Um *radiale Scharfstellfilter* in ihrem Dynamikbereich einzugrenzen, schlägt die Arbeit [41] den Entwurf phasentreuer Begrenzungsfilter vor.

### Zusammenfassung

In diesem Bericht habe ich Hintergründe und Techniken zur holografischen Aufnahme und Wiedergabe von Musikinstrumenten zusammengefasst, die sich in den letzten fünf Jahren für Aufnahmen umgebender Mikrofonanordnungen und bei der Schallprojektion mit kompakten kugelförmigen Lautsprecheranordnungen entwickelt haben.

Die Nutzbarkeit solcher Aufnahme- und Wiedergabegeräte konnte in den letzten Jahren technisch vorangetrieben werden, und es sind viele nützliche Lösungsansätze entstanden. Unter Einbeziehung entwickelter Mikrofon- und Lautsprecheranordnungen wurden bereits erfolgreich Konzerte bestritten, vgl. [42] und [43].



(a) genau zentrierte Messung der Lautsprecheranordnung auf einem Drehteller mit Mikrofonen erlaubt Überprüfung der Abstrahlung mit Ballondiagrammen.



(b) Laservibrometermessung ermöglicht Messung des Übersprechens bei geringem Einfluss akustischer Reflexionen.

**Abbildung 11:** Messung von kompakten kugelförmigen Lautsprecheranordnungen mit unterschiedlichen Methoden.

Eine klanglich vollständig ausgereifte Aufnahme ist aber nicht nur aufgrund des Einsatzes kostengünstiger Mikrofone unvergleichbar mit Studioteknik höchster Qualität: Gute, klangtreue Algorithmen und die Vermeidung von Effekten schlechter Zentrierung sind momentan noch aufwändig und erfordern neue, trickreiche Lösungen. Zudem ist noch wünschenswert, zukünftig bei der Wiedergabe Möglichkeiten zu finden, um kugelförmige Lautsprecheranordnungen breitbandig zu nutzen, ohne mit der Richtungsauflösung geizen zu müssen.

In der Raumakustik sind kompakte Kugellautsprecher mit einstellbarer Richtwirkung vielversprechende, neue Werkzeuge, wenn es darum geht, geometrische Pfade zwischen Quelle und Empfänger zu erkennen, [44].

Als großes Ziel sollte aber nicht nur die Klangtreue und Wiedergabegenauigkeit verfolgt werden, sondern am Ende, was für die Wahrnehmung von Bedeutung ist: In welchen Situationen steigert eine Nachbildung der Schallabstrahlung die Natürlichkeit? Wie wichtig sind dabei die Spielbewegungen und die Richtungsauflösung der kugelförmigen Holografie-Holophonie-Übertragungskette?

## Danksagung

Ich danke der Deutschen Gesellschaft für Akustik für die Auszeichnung mit dem Lothar-Cremer-Preis 2012 und all jenen Personen, die einen großen Teil der Leistung mitgetragen haben. Ich danke meinem Doktorvater Robert Höldrich und den nachfolgenden Institutsleitern des IEM, Gerhard Eckel und Alois Sontacchi dafür, über die Jahren Unglaubliches ermöglicht zu haben; Alois Sontacchi hat mich für den Preis vorgeschlagen.

Die anderen Personen, denen ich großen Dank ausspreche, bilden bereits einen Großteil der Autorenliste. Darunter sind nicht nur zahlreiche Studierende, die ich im Rahmen von Seminaren, Projektarbeiten und Diplomarbeiten betreut habe, die vielen unterstützenden KollegInnen am IEM, sondern ein guter Teil der fachnahen internationalen Kollegenschaft, etwa vom ircam, CNMAT, ITA in Aachen, u.a.

Meine Arbeit am Thema wurde durch die Mitarbeit am Projekt *Virtual Gamelan Graz* [45] zwischen 2005 und 2007 angestoßen, in dem auch Klang und Abstrahlung Javanischer Gamelan-Instrumente nachzubilden war.

