

Kapitel: Wellenfeldsynthese

Frank Schultz, Nara Hahn, Sascha Spors

Institut für Nachrichtentechnik

Universität Rostock, Rostock, Deutschland

{frank.schultz, nara.hahn, sascha.spors}@uni-rostock.de

Index Terms—Spatialisierung, Virtuelle Punktquelle, Wellenfeld, Wellenfront, Wellenfrontkrümmung, Räumliches Aliasing

ZUSAMMENFASSUNG

Wellenfeldsynthese (WFS) ist ein räumliches Wiedergabeverfahren, mit dem räumlich und zeitlich gestaffelte Wellenfronten mittels kontrollierter Interferenz synthetisiert werden. Dazu benötigt es Lautsprecherarrays mit sehr dichtem Lautsprecherabstand und individueller Signalverarbeitung für die Lautsprecher. Im Gegensatz zu kanalbasierten Wiedergabeverfahren werden bei der WFS die Lautsprechersignale errechnet wofür Messdaten oder Audio-Objekte, und deren räumlich-zeitliche Parametrik einfließen. Anwendung findet die WFS bei lautsprecherbasierter Auralisation, Nachhallsynthese in Räumen, 3D-Beschallungskonzepten, audiologischer Grundlagenforschung und spatialisierter Audiokunst.

Das Kapitel diskutiert die akustischen Grundlagen der WFS, enthält eine kompakte, anschauliche Herleitung der WFS einer virtuellen Punktquelle und arbeitet die wichtigsten Eigenschaften der mit WFS synthetisierten Schallfelder heraus. Abschließend werden praxisrelevante WFS-Modifikationen und -Werkzeuge dargelegt.

I. EINLEITUNG

Wellenfeldsynthese (WFS) [1], [2] ist ein nicht-kanalbasiertes Lautsprecherwiedergabeverfahren, welches in der Praxis häufig zur Spatialisierung von Audio-Objekten verwendet wird [3]. Mit einer großen Anzahl dicht gereihter und individuell ansteuerbarer Lautsprecher werden Überlagerungen von Wellen, d.h. Interferenzen, kontrolliert erzeugt, so dass gewünschte Wellenfrontenverläufe entstehen, vgl. Abb. 2 (rechts) und Abb. 17. Die WFS wird den sogenannten Schallfeldsyntheseverfahren zugeordnet [4] und für Audioanwendungen seit Ende der 1980er Jahre [5] erforscht und entwickelt. In der Praxis werden meist horizontale, zuhörerflächen-(teil)-umschließende Lautsprecherarrays verwendet, also z.B. Rechteck-,

Kreisarrays oder frontale Zeilen, vgl. Abb. 1 und [1], [6].

In diesem Kapitel wird die Grundidee der WFS aufgezeigt. Im Rest dieses Abschnitts wird das WFS-Konzept grundlegend verortet und der Wissensstand zur WFS historisch kurz eingeordnet. In Abschn. II wird das wellentheoretische Fundament der WFS eingeführt. Danach wird in Abschn. III eine kompakte, allgemeine Herleitung für die WFS einer virtuellen Punktquelle präsentiert. Mit numerischen Simulationen werden in Abschn. IV die wichtigsten Eigenschaften der mit WFS erzeugten Schallfelder und einige psychoakustische Implikationen diskutiert. Der Abschn. V behandelt einige praxisrelevante Modifikationen und Erweiterungen. Abschließend wird in Abschn. VI kurz auf Werkzeuge für die Produktionspraxis eingegangen.

Bei der WFS steht zunächst die technisch optimierte Erzeugung von Wellenfronten für einen großen Zuhörerbereich im Vordergrund. Dem Verfahren liegt die Annahme zugrunde, dass technisch perfekt synthetisierte Wellenfronten, vgl. Abb. 2 (rechts) identisch zu Referenzwellenfronten, vgl. Abb. 2 (links) sind, sie daher die gleiche binaurale Anregung [7, S. 573] und auditive Wahrnehmung zur Folge haben. Bei perfekter Synthese lässt sich die Erzeugung von akustischen Szenen aus Wellenfronten als rein technisches Herstellungsverfahren auffassen. Die perfekte Synthese von Wellenfronten ließe sich für die gesamte Audiobandbreite nur mit sehr hohem technischen Aufwand realisieren. In der Praxis muss die Wellenfronterzeugung für die gewünschte akustische Szene im Hinblick auf a) vertretbaren Technik- und Kostenaufwand, b) technische und c) perzeptive Optimierung erfolgen. Es erscheint dann sinnvoll, die WFS – oder gar individuelle WFS-Systeme, bestehend aus Hard- und Software – als Instrumente aufzufassen, die es technisch und psychoakustisch zu erforschen und erlernen gilt. Dies wurde mutmaßlich erstmals in den 1930er Jahren als Ingenieursutopie in Aussicht gestellt [8], [9] – aus der zunächst die Left/Center/Right (LCR) Wiedergabetechnik motiviert wurde – und dann ab Ende der 1980er Jahre [5] dank Realisierbarkeit mit digitaler Echtzeitsignalverarbeitung umgesetzt.

In der Geschichte der WFS, vgl. [1], [6] lassen sich grob

Frank Schultz, Nara Hahn, Sascha Spors

Institut für Nachrichtentechnik, Universität Rostock, Rostock, Deutschland

E-Mail: {frank.schultz, nara.hahn, sascha.spors}@uni-rostock.de

Version: 20. Juni 2023, draft for the upcoming chapter in

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-60357-4>



Abbildung 1. Panoramafoto des WFS-Systems im Audio-Labor der Universität Rostock mit 64 Zwei-Weg-Studiomonitoren auf Ohrhöhe für mittelgroße, stehende Zuhörende und entlang einer $4\text{m} \times 4\text{m}$ quadratischen Hüllkontur mit freien Ecken und mittlerem Lautsprecherabstand von ca. 0,23 m. CC BY 4.0 Matthias Geier, Sascha Spors.

drei Forschungs- und Entwicklungswellen ausmachen. Die theoretische und praktische Einführung erfolgte in den 1990er Jahren mit initial an der TU Delft durchgeführten Arbeiten, wovon [10]–[16] das Wissensspektrum dieser ersten Welle charakterisieren. In den 2000er Jahren folgte eine zweite Welle, die ausgehend vom EU-Entwicklungsprojekt CARROUSO [17] von Bemühungen zur Standardisierung (MPEG4) [18] und Vermarktung (Firmen Iosono und Sonic Emotions) geprägt war. WFS wurde als Wiedergabeverfahren für ein breites Feld von potentiellen Anwendungsszenarien [19], [20] diskutiert. Technische Aspekte wurden im Detail untersucht [21]–[28], der Instrumentencharakter von WFS wurde bezüglich tonmeisterlicher Ästhetik [20], [29]–[31], als auch hinsichtlich der Bedienungsästhetik von Audio-Objekten [32]–[35] weiter erörtert. Zudem wurden in dieser Phase die Ambisonics-Derivate und die WFS als objektbasierte Wiedergabeverfahren bezüglich ihrer Gemeinsamkeiten und Unterschiede analysiert [36]–[41]. Die dritte Welle ab den 2010er Jahren konsolidierte und erweiterte das Verständnis zur Theorie und Psychoakustik von WFS vor allem mit den Arbeiten [42]–[50].

II. GRUNDLAGEN

Die WFS leitet sich aus fundamentalen Gesetzen linearer Wellenausbreitung ab. Diese werden in diesem Abschnitt formal eingeführt und die WFS diesbezüglich verortet.

A. Elementarquellen Mono- und Dipol

Zur Herleitung der WFS werden die zwei akustischen, idealisierten Elementarquellen Monopol und Dipol benötigt.

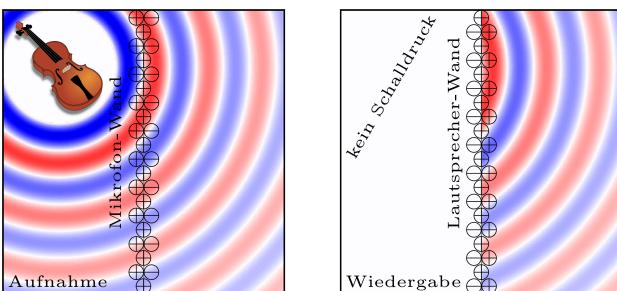


Abbildung 2. WFS-Prinzip basierend auf der Glg. (6) für das Halbraumproblem. Links: Aufnahme einer akustischen Szene mit Achter-Druckgradienten- ($\ominus\ominus$) und Druckmikrofonen (\oplus) entlang einer Fläche. Rechts: die Wiedergabe dieser Signale mit einer Fläche aus Monopol- (\oplus) und Dipollautsprechern ($\ominus\oplus$) führt wegen Wellenüberlagerung im rechten Halbraum zum gleichen Schallfeld wie das der originalen akustischen Szene (datenbasierte Direktwiedergabe). Statt Messungen können analytische Schallfeldmodelle bezüglich Druck und Druckgradient entlang der Fläche ausgewertet und daraus die Ansteuerung für die Lautsprecher berechnet werden (modellbasierte Wiedergabe). CC BY 4.0 Frank Schultz, Nara Hahn

Der Monopol, auch Punktquelle genannt, an der Position $\mathbf{x} = (x, y, z)^T$ erzeugt ein monofrequentes 3D-Schallfeld

$$G(r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r}) = \frac{e^{-j\frac{\omega}{c} r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r}}}{4\pi r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r}} \quad (1)$$

für die Empfänger-/Mess-/Aufpunkte $\mathbf{x}_r = (x_r, y_r, z_r)^T$. Die $\frac{1}{4\pi}$ -Normalisierung ist gewählt, damit unten Glg. (6) in dieser Form eingeführt werden kann. Die als konstant angenommene Schallausbreitungsgeschwindigkeit c [m/s] ergibt sich als Produkt von Frequenz f [Hz] und akustischer Wellenlänge λ [m]

$$c = \lambda f, \quad (2)$$

und es besteht der Zusammenhang $\omega = 2\pi f$ zwischen Kreisfrequenz ω [rad/s] und Frequenz f . Die imaginäre Zahl j liefert nach Definition $j^2 = -1$. Der Abstand zwischen der Quellenposition \mathbf{x} und einem Messpunkt \mathbf{x}_r wird mit $r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r} = \|\mathbf{x}-\mathbf{x}_r\|$ beschrieben. Die euklidische Länge eines kartesischen Vektors \mathbf{x} ist als $\|\mathbf{x}\| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ definiert. Ein Spaltenvektor \mathbf{x} transponiert ergibt den Zeilenvektor \mathbf{x}^T . Für die in der linearen Akustik übliche Rechnung mit komplexen Zeigern für monofrequente Schallfelder lässt sich der Schalldruckverlauf des Monopols über die Zeit für die gewählte Kreisfrequenz ω durch Realteilbildung $\Re\{G(r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r}) \cdot e^{+j\omega t}\}$ berechnen. Für breitbandige Anwendungen wird später die Diskussion auf Spektren, z.B. für $G(r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r}, \omega)$, erweitert.

Abb. 3 referenziert die Farbskalen für den Pegel und den instantanen, linearen Schalldruckwert, welche jeweils bei allen dargestellten monofrequenten Schallfeldern benutzt werden. Ein monofrequentes Schallfeld des Monopols ist in Abb. 4 (oben) für die xy -Ebene visualisiert. Das omnidirektionale Abstrahlverhalten des Monopols mit 6 dB-Pegelabnahme pro Entfernungsverdopplung ist ersichtlich.

Der Dipol an der Position \mathbf{x} erzeugt ein monofrequentes Schallfeld, welches sich auch aus der Glg. (1) berechnen lässt.

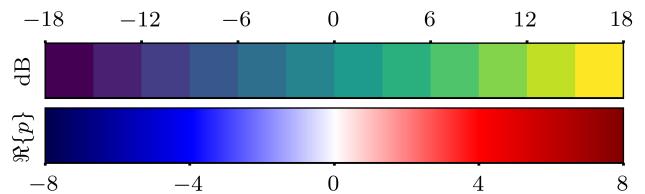


Abbildung 3. Farbskalierung für alle folgenden Grafiken monofrequenter Schallfelder. Oben: Pegel mit 3 dB pro Farbe und 0 dB bezogen auf Amplitudenwert Eins. Unten: Realteil der komplexen Schalldruckwechselgröße $p(x_r, y_r)$. Schalldruckpegel $> +18$ dB und Schalldruckwerte $> +8$ erfahren eine orange Farbsättigung, Schalldruckpegel < -18 dB und Schalldruckwerte < -8 sind mit cyan gesättigt. CC BY 4.0 Frank Schultz, Nara Hahn

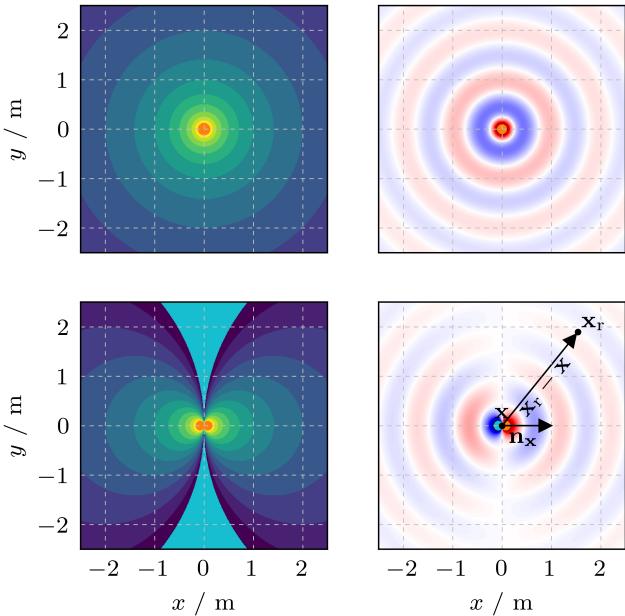


Abbildung 4. Schallfeld in der xy -Ebene. Oben: normalisierter Monopol $4\pi G(r_{x-x_r})$, unten: normalisierter Dipol $4\pi \frac{c}{\omega} G_{\text{Dipol}}(r_{x-x_r})$. Quellenposition $\boldsymbol{x} = (0, 0, 0)^T$ m, Wellenlänge $\lambda = 1$ m, Schallgeschwindigkeit $c = 343$ m/s, visualisierter Zeitpunkt $t = 0$ s, Normalen-Richtungsvektor $\boldsymbol{n}_x = (1, 0, 0)^T$ zeigt in die Richtung der positiven Dipol-Hauptkeule. Farbskalierung gemäß Abb. 3. CC BY 4.0 Frank Schultz, Nara Hahn

Es ergibt sich aus deren räumlicher Ableitung (Gradientenbildung bezüglich \boldsymbol{x} mit dem Operator $\nabla = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z})^T$ für kartesische Koordinaten) und anschließender Projektion (Skalarprodukt) auf den gewünschten Normalenvektor \boldsymbol{n}_x

$$\begin{aligned} G_{\text{Dipol}}(r_{x-x_r}) &= \boldsymbol{n}_x^T \nabla G(r_{x-x_r}) \\ &= -\boldsymbol{n}_x^T \boldsymbol{\theta}_{x-x_r} \cdot G(r_{x-x_r}) \cdot \left(j \frac{\omega}{c} + \frac{1}{r_{x-x_r}} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Das Skalarprodukt der Vektoren \boldsymbol{n} und $\boldsymbol{\theta}$ in kartesischer Form wird als $\boldsymbol{n}^T \boldsymbol{\theta}$ notiert. Der Einheitsvektor

$$\boldsymbol{\theta}_{x-x_r} := \frac{\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_r}{\|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_r\|} = \frac{\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_r}{r_{x-x_r}} \quad (4)$$

zeigt vom Messpunkt \boldsymbol{x}_r zur Dipol- bzw. Monopolposition \boldsymbol{x} . Für hohe Frequenzen und/oder weit entfernte Abstände $\frac{\omega}{c} r_{x-x_r} \gg 1$ kann Glg. (3) mit

$$G_{\text{Dipol}}(r_{x-x_r}) \approx -\boldsymbol{n}_x^T \boldsymbol{\theta}_{x-x_r} G(r_{x-x_r}) j \frac{\omega}{c} \quad (5)$$

genähert werden. In Abb. 4 (unten) ist beispielhaft das Schallfeld eines Dipoles visualisiert. Der Normalenvektor \boldsymbol{n}_x in Richtung der x -Achse zeigt in Richtung der zu $t = 0$ s positiven Dipol-Hauptkeule. Dies ergibt inhärent die dazu 90° stehende yz -Ebene, in welcher der Schalldruck beim Dipol Null ist (Dipolnullstelle). Beachtenswert ist die exakte 90° -Phasenverschiebung zwischen Monopol und hochfrequenzgenähertem Dipol.

B. Kirchhoff-Helmholtz-Hüllflächenintegral

Nun sei ein Volumen V durch eine Hüllfläche S umschlossen, wie es in Abb. 5 mit dem blauen Körper angedeutet ist.

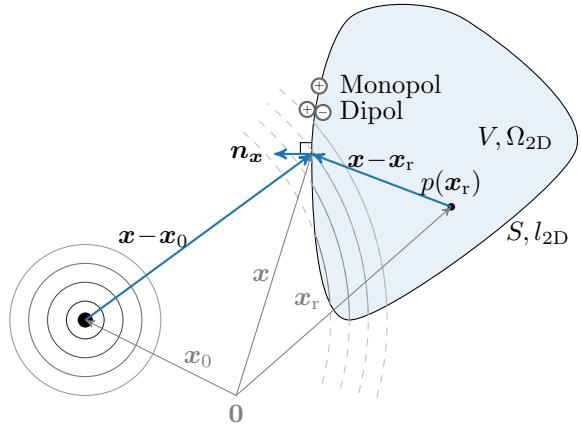


Abbildung 5. Geometrie für das Kirchhoff-Helmholtz-Integral (KHI) in Glg. (6) zur Schalldrucksynthese innerhalb eines quellenfreien Volumens V . Positionen \boldsymbol{x} von Mono- und Dipolen (Sekundärquellen) auf der Hüllfläche S mit herauszeigendem Normalenvektor \boldsymbol{n}_x , Position \boldsymbol{x}_0 der virtuellen Punktquelle (Primärquelle), Empfänger-/Mess-/Aufpunkt(e) \boldsymbol{x}_r . In der Praxis wird oft monopolbasierte Schalldrucksynthese mit einer konvexen Hüllkontur l_{2D} realisiert, welche die Fläche Ω_{2D} in einer gewählten Zuhörerebene einschließt. CC BY 4.0 Frank Schultz, Nara Hahn

Auf die Hüllfläche werden mit infinitesimalem Abstand Monopole und Dipole als sogenannte Sekundärquellen platziert. Jedem Punkt \boldsymbol{x} auf der Hüllfläche ist ein senkrecht zur Fläche, aus dem Volumen herauszeigender Normalenvektor \boldsymbol{n}_x zugewiesen. Die exakte und eindeutige Synthese des Schalldrucks $p(\boldsymbol{x}_r)$ wird als Schallfeldüberlagerung gewichteter Mono- und Dipole durch das als Kirchhoff-Helmholtz-Integral (KHI) bekannte Hüllflächenintegral, vgl. [51, Kap. 23.2]

$$p(\boldsymbol{x}_r) = \int_S \underbrace{[\boldsymbol{n}_x^T \nabla p(\boldsymbol{x}) \cdot G(r_{\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}_r}) - p(\boldsymbol{x}) \cdot \underbrace{\boldsymbol{n}_x^T \nabla G(r_{\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}_r})}_{\text{Dipolsignal}}]}_{\text{Monopolsignal}} \, dS, \quad (6)$$

für Empfängerpunkte \boldsymbol{x}_r innerhalb eines quellenfreien Volumens V beschrieben; für \boldsymbol{x}_r außerhalb V gilt dann $p(\boldsymbol{x}_r) = 0$. Das KHI in Glg. (6) ist die fundamentale, integrale Beschreibung des Phänomens lineare Wellenausbreitung und -überlagerung. Es ist die Grundlage für Schallfeldsynthese im Allgemeinen, speziell also auch für die WFS. In der Praxis wird das Schallfeld durch die Überlagerung von sich ausbreitenden Schallfeldern der individuell angesteuerten Lautsprecher erzeugt, und somit $p(\boldsymbol{x}_r)$ über eine diskrete Summation erzeugt. Die resultierende, physikalisch begründete Approximation des eigentlich intendierten Schallfeldes ist charakteristisch für alle KHI-basierten Schallfeldsyntheseverfahren, daher nicht WFS-spezifisch. Der Schalldruckverlauf über die Zeit wird mit $\Re\{p(\boldsymbol{x}_r) \cdot e^{j\omega t}\}$ für ein monofrequentes Schallfeld mit der Kreisfrequenz ω berechnet.

C. Gewichtungssignale für daten- und modellbasierten WFS-Ansatz

Mit der WFS können Schallszenarien, oft auch akustische Szenen genannt, bestehend aus räumlich und zeitlich gestaffelten Wellenfronten synthetisiert werden. Im WFS-Kontext gibt

es zwei grundständige Herangehensweisen zur Erzeugung von akustischen Szenen: die datenbasierte und die modellbasierte. Die datenbasierte WFS, vgl. [5] verarbeitet direkt akustische Messungen als WFS-Ansteuerungssignale, wie in Abb. 2 angedeutet. Die modellbasierte WFS, vgl. [10] arbeitet mit Modellen für virtuelle Schallquellen wie in Abb. 5 skizziert. Dieser Ansatz ist Bestandteil von objektbasierter Wiedergabe [2], [4], [18], [18], [52]–[54], für die Audiosignal, Modelltyp und -parametrik einem, mit der WFS zu spatialisierenden, Audio-Objekt zugewiesen werden.

Die Gewichtungssignale $\mathbf{n}_x^T \nabla p(\mathbf{x})$ für die Monopole im KHI (in Glg. (6) als Monopolsignal bezeichnet) sind die normalen-projizierten Schalldruckgradienten auf der Hüllfläche. Diese Signale sind proportional zur normalen Schallschnelle bezüglich der Hüllfläche, vgl. [10], [13]. Beim datenbasierten Direkt-Wiedergabeansatz stammen sie von Messungen bzw. von Aufnahmen mit Druckgradientenmikrofonen mit Achter-Richtcharakteristik, wobei die Hauptkeule orthogonal zur Hüllfläche ausgerichtet ist, vgl. Abb. 2. Die Gewichtungssignale $p(\mathbf{x})$ für die Dipole im KHI (in Glg. (6) als Dipolsignal bezeichnet) entsprechen den Schalldrücken auf der Hüllfläche. Diese können für den datenbasierten Ansatz direkt mit omnidirektionalen Druckempfängern aufgezeichnet werden. Die datenbasierte Direktwiedergabe entspricht im Wesen der Utopie von [8], [9] ohne weitere Signalaufbereitung zwischen *screen of microphones* und *screen of loudspeakers* [7, S. 572]. Die Manipulationsmöglichkeiten räumlicher und zeitlicher Parameter beim datenbasierten Ansatz mit Zwischenverarbeitung der Mikrofonsignale sind eingeschränkt, dafür kann die räumlich-zeitliche Komplexität eines Schallfeldes durch geeignete Messauflösung vergleichsweise einfach erfasst und synthetisiert werden, vgl. [16], [22], [55].

Beim modellbasierten Ansatz errechnen sich die benötigten Gewichtungssignale $\mathbf{n}_x^T \nabla p(\mathbf{x})$ und $p(\mathbf{x})$ aus dem Schallfeld eines analytisch gegebenen Quellenmodells – z.B. eine außerhalb von V befindliche Punktquelle, wie jene bei \mathbf{x}_0 in Abb. 5 – dem ein zu spatialisierendes Audiosignal aufgeprägt wird. Ein Quellenmodell wird im WFS-Kontext oft als virtuelle Quelle oder als Primärquelle bezeichnet. Die auf der Hüllfläche S positionierten Mono- und Dipole werden hingegen als Sekundärquellen bezeichnet. Beim modellbasierten Wiedergabeansatz werden typischerweise einfache Quellenmodelle gewählt, einhergehend mit vergleichsweise geringer Schallfeldkomplexität, dafür aber mit einfacher Variationsmöglichkeit der Raum-Zeitparametrik des Quellenmodells. Einfache virtuelle Quellenmodelle sind die Punktquelle [10], [14], die sogenannte fokussierte Punktquelle [15], [23], [26], [46] und die ebene Welle [43], [47], [56]. Das ebene Wellenmodell kann als Grenzfall der sehr weit entfernten Punktquelle aufgefasst werden. Für die Punktquelle wurden Modellerweiterungen für Quellrichtcharakteristika und Bewegungstrajektorien diskutiert, vgl. [35], [47], [57]–[62].

Beiden Ansätzen, dem daten- bzw. dem modellbasierten, ist ein gemessener bzw. ein gewünschter, analytisch bekannter Wellenfrontverlauf gemein, der auf Basis des KHIs rekonstruiert bzw. synthetisiert werden soll. Daraus resultieren die in der Literatur synonym verwendeten Begriffe Wellenfrontsynthese und Wellenfeldsynthese [63], [64].