## Literatur

- [1] Neville Fletcher, Thomas Rossing: *The Physics of Musical Instruments*. Springer, 1998.
- [2] Lothar Cremer: *Die Physik der Geige*. Hirzel, Stuttgart, 1981.
- [3] Helmut Fleischer: *Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik*. Hrsg.: Fleischer, H.; Fastl, H.; Univ. Bundeswehr München u. TUM, ISSN 1430-936X, 23 Hefte, 1996–2010.
- [4] Jürgen Meyer: *Akustik und musikalische Aufführungspraxis*. Das Musikinstrument, Frankfurt/Main, 1966.
- [5] Gabriel Weinreich: Directional tone color loudspeaker. US patent US 6,263,083 B1, filed 1997, 2001.
- [6] Gabriel Weinreich, Eric B. Arnold: „Method for measuring acoustic radiation fields“. J. Acous. Soc. Am., 1980.
- [7] Olivier Warusfel, Philippe Derogis, René Caussé: „Radiation Synthesis with Digitally Controlled Loudspeakers“. 103rd AES Conv., New York, 1997.
- [8] Perry Cook, Dan Trueman: „A Database of Measured Musical Instrument Body Radiation Impulse Responses, and Computer Applications for Exploring and Utilizing the Measured Filter Functions“. Proc. ISMA, 1998.
- [9] Felipe Otondo, Jens Holger Rindel: „The Influence of the Directivity of Musical Instruments in a Room“. Acta Acustica un. Acustica, 2004.
- [10] Sascha Spors, Rudolf Rabenstein, Jens Ahrens: „The Theory of the Wave Field Synthesis Revisited“. 124th AES Conv., Amsterdam, 2008.
- [11] Franz Zotter: *Analysis and Synthesis of Sound Radiation with Spherical Arrays*. IEM, Univ. Musik u. darstellende Kunst Graz, 2009.
- [12] Fabian Hohl: *Kugelmikrofonarray zur Abstrahlungsvermessung von Musikinstrumenten*. Diplomarbeit, IEM, Univ. Musik u. darstellende Kunst Graz, 2009.
- [13] Martin Pollow, Gottfried K. Behler, Bruno Masiero: „Measuring Directivities of Natural Sound Sources with a Spherical Microphone Array“. 1st Ambisonics Symp., Graz, 2009.
- [14] Jukka Pätynen, Ville Pulkki, Tapio Lokki: „An-echoic recording system for symphony orchestra“. Acta Acustica un. Acustica, 2008
- [15] Franz Zotter: „Sampling Strategies for Acoustic Holography/Holophony on the Sphere“. NAG-DAGA, Rotterdam, 2009.