III. MODELLBASIERTER ANSATZ FÜR DIE WFS EINER VIRTUELLEN PUNKTQUELLE

Weil die virtuelle Punktquelle ein fundamentales Quellenmodell darstellt und in der WFS-Produktionspraxis eine wichtige Rolle spielt, soll im Folgenden auf die modellbasierte WFS der virtuellen Punktquelle näher eingegangen werden. Diese soll bei \mathbf{x}_0 außerhalb von V positioniert sein¹, vgl. Abb. 5. Damit definiert sich der Einheitsvektor

$$\boldsymbol{\theta}_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0} := \frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}_0}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0\|} = \frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}_0}{r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}} \quad (7)$$

von der virtuellen Punktquelle \mathbf{x}_0 zu einem Hüllflächenpunkt \mathbf{x} zeigend. Der Abstand zwischen diesen beiden Punkten ist $r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0} = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0\|$.

A. Fernfeld-/Hochfrequenz-Näherung des KHI

Die virtuelle Punktquelle mit komplexer Amplitude A erzeugt auf der Hüllfläche S das monofrequeute Schallfeld $p(\mathbf{x}) = A \cdot G(r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0})$. Für die Synthese einer Wellenfront ausgehend von dieser virtuellen Punktquelle wird $p(\mathbf{x})$ in das KHI in Glg. (6) eingesetzt. Unter den Bedingungen $\frac{\omega}{c} r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r} \gg 1$ und $\frac{\omega}{c} r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0} \gg 1$ kann der Integrand genähert werden (vgl. Glg. (3) und (5)), was zum Schallfeld $p(\mathbf{x}_r)$

$$p(\mathbf{x}_r) \approx \int_S \underbrace{[-A j \frac{\omega}{c} \mathbf{n}_x^T \boldsymbol{\theta}_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0} G(r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0})]}_{\text{Monopolsignal, hochfrequenzgenähert}} \cdot \underbrace{G(r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r})}_{\text{Monopol}} - \underbrace{A G(r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}) \cdot (-j \frac{\omega}{c}) \mathbf{n}_x^T \boldsymbol{\theta}_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r} G(r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r})}_{\text{Dipolsignal}} \mathrm{d}S \quad (8)$$

Dipol, hochfrequenzgenähert, vgl. (5)

führt und die Grundlage zur Beschreibung der in Seismik, Optik und Akustik bekannten Fresnel-Kirchhoff-Beugung einer Punktquelle darstellt, sowie Ausgangspunkt der High Frequency Boundary Element Method (HF-BEM) ist, vgl. [44], [47], [65]. Diese auch für WFS verwendeten Fernfeld- und/oder Hochfrequenznäherungen fordern, dass die jeweiligen Abstände $r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0} = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0\|$ (virtuelle Quelle zu Sekundärquelle) und $r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r} = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_r\|$ (Sekundärquelle zu Empfänger) deutlich größer sind als die betrachtete Wellenlänge $\lambda = 2\pi \frac{c}{\omega}$. Das Integral kann umgeschrieben werden zu

$$p(\mathbf{x}_r) \approx \int_S \underbrace{A \cdot j \frac{\omega}{c} \cdot \mathbf{n}_x^T (\boldsymbol{\theta}_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r} - \boldsymbol{\theta}_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}) \cdot G(r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0})}_{\substack{\text{Grundlage für Ansteuerung } D(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}), \\ \text{Dipol Abhängigkeit}}} \times \underbrace{G(r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r})}_{\text{Monopol}} \mathrm{d}S, \quad (9)$$

wobei beachtenswert ist, dass trotz der Freistellung des Monopolquelltyps in Glg. (9) hochfrequenzgenäherte Sekundär-Dipole mit dem Term $j \frac{\omega}{c} \mathbf{n}_x^T \boldsymbol{\theta}_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r} G(r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r})$ enthalten sind, vgl. (5).

¹Die sogenannte fokussierte Quelle erhält man, wenn \mathbf{x}_0 innerhalb von V zugelassen wird, was hier zu Gunsten anderer Inhalte nicht im Detail diskutiert wird.

B. Monopolbasierte 3D- und 2.5D-Syntheseintegrale

Um den praktischen Aufwand maßvoll zu gestalten, wird bei der Realisierung von WFS typischerweise nur ein Lautsprecherotyp für die Sekundärquellen verwendet, vgl. [13]. Diese Einschränkung für das KHI hat zur Folge, dass auch ein Schallfeld außerhalb des Synthesevolumens erzeugt wird, welches einen etwaigen Wiedergaberaum anregt, vgl. [14], [30], [31], [49], [66], und das gewünschte Schallfeld von Raumreflexionen überlagert wird. Typische Lautsprecherboxen verhalten sich im tieffrequenten, für WFS praktikablen Frequenzbereich (vgl. Glg. (24)) annähernd monopolartig und weisen mit zunehmender Frequenz eine zunehmende Richtwirkung zur Frontalrichtung hin auf. Die weitere Betrachtung erfolgt daher vereinfachend mit Monopolen und ohne Berücksichtigung von Raumeinflüssen, d.h. für Freifeldbedingungen.

Das Integral für 3D-Synthese mit Monopolen auf der Hüllfläche S kann allgemeiner

$$p(\mathbf{x}_r) = \int_S A D_{3D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}) G(r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r}) dS \quad (10)$$

geschrieben werden. Die unbekannte, sogenannte Treiberfunktion $D_{3D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x})$ stellt eine lautsprecherindividuelle, komplexe Gewichtung der Eingangssignalamplitude A der virtuellen Punktquelle dar. Das komplexe Gewicht geht bei breitbandiger Betrachtung in das Spektrum $D_{3D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}, \omega)$ über. Dieses wird im Folgenden Filter-Frequenzgang genannt, um es eindeutig vom Frequenzgang eines breitbandigen Schallfeldes, welcher an einem bestimmten Empfängerpunkt gemessen wird, unterscheidbar zu machen. Breitbandig ergibt sich im Frequenzbereich somit die Multiplikation des Audio-Eingangssignalspektrums $A(\omega)$ der virtuellen Quelle mit dem lautsprecherindividuellen Filter-Frequenzgang $D_{3D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}, \omega)$ der gesuchten WFS-Ansteuerung.

Um den praktischen Aufwand weiter zu reduzieren, wird statt einer Hüllfläche S eine Hüllkontur l_{2D} verwendet. Für die WFS innerhalb einer Horizontalebene kommen dabei oft lineare bzw. kreis- oder rechteckartig umhüllende Lautsprecherarrays zum Einsatz, idealerweise auf Ohrhöhe, vgl. Abb. 1, [1], [6]. Das Syntheseintegral mit Monopolen auf der Hüllkontur l_{2D} lautet allgemein

$$p(\mathbf{x}_r) = \int_{l_{2D}} A D_{2.5D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}, \mathbf{x}_r) G(r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r}) dl_{2D}. \quad (11)$$

Für diesen Fall wird typisch und praxisrelevant angenommen, dass virtuelle Quelle, Hüllkontur und Empfängerpunkte in der gleichen Ebene liegen. Das Linienintegral und die betrachtete Syntheseebene sind zwei-dimensional, der gewählte Primär- und Sekundärquellentyp Monopol erzeugt hingegen ein drei-dimensionales Schallfeld. Die Synthese mit Glg. (11) liefert nun daher zwar ein 3D-Schallfeld, welches aber nur von zwei ortspezifischen Variablen abhängig ist und entsprechend nur in 2D kontrolliert bzw. parametrisiert werden kann. Dies ist in der Wellentheorie bekannt als zweieinhalf-dimensionales Problem [67]. Die zugeschnittene, gesuchte Treiberfunktion $D_{2.5D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}, \mathbf{x}_r)$ bzw. der Filter-Frequenzgang $D_{2.5D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}, \mathbf{x}_r, \omega)$ erhalten daher den Index 2.5D, um die

zweieinhalf-dimensionale WFS, also die 2.5D-Synthese, klar vom 3D-WFS-Fall abzugrenzen.

Die Integrale in den Glgn. (10), (11) stellen Faltungen bezüglich der Ortsvariablen dar. Sie sind selten geschlossnen analytisch berechenbar. Die gesuchte Treiberfunktion / der Filter-Frequenzgang D_{3D} ist Teil des Integranden. Drei wesentliche Verfahren zum Lösen nach der Treiberfunktion sind möglich: a) numerische Lösungen aus einem diskretisierten, inversen Problem, vgl. [68]–[71] b) explizite analytische Lösungen für einfache Geometrien als räumliches Entfaltungsproblem [40]–[42], [72], [73] und c) die implizite analytische Lösung, bei dem die Ansteuerungsfilter aus dem Integranden der Hochfrequenznäherung in Glg. (9) extrahiert werden können. Für Audioanwendungen wurde letztgenannte Methode als WFS in [10], [13] für die planare bzw. die lineare Sekundärquellengeometrie unter Benutzung der sogenannten Rayleigh-Integrale [51, Kap. 25.5] eingeführt und in Folge in [14], [15], [43], [44], [47], [74] konsolidierend ausformuliert. Die theoretische Abhandlung [47] für die WFS von allgemeinen konvexen, divergierenden Wellenfronten inklusive physikalisch korrekter Abbildung bewegter Quellen liefert eine stringente Analyse lokaler Wellenfrontkrümmungen und Wellenrichtungsvektoren für verschiedene Schallfeldsyntheseintegrale. Mit dieser Sichtweise können die bekannten WFS-Lösungen konsistent verortet und z.B. für bewegte Quellen [61], [62] erweitert werden. Basierend auf [74] soll eine diesem Kapitel angemessen kompakte, verallgemeinernde Betrachtung weiterverfolgt werden.

C. WFS als implizite Lösung mit Sattelpunktnäherung

Für die implizite Lösung nach der Treiberfunktion muss das Integral in Glg. (9) weiter vereinfacht werden. Vor allem muss für die intendierte monopolbasierte Synthese der in Glg. (9) noch vorhandene Sekundärquellentyp Dipol eliminiert werden. Die Vereinfachung gelingt mit der sogenannten Sattelpunktnäherung (*stationary phase approximation*), welche die Hochfrequenznäherung voraussetzt. Die Sattelpunktnäherung liefert den Schalldruck für *einen* beliebigen Empfängerpunkt \mathbf{x}_r im Zuhörerbereich für 3D-Synthese

$$p(\mathbf{x}_r) \approx A \cdot G(r_{\mathbf{x}_r-\mathbf{x}_0}) \quad (12)$$

und für 2.5D-Synthese

$$p(\mathbf{x}_r) \approx A \cdot \sqrt{\frac{j\omega}{c}} \sqrt{\frac{r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r} + r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}}{r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r} \cdot r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}}} \cdot G(r_{\mathbf{x}_r-\mathbf{x}_0}). \quad (13)$$

Das komplexe Gewicht $G(r_{\mathbf{x}_r-\mathbf{x}_0})$ beschreibt die Schallausbreitung einer Punktquelle bei \mathbf{x}_0 zum Empfängerpunkt \mathbf{x}_r mit dem Abstand $r_{\mathbf{x}_r-\mathbf{x}_0} = \|\mathbf{x}_r - \mathbf{x}_0\|$, vgl. (1). Die Näherung beinhaltet also die gewünschte lokale Phase des zu synthetisierenden Schallfeldes am Empfängerpunkt. Im 3D-Fall ist Amplitude und Phase inhärent korrekt und führt exakt zum gewünschten komplexen Wert des Schalldrucks der virtuellen Punktquelle. Im 2.5D-Fall hingegen weicht der gewünschte Schalldruck gemäß der zwei Wurzel-Ausdrücke in Glg. (13) ab.

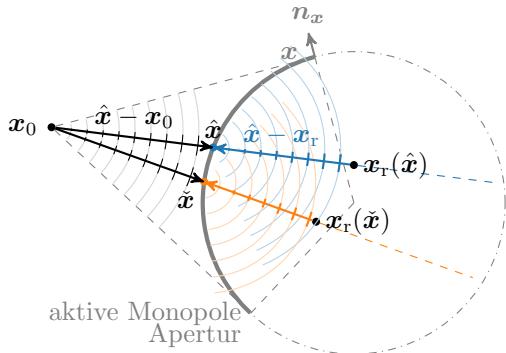


Abbildung 6. 3D-WFS. Monopole bei \mathbf{x} , angeordnet zu einem kugelförmigen Array, und eine virtuelle Punktquelle bei \mathbf{x}_0 . Die Sattelpunktnäherung kann als akustisches Strahlenmodell interpretiert werden: nur der auf dem Direktpfad von virtueller Quelle zu Empfänger (Vektor $\mathbf{x}_r - \mathbf{x}_0$) auf der Hüllfläche liegende Monopol trägt maßgeblich zur Synthese des Schallfelds der virtuellen Quelle bei. Für alle Punkte auf der Direktpfadverlängerung (beispielhaft ausgehend von $\hat{\mathbf{x}}$ entlang blau bzw. von $\check{\mathbf{x}}$ entlang orange) ist die Synthese bei 3D-WFS amplitudenkorrekt. Darstellung hier in 2D, man stelle sich eine Kugelkappe als Geometrie der aktiven Sekundärquellen vor, Empfängerpunkte innerhalb der Kugel. CC BY 4.0 Frank Schultz, Nara Hahn

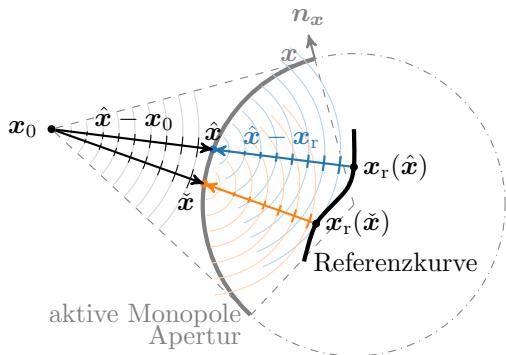


Abbildung 7. 2.5D-WFS. Alle Punkte und Vektoren in der gleichen Ebene. Monopole bei \mathbf{x} , angeordnet zu einem kreisförmigen Array, und eine virtuelle Punktquelle bei \mathbf{x}_0 . Sattelpunktnäherung für 2.5D-WFS: entlang des in den Zuhörerbereich verlängerten Pfades $\mathbf{x} - \mathbf{x}_0$ trägt nur der Monopol am Hüllkontur-Durchstoßpunkt maßgeblich zum synthetisierten Schallfeld bei. Amplitudenkorrekte Synthese ist für genau einen Referenzpunkt $\mathbf{x}_r(\mathbf{x})$ auf diesem Pfad möglich. Umkehrschluss: Entlang einer in Grenzen wählbaren Referenzkurve mit den Punkten $\mathbf{x}_r(\mathbf{x})$ – in der Grafik angedeutet mit $\mathbf{x}_r(\hat{\mathbf{x}})$ bzw. $\mathbf{x}_r(\check{\mathbf{x}})$ für die Monopole bei $\hat{\mathbf{x}}$ bzw. $\check{\mathbf{x}}$ – findet sich für jeden Referenzpunkt genau eine Quelle \mathbf{x} auf dem Pfad von virtueller Quelle zu Referenzpunkt. Mittels Amplitudenkorrektur dieser Quelle \mathbf{x} (vgl. Glg. (16)) gelingt amplitudenkorrekte Synthese entlang der gewählten Referenzkurve $\mathbf{x}_r(\mathbf{x})$. CC BY 4.0 Frank Schultz, Nara Hahn

Aus der Sattelpunktnäherung lässt sich zudem schliessen, dass dieses lokal begrenzte Ergebnis maßgeblich von nur *einem* Sekundärmonopol auf der Hüllfläche/-linie erzeugt wird. Er befindet sich an der Position \mathbf{x} , wo der Direktpfad von virtueller Quelle \mathbf{x}_0 zu Empfängerpunkt \mathbf{x}_r die Hülle durchstößt, vgl. Abb. 6 und 7. Dieses \mathbf{x} ist für das Integral in Glg. (9) ein Punkt stationärer Phase, der so genannt wird, weil in dessen Umgebung der Phasenterm des Integranden am wenigsten oszilliert. Genau dann gilt $\theta_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r} = -\theta_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}$ und damit für den Term in Glg. (9) die Beziehung $\mathbf{n}_{\mathbf{x}}^T (\theta_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r} - \theta_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}) = -2\mathbf{n}_{\mathbf{x}}^T \theta_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}$. Dadurch vereinfacht sich das Integral, weil keine sekundären Dipolquellen mehr zur Synthese benötigt werden. Beiträge zur Lösung mit potentiell anderen Punkten stationärer

Phase – unbrauchbare Spiegelreflexionen [74] – werden formal mit der Maximum-Operation

$$2 \cdot \max\{-\mathbf{n}_{\mathbf{x}}^T \theta_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}, 0\} \quad (14)$$

unterdrückt. Dieses Sattelpunktnäherung-inhärente Kriterium ist identisch mit dem sogenannten *secondary source selection criterion* [23], [36], [56], welches bei WFS-Herleitungen gesondert eingeführt wurde. Es ist auch im Kontext der HF-BEM bekannt und sorgt dafür, dass bei der Synthese keine Monopole aktiv sind, deren Wellenausbreitung in der Zuhörerfläche jener der virtuellen Quelle entgegenlaufen. In optischer Analogie sind nur die Monopole einer sinnvollerweise konvexen Hüllfläche aktiv, von denen aus eine direkte Sicht auf die virtuelle Quelle möglich ist, vgl. Abb. 6.

D. WFS-Ansteuerung im Frequenzbereich

Die Ergebnisse in Glg. (12) und (13) aus der Sattelpunktnäherung besagen, dass zur Erzeugung des Schalldrucks an einem spezifizierten Punkt \mathbf{x}_r nur ein Monopol maßgeblich beteiligt ist, was sich als Schallstrahlenmodell interpretieren lässt. Da die Erzeugung des korrekten Schalldrucks für mehrere Empfängerpunkte im Fokus der WFS steht, also mehrere Schallstrahlen zur korrekten Wellenfrontkrümmung beitragen sollen, müssen die Glgn. (12), (13), (14) und (9) sinnvoll verknüpft werden, damit für die Syntheseintegrale (10), (11) die benötigten WFS-Ansteuerungsfilter angegeben werden können. Dem impliziten Lösungsansatz folgend, wird dazu die erste geschweifte Klammer in Glg. (9) mit (12) bzw. (13) verglichen. Für eine breitbandige Ansteuerung resultiert der Filter-Frequenzgang für den 3D-Synthese-Fall

$$D_{3D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}, \omega) = 2j \frac{\omega}{c} \max\{-\mathbf{n}_{\mathbf{x}}^T \theta_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}, 0\} G(r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}, \omega) \quad (15)$$

und der Filter-Frequenzgang für den 2.5D-Synthese-Fall, vgl. [67], [75]

$$D_{2.5D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}, \mathbf{x}_r, \omega) = \underbrace{D_{3D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}, \omega)}_{\text{3D-WFS Treiberfunktion (15)}} \times \underbrace{\sqrt{\frac{2\pi}{j\omega} r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r}} \sqrt{\frac{r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}}{r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r} + r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}}}}_{\text{reziproke Faktoren von (13)}} \quad (16)$$

für jeden Monopol \mathbf{x} . Bei 2.5D-Synthese sorgen die reziproken Wurzel-Faktoren für die Kompensation der bei der Sattelpunktnäherungslösung in Glg. (13) entstandenen Abweichung. Der erste Wurzel-Ausdruck in Glg. (16) ist ein Filter und kompensiert den Umstand, dass sich die 2D-Hüllkontur spektral anders verhält als die 3D-Hüllfläche, während die zweite Wurzel als Gainwert die Amplitudenabnahme der 3D-Primärquelle bezüglich der 2D-Zuhörerebene normalisiert, vgl. [47, Kap. 4.1.3]. Letzteres wird im Folgenden als Amplitudenkorrektur bezeichnet. Wenn $r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0} \gg r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r}$ eingehalten wird, weist die synthetisierte Welle eine verschwindende Wellenkrümmung bei \mathbf{x}_r auf und der zweite Wurzel-Ausdruck geht gegen Eins. Dies kann für die 2.5D-WFS als ebenes Wellenmodell genutzt werden.

Die für 2.5D-WFS erforderliche Amplitudenkorrektur ist nur möglich für Punktpaare stationärer Phase: Für ein bestimmtes \mathbf{x} kann ein bestimmtes \mathbf{x}_r festgelegt werden, für das die Synthese amplitudenkorrekt sein soll, vgl. Abb. 7, [14, Kap. 3], [47, Kap. 4]. Der 3D-Fall ist amplitudenkorrekt für alle \mathbf{x}_r , falls die oben eingeführten Näherungsbedingungen eingehalten werden, vgl. Abb. 6.

Die Lösungen in Glg. (15), (16) für die Syntheseintegrale (10), (11) sind nur dann eine valide Näherung, wenn – neben Einhaltung der Fernfeld-/Hochfrequenznäherung – sowohl die Wellenlänge als auch die Wellenfrontkrümmung in Nähe der Hülle deutlich kleiner als die räumliche Ausdehnung der aktiven Hüllfläche bzw. -kontur (sogenannte Apertur) sind; dies folgt aus der Theorie der Kirchhoff- bzw. Fresnel-Kirchhoff-Beugung, für die WFS detailliert diskutiert in [47], [65].

E. WFS-Ansteuerung im Zeitbereich

WFS-Signalverarbeitung im Zeitbereich erfordert pro Lautsprecher einen individuellen Gain- und Delaywert, sowie ein spezielles Hochpassfilter, vgl. Abb. 8 für die 2.5D-WFS. Dies sind vergleichsweise einfache Operationen in der Signalverarbeitung. Wegen Präzision und Flexibilität sollte die Umsetzung mit Digitaltechnik erfolgen. Das WFS-Ansteuerungsfilter im Zeitbereich, also die Filter-Impulsantwort für den Monopol an der Position \mathbf{x} , wird für 3D-Synthese mit

$$d_{3D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}, t) = \underbrace{\gamma_{3D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x})}_{\text{Gain}} \cdot \underbrace{\delta(t - \frac{r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}}{c})}_{\text{Delay}} *_t \underbrace{h_{3D,\text{Pre}}(t)}_{\text{Filter}} \quad (17)$$

und für 2.5D-Synthese mit

$$d_{2.5D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}, \mathbf{x}_r, t) = \gamma_{2.5D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}, \mathbf{x}_r) \times \delta(t - \frac{r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}}{c}) *_t h_{2.5D,\text{Pre}}(t) \quad (18)$$

beschrieben. Die Faltungsoperation $*_t$ bezüglich der Zeit t ist die korrespondierende Operation zur Multiplikation von ω -abhängigen Frequenzgängen.

Die $j\frac{\omega}{c}$ -unabhängigen Terme in den Frequenzgängen in den Glgn. (15), (16)

$$\gamma_{3D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}) = 2 \max\{-\mathbf{n}_x^T \boldsymbol{\theta}_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}, 0\} \frac{1}{4\pi r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{2.5D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}, \mathbf{x}_r) &= \sqrt{2\pi} \sqrt{\frac{r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r} \cdot r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}}{r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r} + r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}}} \cdot \gamma_{3D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r}}{r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r} + r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}}} \frac{1}{\sqrt{r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}}} \max\{-\mathbf{n}_x^T \boldsymbol{\theta}_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}, 0\} \end{aligned} \quad (20)$$

verhalten sich bezüglich der Fourier-Transformation wie konstante Faktoren, treten daher im Frequenz- und Zeitbereich gleich auf. Diese stellen die lautsprecherindividuellen Gewichte (*gain*) für den 3D- bzw. 2.5D-Fall dar. Im 3D-Fall ist das Gewicht pro Lautsprecher nur von der Position \mathbf{x}_0 der virtuellen Punktquelle und natürlich von der Lautsprecherposition \mathbf{x} abhängig. Im 2.5D-Fall ergibt sich eine zusätzliche Abhängigkeit zu genau dem Empfängerpunkt $\mathbf{x}_r(\mathbf{x})$, für den eine amplitudenkorrekte Synthese realisiert werden soll, vgl. Abb. 7.