- [16] Christian Nachbar, Gerold Nistelberger, Franz Zotter: „Listening to the Direct Sound of Musical Instruments in Freely Adjustable Surrounding Directions“. 2nd Ambisonics Symp., Paris, 2010.
- [17] Sebastian Suess: „Auffinden von Ursignalen aus Aufnahmen umgebender kugelförmiger Mikrofonanordnungen“. Seminararbeit, IEM, Univ. Musik u. darstellende Kunst Graz, 2011.
- [18] Franz Zotter: „Directional recording and analysis of sounds from musical instruments“. Vortrag, Acoustics08, Paris, 2008.
- [19] Fabian Hohl, Franz Zotter: „Similarity of musical instrument radiation-patterns in pitch and partial“. Fortschritte der Akustik, DAGA, Berlin, 2010.
- [20] Daniel Deboy, Franz Zotter: „Comparison of acoustic centering maps for radiation capture of musical instruments with spherical microphone arrays“. Fortschritte der Akustik, DAGA, 2010.
- [21] Robert Baumgartner, Elmar Messner: „Auswirkung der Abstrahlcharakteristik auf die Klangfarbe von Querflöten und Saxofonen“. Bachelorarbeit, IEM, Univ. Musik u. darstellende Kunst Graz, 2010.
- [22] Ilan Ben Hagai, Martin Pollow, Michael Vorländer, Boaz Rafaely: „Acoustic centering of sources measured by surrounding spherical microphone arrays“. J. Acous. Soc. Am., 2012.
- [23] Daniel Deboy, Franz Zotter: „Tangential Intensity Algorithm for Acoustic Centering“. Fortschritte der Akustik, DAGA, Berlin, 2010.
- [24] Ralf Baumgartner, Franz Zotter: „Time-Domain Translation Operators for the Fast-Multipole-Method“. Fortschritte der Akustik, DAGA, Darmstadt, 2012.
- [25] Johannes Zaar, Franz Zotter, Markus Noisternig: „Phase Unwrapping over the Sphere for Directivity Functions and HRTFs“. Fortschritte der Akustik, DAGA, Darmstadt, 2012.
- [26] Franz Zotter, Alois Sontacchi: „Icosahedral Loudspeaker Array“. IEM-Report 39/07, Univ. Musik u. darstellende Kunst Graz, 2007.
- [27] Michael Kerscher, Franz Zotter: „Kompakte 16-Kanal-Kugellautsprecheranordnung“. Fortschritte der Akustik, DAGA, Berlin, 2010.
- [28] Franz Zotter, Alois Sontacchi, Robert Höldrich: „Modeling a Spherical Loudspeaker System as Multipole Source“. Fortschritte der Akustik, DAGA, Stuttgart, 2007.
- [29] Franz Zotter, Robert Höldrich: „Modeling Radiation Synthesis with Spherical Loudspeaker Arrays“. ICA, Madrid, 2007.
- [30] Hannes Pomberger: *Angular and Radial Directivity Control for Spherical Loudspeaker Arrays*. Diplomarbeit, IEM, Univ. Musik u. darstellende Kunst Graz, 2008.
- [31] Michael Kerscher: *Compact Spherical Loudspeaker Array: Implementation of a System for Variable Sound-Radiation*. VDM Verlag Dr Müller, 2010.
- [32] Michael Brandstein, Darren Ward: *Microphone Arrays*. Springer, 2001.
- [33] Franz Zotter, Markus Noisternig: „Near- and Far-Field Beamforming Using Spherical Loudspeaker Arrays.“ 3rd AAAA Congress, Graz, 2007.
- [34] Franz Zotter, Andrew Schmeder, Markus Noisternig: „Crosstalk Cancellation for Spherical Loudspeaker Arrays.“ Fortschritte der Akustik, DAGA, Dresden, 2008.
- [35] Franz Zotter, Hannes Pomberger, Andrew Schmeder: „Efficient Directivity Pattern Control for Spherical Loudspeaker Arrays“. acoustics-08, Paris, 2008.
- [36] Martin Pollow, Gottfried K. Behler: „Variable directivity for Platonic sound sources based on spherical harmonics optimization“. Acta Acustica un. Acustica, 2009.
- [37] Alexander Mattioli Pasqual, Philippe Herzog, José Roberto Arruda: „Theoretical and experimental analysis of the electromechanical behavior of a compact spherical loudspeaker array for directivity control“. J. Acoust. Soc. Am., 2010.
- [38] Alexander Mattioli Pasqual, José Roberto Arruda, Philippe Herzog: „Application of acoustic radiation modes in the directivity control by a spherical loudspeaker array“. Acta Acustica un. Acustica, 2010.
- [39] Alexander Mattioli Pasqual, José Roberto Arruda, Philippe Herzog: „Effects of enclosure design on the directivity synthesis by spherical loudspeaker arrays“. acoustics-08, Paris, 2008.
- [40] Franz Zotter, Balázs Bank: „Geometric Error Estimation and Compensation in Compact Spherical Loudspeaker Array Calibration“. I2MTC, IEEE, Graz, 2012.
- [41] Robert Baumgartner, Hannes Pomberger, Matthias Frank: „Practical Implementation of Radial Filters for Ambisonic Recordings“. ICSA, Detmold, 2011.
- [42] Markus Noisternig, Franz Zotter, Rémi Desmonet, Winfried Ritsch: „Preserving sound source radiation-characteristics in network-based musical performances“. Fortschritte der Akustik, DAGA, Düsseldorf, 2011.
- [43] Gerriet K. Sharma, Franz Zotter: „grawe. For a couple of years only one inhabitant resided there, and also he was only rarely at home“, Sound-composition for an icosahedral loudspeaker, DAFx-10-Konzert, Graz, 2010.
- [44] Hai Morgenstern, Franz Zotter, Boaz Rafaely: „Joint spherical beam forming for directional analysis of reflections in rooms“. Acoustics 2012, Hong Kong, 2012.
- [45] Gerhard Eckel, Gerd Grupe, Robert Höldrich, Gerhard Nierhaus, Rainer Schütz, Alois Sontacchi, Franz Zotter: „Endbericht zum Projekt Virtual Gamelan Graz (VGG)“. Zukunftsfonds Steiermark (GZ: A3-25R9-05/19), 2005–2007.