In den Filter-Frequenzgängen in den Glgn. (15), (16) resultiert für den in $G(r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}, \omega)$ (vgl. Glg. (1)) auftretenden komplexen Zeiger $e^{-j\frac{\omega}{c}r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}}$ die zeitliche Korrespondenz

$$e^{-j\frac{\omega}{c}r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}} \bullet\!\!\!-\!\!\circ \delta\left(t - \frac{r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}}{c}\right) \quad (21)$$

aus inverser Fourier-Transformation (angedeutet mit dem Operator $\bullet\!\!\!-\!\!\circ$). Dies liefert den um $\tau_{\text{Delay}} = \frac{r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_0}}{c}$ verzögerten Dirac-Impuls $\delta(t)$. Es handelt sich somit um eine Verzögerung (*delay*) und bildet die von der Schallgeschwindigkeit c abhängige Laufzeit des Schalls von der virtuellen Quelle bei \mathbf{x}_0 zum jeweilig betrachteten Lautsprecher bei \mathbf{x} ab. Aus den Glgn. (15), (16) sind nun noch die $j\frac{\omega}{c}$ -abhängigen Terme

$$H_{3D,\text{Pre}}(\omega) = j\frac{\omega}{c} \bullet\!\!\!-\!\!\circ h_{3D,\text{Pre}}(t) \quad (22)$$

$$H_{2.5D,\text{Pre}}(\omega) = \frac{j\frac{\omega}{c}}{\sqrt{j\frac{\omega}{c}}} = \sqrt{j\frac{\omega}{c}} \bullet\!\!\!-\!\!\circ h_{2.5D,\text{Pre}}(t) \quad (23)$$

für den 3D- bzw. 2.5D-Fall zu diskutieren. Diese Frequenzgänge beschreiben Hochpässe, die den inhärenten spektralen Tiefpasscharakter der Hüllfläche bzw. -kontur kompensieren. Im 3D-Fall hat der kompensierende Hochpass eine Flanke von +6 dB/Oktave mit +90° konstantem Phasenverlauf, im 2.5D-Fall hat das kompensierende Filter eine Flanke von +3 dB/Oktave mit +45° konstanter Phase. Da die Hochpassfilter in den Glgn. (22), (23) unabhängig von der virtuellen Quelle sind, erscheint es ganz vernünftig, das Audio-Eingangssignal $a(t)$ damit vorzufiltrieren – dies führt auf den oft benutzten, englischen Begriff *WFS pre-filtering* – und erst danach die lautsprecherindividuellen Verzögerungen und Gewichte auf das vorgefilterte Signal anzuwenden. Abb. 8 verdeutlicht die beschriebenen Verarbeitungsschritte in einem Signalflussgraphen.

Das Schallfeld – genauer die räumliche Ausbreitung der Wellenfront über die Zeit – einer virtuellen Quelle mit der Ansteuerung des Audiosignals $a(t) \circ\!\!\!-\!\!\bullet A(\omega)$ wird mittels der WFS also synthetisiert, indem die lautsprecherindividuelle Faltung $a(t) *_t d(t)$ (elektrische Ansteuerung) realisiert wird und sich die ausbreitenden Schallfelder der Lautsprecher zur gewünschten Wellenfront überlagern (akustisches Resultat). In der Praxis wird die Faltung $a(t) *_t d(t)$, wie oben diskutiert, oft aufgeteilt in Hochpassfilter, Delay und Gain.

IV. SIMULATIONEN FÜR DIE WFS EINER VIRTUELLEN PUNKTQUELLE

In diesem Abschnitt illustrieren Ergebnisse von numerischen Simulationen die Funktionsweise und die wichtigsten Eigenschaften von 2.5D-WFS, vgl. [10], [12], [14], [42]. Die Simulationen beruhen auf dem obigen Formelapparat für 2.5D-WFS und können z.B. mit der Sound Field Synthesis Toolbox [76]² oder der Referenzimplementierung zu diesem Kapitel³ nachvollzogen und durchgeführt werden. Für alle folgenden Simulationen ist die Schallgeschwindigkeit $c = 343 \text{ m/s}$. Zunächst werden monofrequente Schallfelder in den Abb. 9 bis 14, und anschließend impulsartige Schallfelder im Zeit- und Frequenzbereich in den Abb. 15 bis 18 diskutiert.

²<https://github.com/sfstoolbox>

³https://github.com/spatialaudio/wfs_chapter_hda

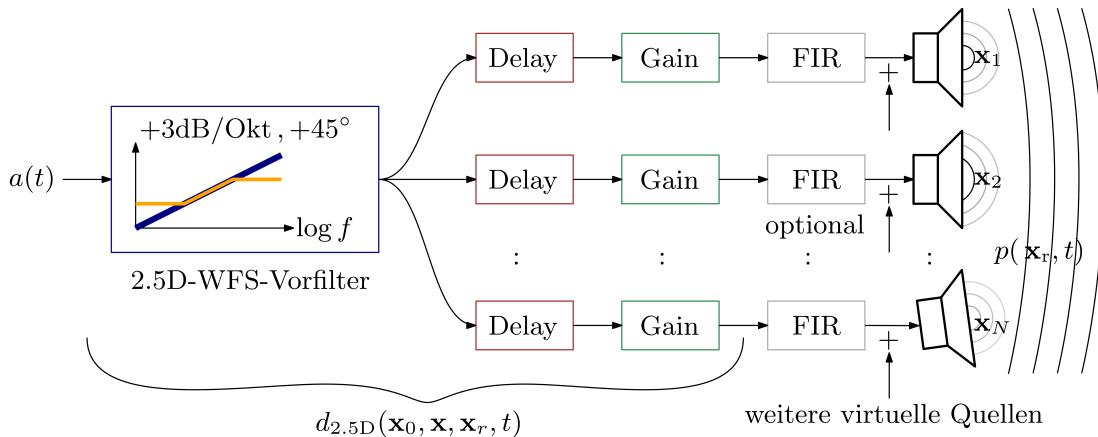


Abbildung 8. Signalfluss von Audiosignal $a(t)$ zu Schalldruck $p(\mathbf{x}_r, t)$ für die modellbasierte 2.5D-WFS. Das Audio-Eingangssignal $a(t)$ wird zunächst mit dem sogenannten 2.5D-WFS-Vorfilter gefiltert. Danach folgen lautsprecherindividuelle Delay und Gain $\gamma_{2.5D}$, welche sich aus der Parametrik der virtuellen Quelle und Array-Geometrie ergeben, siehe Treiberfunktion im Zeitbereich in Glg. (18). Die akustische Superposition von komplexe gewichteten, akustischen Übertragungsfunktionen $G(r_{\mathbf{x}-\mathbf{x}_r})$ führt zum Schalldruck $p(\mathbf{x}_r, t)$. Optionale Schallfeldoptimierung erfolgt typisch mit lautsprecherindividuellen FIR-Filtern. Die Superposition von Ansteuerungssignalen erlaubt die Synthese mehrerer virtueller Quellen gleichzeitig. CC BY 4.0 Frank Schultz, Nara Hahn

A. Nah-/Fernfeld vs. Wellenfront-/Abstrahlsynthese

Vorangestellt sei noch, dass sich die folgende Diskussion des Konzepts der Fraunhofer- bzw. Fresnel-Region [51, Kap. 26] bedient: Interferenzeffekte sind an verschiedenen Empfängerpunkten näherungsweise analytisch zugänglich und damit aus Formeln heraus interpretierbar. Das Konzept wird hier stark vereinfacht benutzt und die Fraunhofer-Region mit dem Fernfeld bzw. die Fresnel-Region mit dem Nahfeld endlicher Lautsprecherarrays gleichgesetzt. Für eine endlich große Quelle mit größter Abmessung l (d.h. die aktive Apertur) befindet sich ein Messpunkt mit Quellenabstand R im Fernfeld, wenn die drei Kriterien a) $R \gg l$, b) $\frac{R}{l} \gg \frac{l}{\lambda}$ und c) $R \gg \lambda$ (ähnlich der oben gemachten Fernfeld-/Hochfrequenznäherung $\frac{\omega_c}{c} R \gg 1$) erfüllt werden, vgl. [77, Kap. 3.5.4]. Würde der Schalldruck um das mit den Treiberfunktionen angesteuerte, endliche Lautsprecherarray auf einer Kugeloberfläche erfasst, würde sich ab einer bestimmten Entfernung – der aus den Bedingungen a) bis c) resultierenden, frequenzabhängigen Nah-/Fernfeldgrenze – eine frequenzabhängige Fernfeldrichtcharakteristik ausprägen, welche in noch weiterer Entfernung vom Array 6 dB-Pegelverlust pro Entfernungsverdopplung verzeichnet.

Bei Schallfeldsynthese wird gezielt Interferenz erzeugt, so dass sich im Nahfeld des Lautsprecherarrays die gewünschte Wellenfrontkrümmung mit charakteristischer Amplitudenabnahme ergibt. Hingegen wird bei Abstrahlsynthese (*beam forming*) gezielt mit Interferenz gearbeitet, um eine gewünschte Fernfeldrichtcharakteristik zu realisieren. Die Wellenfrontkrümmung im Fernfeld einer Quelle ist wegen des 6 dB-Pegelverlustes immer punktquellenartig, auch wenn in einem räumlich begrenzten Bereich in sehr weitem Abstand zur Quelle diese Krümmung verschwindend klein erscheinen kann. Dieser Effekt wird genau bei der Modellierung der virtuellen ebenen Welle mittels einer sehr weit entfernten virtuellen Punktquelle ausgenutzt.

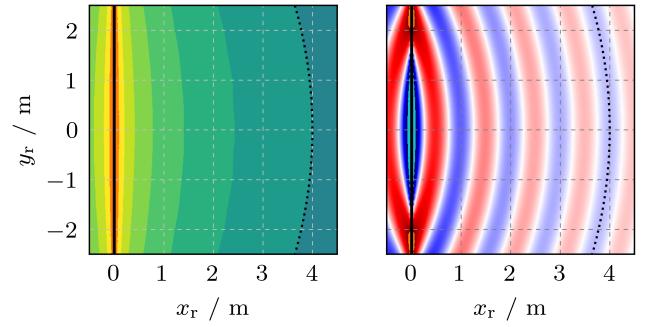


Abbildung 9. 2.5D-WFS einer virtuellen Punktquelle bei $\mathbf{x}_0 = (-5, 0, 0)^T$ m mit einem unendlichen Monopol-Array auf der y -Achse (schwarz) für die Wellenlänge $\lambda = 1$ m. Entlang der Referenzkurve – der gestrichelte, schwarze Kreisbogen – erfolgt eine Amplitudenkorrektur auf Schalldruckamplitude Eins (rechts) bzw. 0 dB-Schalldruckpegel (links). Schallfeld mit deutlich erkennbarer Kugel-Wellenfrontkrümmung und gezeigtem Zeitbezug für einen Schalldruckwert -1 entlang der Referenzkurve. Farbskalierung wie in Abb. 3. CC BY 4.0 Frank Schultz, Nara Hahn

B. Monofrequentes Schallfeld

Abb. 9 zeigt die 2.5D-WFS einer virtuellen Punktquelle mit sekundären Monopolquellen infinitesimalen Abstands entlang einer unendlich langen Linie auf der y -Achse. Amplitudenkorrekte Synthese ergibt sich entlang des eingezeichneten Kreisbogens, der den Punkt $\mathbf{x}_r = (4, 0, 0)^T$ m schneidet. Die Wellenfrontkrümmung einer Punktquelle ist ersichtlich. Da für das unendlich lange Array kein Nah-/Fernfeldübergang existiert, bleibt die gewünschte Wellenfrontkrümmung der virtuellen Quelle über alle Entferungen erhalten. Die für 2.5D-WFS charakteristische Schalldruckamplitudenabnahme kann mit Glg. (13) quantitativ für ein Punktpaar stationärer Phase beschrieben werden. Wenn Schalldrücke und Pegel jenseits der pegelrichtigen Referenzkurve von Interesse sind, muss diese nichtlineare Funktion bezüglich \mathbf{x} , \mathbf{x}_r und der Primärquellenposition \mathbf{x}_0 (welche die Wellenfrontkrümmung beeinflusst) analysiert werden, vgl. [16], [31], [42]. Dies ist in der 2.5D-WFS-Praxis (bzw. allgemeingültig für alle 2.5D-

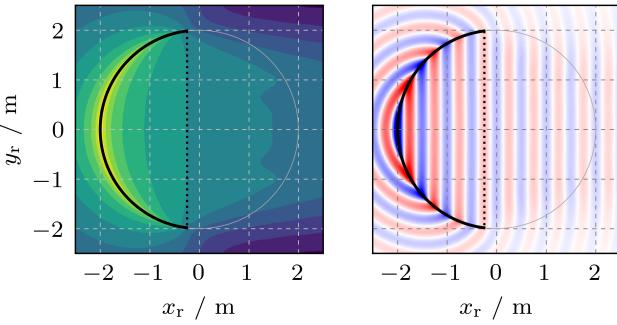


Abbildung 10. 2.5D-WFS einer virtuellen Punktquelle bei $x_0 = (-100, 0, 0)^T$ m mit einem 2m-Radius-Kreisarray (aktiv beitragende Monopole in schwarz, vgl. (14)) für die Wellenlänge $\lambda = \frac{1}{2}$ m. Entlang der Referenzkurve – hier die gestrichelte schwarze Linie bei $x = -\frac{1}{4}$ m – erfolgt eine Amplitudenkorrektur auf Schalldruckamplitude Eins bzw. 0 dB-Schalldruckpegel. Schallfeld, mit im Zuhörerbereich verschwindender Wellenfrontkrümmung, visualisiert für einen Zeitpunkt bei dem Schalldruckwert +1 entlang der Referenzlinie vorliegt. CC BY 4.0 Frank Schultz, Nara Hahn

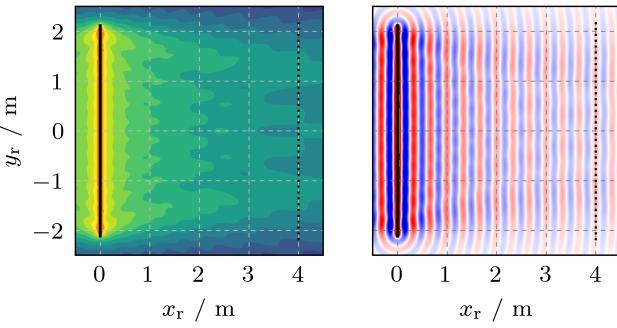


Abbildung 11. 2.5D-WFS einer virtuellen Punktquelle bei $x_0 = (-100, 0, 0)^T$ m mit endlichem, kontinuierlichen Monopol-Array entlang der y -Achse für die Wellenlänge $\lambda = \frac{1}{3}$ m. Amplitudenkorrektur auf 0 dB-Pegel entlang der schwarz-gestrichelten Referenzlinie bei $x = 4$ m. Beugung an einem endlichen Array: Wellen mit anderen Laufrichtungen beeinträchtigen die gewünschte ebene Wellenfront im Nahfeld des Arrays. Im Fernfeld des Arrays bildet sich die linke Richtcharakteristik in Abb. 12 aus. CC BY 4.0 Frank Schultz, Nara Hahn

Schallfeldsyntheseverfahren) vor allem dann relevant, wenn mehrere virtuelle Quellen gleichzeitig und näherungsweise pegelrichtig für einen größeren Zuhörerbereich synthetisiert werden sollen.

In Abb. 10 wird ein kreisförmiges, kontinuierliches Monopol-Array benutzt. 2.5D-WFS einer ebenen Wellenfront – also eine Welle mit verschwindender Wellenfrontkrümmung innerhalb der Zuhörerfläche – wurde mit einer sehr weit entfernten virtuellen Punktquelle angenähert. Amplitudenkorrekte Synthese erfolgt für Abb. 10 auf der Linie bei $x = -\frac{1}{4}$ m. Für alle anderen Empfängerpunkte gilt wieder die in 2.5D-WFS charakteristische Schalldruckamplitudenabnahme im Nahfeld des Arrays. Im frequenzabhängigen Fernfeld des Arrays geht die ebene Wellenfrontkrümmung (virtuelle Quelle) in die einer Punktquelle (Lautsprecherarray) über, einhergehend mit 6 dB-Pegelverlust pro Entfernungsverdopplung.

In Abb. 11 ist die 2.5D-WFS einer ebenen Wellenfront mit einem linearen, auf der y -Achse liegenden, endlichen Monopol-Array visualisiert. Die ebene Wellenfront weist wegen frequenzabhängiger Beugung Artefakte auf. Diese lassen

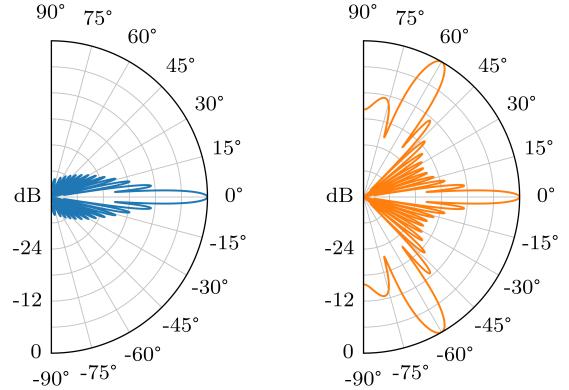


Abbildung 12. Fernfeldrichtcharakteristiken für Wellenlänge $\lambda = \frac{1}{3}$ m, $\frac{2\pi}{\lambda} L \approx 79,807$ und gleicher virtueller Primärquelle, aber verschiedene Sekundärquellenverteilungen. Links, blau für Abb. 11 und rechts, orange für Abb. 13. Das Szenario aus Abb. 11 erzeugt im Fernfeld eine 0°-Hauptkeule (*main lobe*) und viele Nebenkeulen (*side lobes*). Das Szenario aus Abb. 13 erzeugt im Fernfeld zusätzlich zur 0°-Hauptkeule für die gewählte Wellenlänge zwei etwas breitere Gitterkeulen (*grating lobes*) bei exakt $\pm 60^\circ$ mit gleichem Pegel, sowie viele Nebenkeulen. Gitterkeulen stehen in Verbindung zu räumlichem Aliasing, Nebenkeulen zu Beugung. CC BY 4.0 Frank Schultz, Nara Hahn

sich anschaulich mit der in Abb. 12 (links) dargestellten Fernfeldrichtcharakteristik der gewählten Frequenz erklären. Nebenkeulen korrespondieren mit Wellenfronten im Nahfeld, welche die im Polardiagramm indizierten – im Vergleich zur 0°-Hauptrichtung der ebenen Wellenfront – anderen Abstrahlrichtungen aufweisen. Die Wellenfronten interferieren und erzeugen so die Beugungsartefakte. Die Pegel der Nebenkeulen und damit die Beugungsartefakte lassen sich durch sogenanntes *tapering* bzw. *gain shading*, vgl. [11], [14], verringern. Dies geht jedoch immer zu Kosten einer breiteren Hauptkeule im Fernfeld (vgl. kompromissbehaftet Fensterdesign in der Signalverarbeitung, [77, Kap. 3.5], [78]) und wirkt sich daher im Nahfeld auch auf die gewünschte 0°-Wellenfront aus.

In Abb. 13 ist die 2.5D-WFS einer ebenen Wellenfront mit einem endlichen, linearen Monopol-Array entlang der y -Achse visualisiert. Die Arraylänge $L \approx 4,234$ m und die Wellenlänge $\lambda = \frac{1}{3}$ m sind gleich gewählt wie bei Abb. 11. Nun aber weisen die sekundären Monopole einen Abstand von $\Delta_x \approx 0,3849$ m auf; das Array ist räumlich diskretisiert. Für dieses Szenario treten neben Beugungsartefakten zusätzlich frequenzabhängige Artefakte auf, welche auf den endlichen Abstand der Sekundärquellen zurückzuführen sind. Diese Artefakte sind bekannt als räumliches Aliasing und beeinträchtigen die gewünschte Wellenfront deutlich ausgeprägter als Beugung. Gemäß des räumlichen Abtastkriteriums, vgl. [51, Kap. 26.4], wird räumliches Aliasing in der Wellenfront vollständig vermieden, wenn für die höchste im Ansteuerungssignal vorkommende Frequenz f_{\max} der hüllkonturspezifische Abstand Δ_x

$$\Delta_x < \frac{c}{2f_{\max}} \leftrightarrow \Delta_x < \frac{\lambda_{\min}}{2} \quad (24)$$

zwischen zwei Lautsprechern eingehalten wird, vgl. [79, S. 246], [48, Kap. 4]. Im Falle eines linearen Arrays entspricht Δ_x direkt dem Lautsprecherabstand. Für konvexe

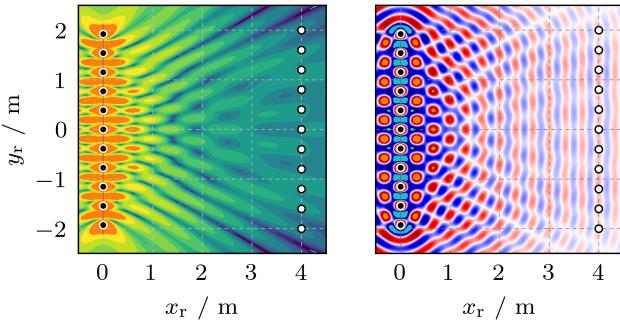


Abbildung 13. 2.5D-WFS einer virtuellen Punktquelle bei $x_0 = (-100, 0, 0)^T$ m mit 11 Monopolen entlang der y -Achse (schwarze Punkte, Abstand $\Delta_x \approx 0,3849$ m) für die Wellenlänge $\lambda = \frac{1}{3}$ m. 2.5D-WFS-Amplitudenkorrektur auf 0 dB-Pegel entlang der Referenzlinie bei $x = 4$ m. Die 11 weißen Punkte auf dieser bilden mit den 11 Monopolen jeweils ein Punktpaar mit stationärer Phasenbedingung. Zusätzlich zur Beugung tritt räumliches Aliasing wegen zu großem Lautsprecherabstand Δ_x auf: vor allem die Wellenanteile mit hohem Pegel und Ausbreitungsrichtungen um $\pm 60^\circ$ beeinträchtigen die gewünschte ebene 0° -Wellenfront im Nahfeld des Arrays. Im Fernfeld des Arrays bildet sich die Richtcharakteristik Abb. 12 (rechts) aus. CC BY 4.0 Frank Schultz, Nara Hahn

Arrays gilt dieses harte Kriterium als sehr gute Näherung; im Fall des dichtbepackten Kreisarrays kann die Kreisbogenlänge zwischen zwei benachbarten Lautsprechern für Δ_x verwendet werden. Für die oberen 3–4 Oktaven des menschlichen Hörvermögens bedingt die Glg. (24) erheblichen Hardwareaufwand wegen der erforderlichen sehr kleinen Lautsprecherabstände. Bei praxisnahen WFS-Systemen mit typischen Lautsprecherabständen zwischen 0,1 … 0,25 m tritt räumliches Aliasing bei Frequenzen oberhalb 1715 … 686 Hz auf. Im Beispiel von Abb. 13 wird die Glg. (24) wegen $\Delta_x \approx 0,3849$ m > $\frac{\lambda}{2} = \frac{1}{6}$ m verletzt. Artefakte von räumlichem Aliasing entstehen durch Wellenfronten anderer Ausbreitungsrichtungen, die mit der gewünschten, hier ebenen 0° -Wellenfront interferieren. Die frequenzabhängige Anzahl und Ausbreitungsrichtung(en) der Aliasing-Wellenfronten, vgl. [10], [14], [48], [79], lässt sich u.a. aus der Fernfeldrichtcharakteristik in Abb. 12 (rechts) bestimmen. Im Beispiel sind es die beiden sogenannten Gitterkeulen bei exakt $\pm 60^\circ$, welche bei Benutzung von omnidiagonal abstrahlenden Monopol-Sekundärquellen den gleichen Pegel wie die 0° -Hauptkeule aufweisen. Das Schallfeld ist im Nahfeld erst in einiger Entfernung zum endlichen Array näherungsweise aliasing-frei, im Beispiel gilt das bei der gewählten Frequenz grob jenseits der Referenzlinie bei $x = 4$ m mittig vor dem Array.

In Abb. 14 ist ein weiteres aliasing-behaftetes Schallfeld dargestellt, bedingt durch ein räumlich diskretisiertes, kreisförmiges Array. Für den gewählten Radius ist die Verwendung von 32 bis 64 Lautsprechern praxisnah. Für die gewünschte gekrümmte Wellenfront einer virtuellen Punktquelle ist räumliches Aliasing rechts der gewählten Kreisbogen-Referenzkurve bei der gewählten Frequenz annähernd vernachlässigbar. Für die betrachtete Frequenz enthält das Schallfeld links der Referenzkurve, also näher an den aktiven Monopolen, deutlich Aliasingartefakte.

Während sich für planare, lineare, sphärische und zirkuläre Arrays die Entstehung räumlichen Aliasings mittels

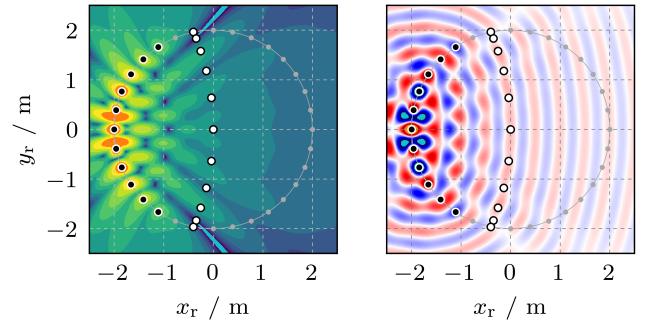


Abbildung 14. 2.5D-WFS einer virtuellen Punktquelle bei $x_0 = (-5, 0, 0)^T$ m mit 32 äquiangular verteilten Monopolen auf einem 2 m-Radius-Kreisarray für die Wellenlänge $\lambda = \frac{1}{2}$ m. 2.5D-WFS-Amplitudenkorrektur auf 0 dB-Pegel entlang des mittigen Kreisbogens. Die 11 weißen Punkte auf diesem Kreisbogen bilden mit den 11 aktiven Monopolen (schwarze Punkte) jeweils ein Punktpaar mit stationärer Phasenbedingung. Bei der, zur sinnvollen Veranschaulichung, gewählten Frequenz gilt speziell, dass im linken bzw. rechten Teil der kreisförmigen Zuhörerfläche viel bzw. wenig Aliasingartefakte die gewünschte Wellenfront beeinträchtigen. CC BY 4.0 Frank Schultz, Nara Hahn

räumlicher Fourier-Transformation vergleichsweise bequem studieren lässt, vgl. [14], [39]–[41], [65], ist vor allem für kompliziertere Geometrien und damit einhergehend fehlender analytischer Lösungen ein akustisches Strahlenmodell nützlich, vgl. [48]. Dies kann vorteilhaft genutzt werden, um aliasingfreie Zonen über einen großen Frequenzbereich näherungsweise zu prädizieren ohne aufwändige Simulationen von Schallfeldern und Richtcharakteristiken durchführen zu müssen.

C. Impulsartiges Schallfeld

Die Abb. 15 bis 18 zeigen wie sich die 2.5D-WFS bei impulsivem Audiosignal-Anregung unter Benutzung des theoretischen WFS-Vorfilters in Glg. (23) verhält. Die virtuelle Punktquelle wird zum Zeitpunkt $t = 0$ s mit einem auf 15 kHz tiefpassbegrenzten, zeitlichen Dirac-Impuls angeregt, welcher sich im Freifeld räumlich mit Schallgeschwindigkeit $c = 343$ m/s auf eine immer größer werdende Kugelfläche ausbreitet, also ein Monopol-Schallfeld mit 15 kHz-Bandbreite darstellt. Für die Synthese dieser 3D-Wellenfront mit einem räumlich diskretisierten 2D-Array und der 2.5D-Filter-Impulsantwort in Glg. (18) sind ähnliche Artefakte wie bei monofrequenter Ansteuerung zu erwarten: a) 2.5D charakteristische Amplitudenabnahme über den Ausbreitungsweg, b) frequenzabhängiger Nah-/Fernfeldübergang und c) frequenzabhängiges räumliches Aliasing. Abb. 15 bis 18 zeigen jeweils rechts die impulsiven Wellenfronten in der xy -Ebene zu einem bestimmten Ausbreitungszeitpunkt, jeweils links/oben die Antwort des akustischen Systems auf den tiefpassbegrenzten, zeitlichen Eingangsimpuls, die mit einem Messmikrofon am Aufpunkt \times gemessen würde und jeweils links/unten den zugehörigen Frequenzgang.

Abb. 15 zeigt das Ergebnis einer Simulation mit einem kontinuierlichen Kreisarray. Es treten daher nur die Artefakte der Punkte a) und b) auf. Für den Frequenzbereich $100 \text{ Hz} < f < 15 \text{ kHz}$ wird eine nahezu perfekte Wellenfront synthetisiert. Zum dargestellten Zeitpunkt ist die Wellenfront koinzident mit

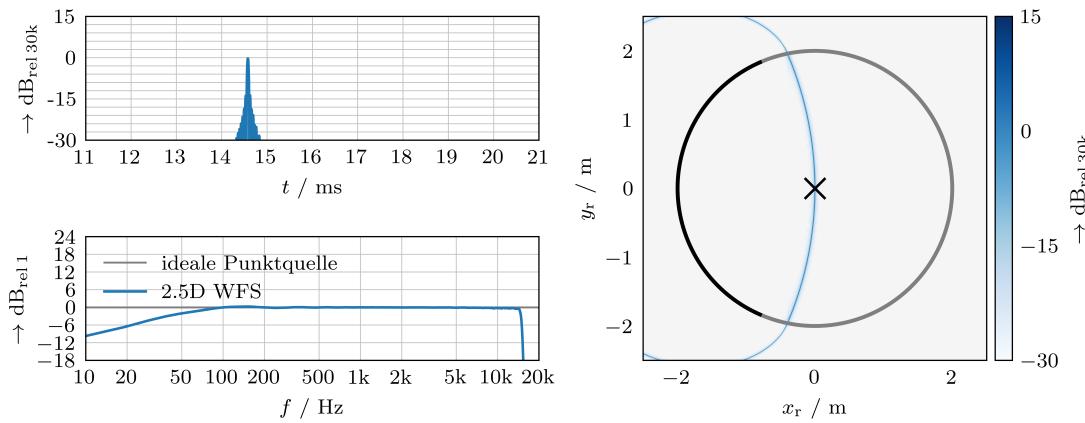


Abbildung 15. 2.5D-WFS-Schallfeld bei impulschafter Anregung zum Zeitpunkt $t = 0$ s (rechts) für das Szenario aus Abb. 14, allerdings hier mit kontinuierlichem Kreisarray, aktiver Teil des Arrays in schwarz, inaktiver Teil in grau. Hier und in Abb. 16 bis 18 gilt für die rechte Grafik des impulschaften Schallfelds: Pegel $> +15$ dB erfahren eine Farbsättigung mit schwarz, Pegel < -30 dB hingegen mit grau. Der dargestellte Zeitpunkt $t \approx 14,578$ ms entspricht der Schallausbreitungszeit der virtuellen Punktquelle zum Messpunkt \times bei $\boldsymbol{x}_r = (0, 0, 0)^T$ m für die Schallgeschwindigkeit $c = 343$ m/s. Akustische Impulsantwort (links, oben) und Frequenzgang (links, unten) am Messpunkt \times . Die perfekt synthetisierte Wellenfront ist koinzident mit der Referenzkurve, daher im Frequenzgang gewünschter 0 dB-Referenzpegel zwischen ca. 100 Hz und 15 kHz. Impulsspezifischer Pegel in $\text{dB}_{\text{rel} 30k}$ relativ zum endlichen Amplitudenwert 30.000 des zeitkontinuierlichen, 15 kHz-tiefpassbegrenzten Anregeimpulses. CC BY 4.0 Frank Schultz, Nara Hahn

der gewählten Referenzkurve. Der Frequenzgang entspricht daher dem gewünschten 0 dB-Referenzpegel in diesem Frequenzbereich. Unterhalb 100 Hz tritt Hochpassverhalten auf. In diesem Beispiel sind dafür zwei Aspekte konfundiert verantwortlich. Zum einen sind für kleiner werdende Frequenzen die zugehörigen Wellenlängen zunehmend größer als die Apertur. Das Array bietet für diese Wellenlängen keine Kontrolle von Interferenz in einem ausgedehnten Nahfeld, es strahlt in vergleichsweise naher Entfernung schon ins Fernfeld ab. Zum anderen gilt die Fernfeld-/Hochfrequenznäherung $\frac{\omega}{c} r_{\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}_r} \gg 1$ für die tiefen Frequenzen und den gewählten Aufpunkt nicht. Es ist also zu erwarten, dass die tatsächliche physikalische Synthese von der gewünschten WFS-Lösung abweicht.

Abb. 16 bis 18 entsprechen dem Szenario aus Abb. 14, d.h. einem räumlich diskretisierten Kreisarray mit 32 Monopolen. Durch die räumliche Diskretisierung des Arrays entstehen für $f > f_{\max}$ räumliche Aliasingartefakte, die in den drei Darstellungen unterschiedlich repräsentiert werden: entweder als nicht geschlossene Wellenfront bzw. als eine Wellenfronteinheit (rechts), als zeitliche Folge von Impulsen (links/oben, im Folgenden wegen der Tiefpassbegrenzung technisch zwar ungenau aber wesentlich korrekt als Impulsantwort bezeichnet) oder als hochfrequente Frequenzgangsverzerrungen (links/unten).

Insgesamt sind wie auch in Abb. 14 elf Monopole, die Lautsprecher (LS) 12–22, gemäß des *secondary source selection criterion* nach Glg. (14) an der Synthese beteiligt und definieren die Apertur. Die anderen Lautsprecher werden für die gewählte Parametrik der virtuellen Quelle nicht benötigt und daher nicht angesteuert. In den Impulsantworten dieses 2.5D-WFS-Szenarios lässt sich immer eine Abfolge von sechs Impulsen in der Impulsantwort erkennen. Der erste stammt von LS 17. Dieser befindet sich auf der x -Achse in Linie mit der Primärquellenposition und allen drei gezeigten Messpunkten, ist für diese also genau der Monopol mit stationärer Phasenbedingung und weist die kürzeste Distanz

zur virtuellen Quelle auf. Es folgen zeitlich fünf Impulse nach, die den, wegen des Delays in der Treiberfunktion, verzögert spielenden Monopolen zuordenbar sind. Der zweite Impuls wird demzufolge von den LS 16 und 18 zu exakt gleichen Anteilen erzeugt und hat höhere Amplitude als der Erstimpuls. Der letzte Impuls stammt entsprechend von LS 12 und 22. Diese paarweise Koinzidenz entsteht durch die gewählte Geometrie: das Array ist symmetrisch zur x_r -Achse, auf der wie erwähnt auch die Primärquelle und die Messpunkte positioniert sind. Das sechsfach Impulsmuster ist also für alle Messpunkte auf der horizontalen Symmetriearchse gleich, allerdings ändern sich über die Entfernung vom aktiven Array die relativen Zeitbezüge der Impulse. Der Erstimpuls hingegen lässt sich zeitlich immer exakt bezüglich der Schallgeschwindigkeit c und Position der virtuellen Punktquelle verorten. Die resultierenden, zeitlich nichtkompakten Impulsantworten repräsentieren räumliches Aliasing im Zeitbereich.

Räumliches Aliasing aus Sicht der zugehörigen Spektren offenbart hochfrequent stark positionsabhängige Abweichungen vom gewünschten linearen Frequenzgang. Das für ein Kreisarray näherungsweise geltende Kriterium nach Glg. (24) zur vollständigen Vermeidung von Aliasing führt mit der Kreisbogenlänge $\Delta_x = 0,3927$ m zur Grenzfrequenz $f_{\max} = \frac{c}{2\Delta_x} \approx 437$ Hz, oberhalb derer Aliasingartefakte im Frequenzgang zu erwarten sind. Tatsächlich ist die Frequenz f_{al} ab der Aliasing auftritt, vom Messpunkt und der Arraygeometrie abhängig, und kann $f_{\text{al}} > f_{\max}$, aber niemals $f_{\text{al}} < f_{\max}$ sein. Dies lässt sich verknüpfen mit der obigen Beobachtung: das Schallfeld weist für mittig vom Array entfernte Messpunkte (höhere f_{al}) geringere Aliasingartefakte auf, als näherte Messpunkte (niedrigere f_{al}). Charakteristisch für Aliasingartefakte im Frequenzgang sind a) zahlreiche Anti-Resonanzen (Notches) und Resonanzen, deren spektrale Lage von der Messposition abhängt und b) eine steigende Flanke mit +3 dB/Oktave, vgl. [42]. Dies wird typisch als Klangverfärbung (*colouration*) wahrgenommen, vgl. [14], [30], [46],

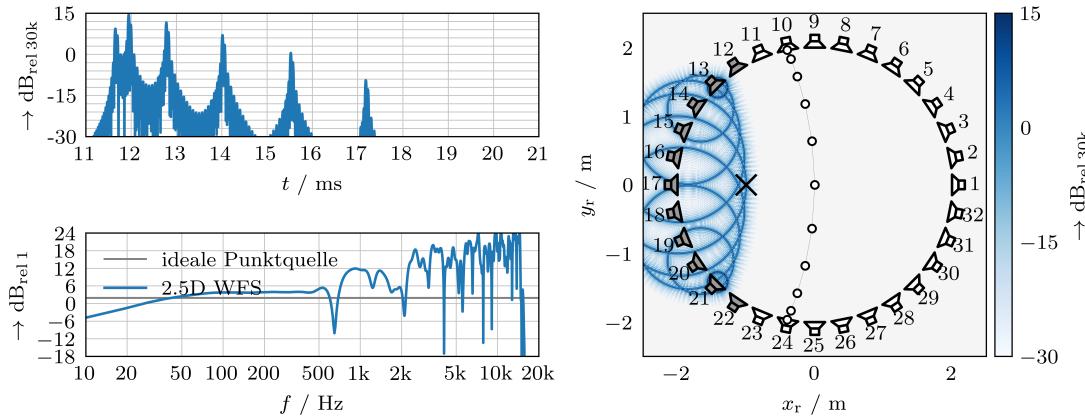


Abbildung 16. 2.5D-WFS-Schallfeld (rechts) bei impulschafter Anregung zu $t = 0$ s für das Szenario aus Abb. 14. Pegelreferenzkurve als Kreisbogen durch $\boldsymbol{x}_r = (0,0,0)^T$ m (rechts). Dargestellter Zeitpunkt $t \approx 11,662$ ms bei Schallgeschwindigkeit $c = 343$ m/s entspricht der Wellenlaufzeit der virtuellen Punktquelle zum Messpunkt \times bei $\boldsymbol{x}_r = (-1,0,0)^T$ m. Akustische Impulsantwort (links, oben) und Frequenzgang (links, unten) vom Messpunkt \times . CC BY 4.0 Frank Schultz, Nara Hahn

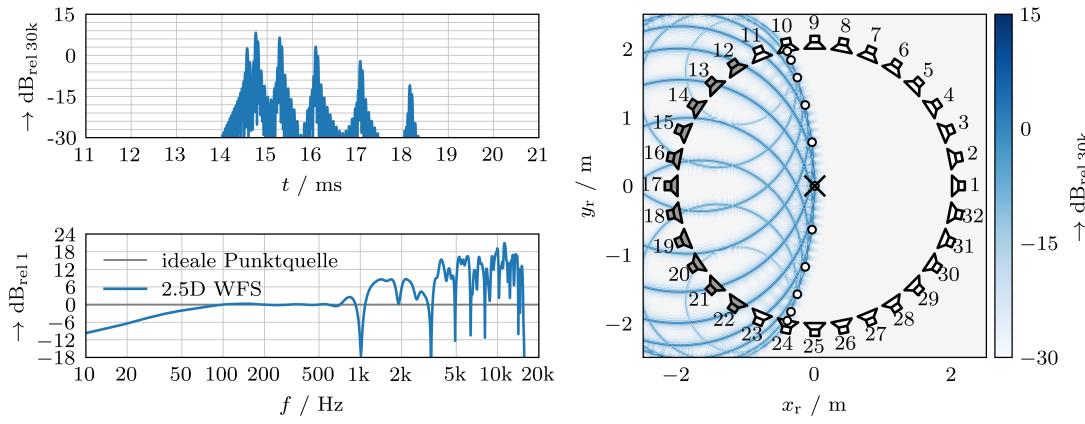


Abbildung 17. 2.5D-WFS-Schallfeld ähnlich Abb. 16 für Zeitpunkt $t \approx 14,578$ ms, Messpunkt \times bei $\boldsymbol{x}_r = (0,0,0)^T$ m. Wellenfront ist koinzident mit der Pegelreferenzkurve, daher im Frequenzgang gewünschter (aliasing-freier) 0 dB-Referenzpegel zwischen ca. 100 und 600 Hz. CC BY 4.0 Frank Schultz, Nara Hahn

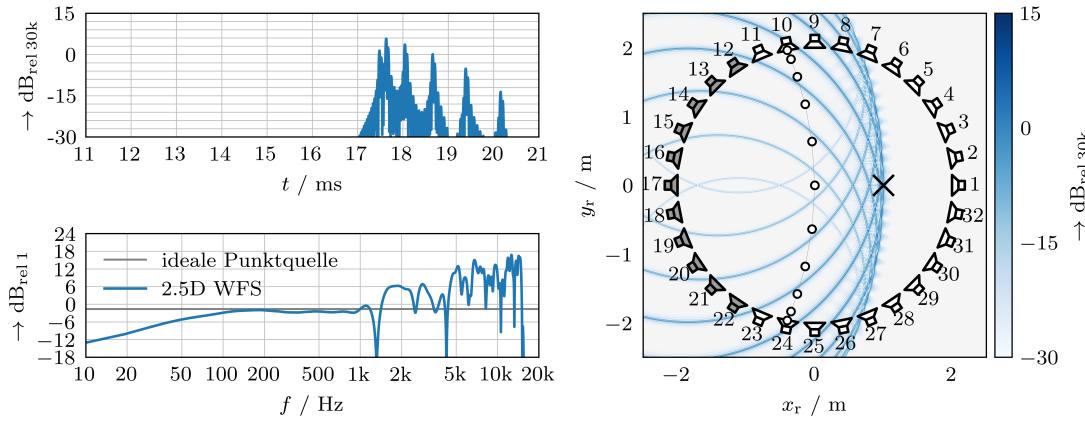


Abbildung 18. 2.5D-WFS-Schallfeld ähnlich Abb. 16 für Zeitpunkt $t \approx 17,493$ ms, Messpunkt \times bei $\boldsymbol{x}_r = (1,0,0)^T$ m. CC BY 4.0 Frank Schultz, Nara Hahn

[48], [49]. Es wird speziell dann sehr deutlich als sogenanntes Phasing wahrgenommen, wenn sich der Frequenzgang über die Zeit sehr stark ändert, etwa weil sich virtuelle Quelle und/oder Zuhörende (schnell) bewegen. Der Frequenzgang der drei Bei-

spiele ist zwischen ca. 100 und 600 Hz annähernd linear und variiert über die Messpunkte mit der charakteristischen 2.5D-Amplitudenabnahme der virtuellen Punktquelle bezogen auf den 0 dB-Referenzpegel in Abb. 17. Das Hochpassverhalten

unterhalb 100 Hz wurde bereits für Abb. 15 beim kontinuierlichen Array diskutiert, es sind die selben Phänomene.

Die durch räumliches Aliasing entstehenden starken Frequenzgangsverzerrungen sollten im perzeptiven Kontext relativiert werden. Ein 2.5D-WFS System mit praktikablem 17 cm-Lautsprecherabstand wurde beispielsweise weniger klangverfärbend wahrgenommen als Off-Center Stereo-Wiedergabe; und bei Sprache führen dieses WFS-Setup und On-Center Stereo-Wiedergabe zur ungefähr gleich wahrgenommenen Klangverfärbung [46]. Für breitbandige Signale, die vergleichsweise viel räumliches Aliasing anregen, führen Raumreflexionen zur Glättung des Frequenzgangs, was verglichen mit dem Freifeldfall perzeptiv in gutmütiger *decolouration* münden kann [49].

Räumliches Aliasing aus Sicht der Wellenfront ist anschaulich in Abb. 16 bis 18 (jeweils rechts) dargestellt. Die gewünschte Wellenfrontkrümmung wird korrekt synthetisiert, jedoch wird die Wellenfront nur als Einhüllende abzählbarer Impuls-Wellenfronten erzeugt. Diese Impuls-Wellenfronten korrespondieren, wenn sie an den entsprechenden Messpunkten ankommen, exakt mit den Einzelimpulsen in den Impulsantworten.

Die Lokalisation von virtuellen Quellen synthetisiert mit WFS erfolgt vergleichsweise robust [14], [31], [45], [46], [49] was mit dem Gesetz der ersten Wellenfront [80] erklärbar ist. In den diskutierten Beispielen eilt der Schall von LS 17 zeitlich immer voraus. Es gibt für alle Empfängerpunkte auf der Horizontalachse x_r keinen anderen Lautsprecher der näher zur virtuellen Punktquelle ist. Später spielende Lautsprecher und Raumreflexionen treffen verzögert zu diesem Erstimpuls am Ohr ein. Zur robusten Beurteilung der virtuellen Schallquellenposition reicht dem menschlichen Hörsinn der initiale Erstimpuls. Diese Analyse führt erst dann zu größeren Lokalisationsfehlern, wenn das Array sehr, sehr große Lücken zwischen den Lautsprechern aufweist und eine einzelne von der virtuellen Schallquellenposition stark abweichende, diskrete Lautsprecherposition für die maßgebliche Erzeugung des ersteintreffenden Impulses verantwortlich ist. Das WFS-Array ist in solch einem Fall mutmaßlich so dünn besetzt (vgl. *sparse array*), dass nicht mehr von Synthese einer geschlossenen Wellenfront gesprochen werden sollte. Die resultierenden Frequenzgangsverzerrungen führen zu psychoakustischen Effekten (z.B. Phantomschallquelle [80]), die eher der Stereo- oder LCR-Wiedergabe zuordenbar sind, vgl. [31], [46].

V. PRAXISRELEVANTE MODIFIKATIONEN FÜR 2.5D-WFS

Die 2.5D-WFS-Theorie besagt, dass ein Schallfeld entlang einer Referenzkurve näherungsweise amplitudenkorrekt synthetisiert wird, vgl. Abb. 7. In der Praxis führen frequenzabhängige, räumliche Aliasingartefakte und die frequenzabhängige Nah-/Fernfeldgrenze – und damit frequenzabhängige Beugung – zur Abweichung eines linearen Frequenzgangs wie oben diskutiert, vgl. Abb. 17. Dies ist kein WFS-spezifisches Problem, sondern tritt allgemein bei allen Wiedergabeverfahren auf, welche die physikalische Rekonstruktion von Schallfeldern anstreben. Zur Linearisierung des Frequenzgangs erfolgen typisch Anpassungen an den theo-

retischen Treiberfunktionen, vgl. [21], [42], [81] wovon drei Methoden nun näher diskutiert werden sollen.

A. Anpassung des WFS-Vorfilters

Eine sehr einfache Entzerrungsmethodik, welche bei der impliziten Schallfeldsyntheselösung streng genommen nur einen einzelnen Empfängerpunkt linearisiert, besteht in der Modifikation des globalen WFS-Vorfilters. Dies ist beispielhaft in Abb. 19 gezeigt.

Dafür wurde das 2.5D-WFS-Szenario aus Abb. 14 verwendet, jedoch mit einem Kreisarray mit 64 Monopolen, wovon 23 aktiv sind. Die Kreisbogenlänge zwischen zwei Monopolen beträgt ca. 0,2 m. Der gewählte Messpunkt $x_r = (0, 0, 0)^T$ m liegt auf der Referenzkurve und ist Teil eines Punktpaars stationärer Phase. Im Idealfall ist für diesen Messpunkt also ein linearer 0 dB-Frequenzgang zu erwarten. In der linken Grafik in Abb. 19 ist der resultierende Frequenzgang in blau dargestellt. Er weist zwei charakteristische +3 dB/Oktave Flanken auf. Die tieffrequente Flanke (lila) stellt das bereits diskutierte Hochpassverhalten dar. Die hochfrequente Flanke (rot) entspricht dem mittleren Pegelanstieg durch zunehmende Ausprägung räumlichen Aliasings. Da die charakteristischen (Anti)-Resonanzen stark abhängig von der Messposition sind, lässt sich nur der mittlere Pegelanstieg sinnvoll entzerren.

Die beiden charakteristischen Flanken lassen sich mit gegenläufigen Flanken kompensieren. Die Reihenschaltung des theoretischen WFS-Vorfilters aus der Glg. (23) mit dem Kompensationsfilter ergibt ein für den gewählten Messpunkt adaptiertes WFS-Vorfilter. Es hat die Form eines Shelving-Filters mit +3 dB/Oktave ansteigender Flanke. Das Filter sollte einfach zu parametrisieren sein, da a) das WFS-Setup, b) die Primärquellenparametrik und c) der Messpunkt einen Einfluss auf die untere und obere Flanken-Eckfrequenz haben. Diese sollten sinnvollerweise nach technischen und/oder perzeptiven Optimierungskriterien festgelegt werden. Im Beispiel wurde das Entwurfsverfahren für Shelving-Filter aus [82] verwendet. Die obere Grenzfrequenz $f_o = f_{max} \approx 873$ Hz wurde nach dem Kriterium in Glg. (24) festgelegt. Um den Frequenzgang am Messpunkt tieffrequent auf ≈ 0 dB-Pegel zu kompensieren wurde die untere Grenzfrequenz $f_u = 75$ Hz gewählt. Der Filterfrequenzgang weist im Frequenzbereich $f_u < f < f_o$ die gewünschte +3 dB/Oktave Flanke ähnlich des theoretischen WFS-Vorfilters auf, vgl. Abb. 19 (rechts). Für $f < f_u$ und $f > f_o$ wird der Verlauf des theoretischen WFS-Vorfilters (blau) begrenzt und führt so zum adaptierten Shelving-WFS-Vorfilter (orange). Diese Begrenzung führt zum linearisierten Frequenzgang für den gewählten Messpunkt, links dargestellt in Abb. 19 in orange.

B. WFS mit numerischer Optimierung

Das im vorherigen Unterabschnitt beschriebene Verfahren folgt dem Paradigma Audiosignal-Vorfilterung, Verzögerung und Verstärkung gemäß des Signalflusses in Abb. 8. Es wurden WFS-Adaptionen diskutiert, welche dieses Paradigma zugunsten einer lautsprecherindividuellen Filterung aufgeben. Damit kann das Schallfeld für die jeweils gewünschte akustische Szene optimiert werden, typisch die Minimierung

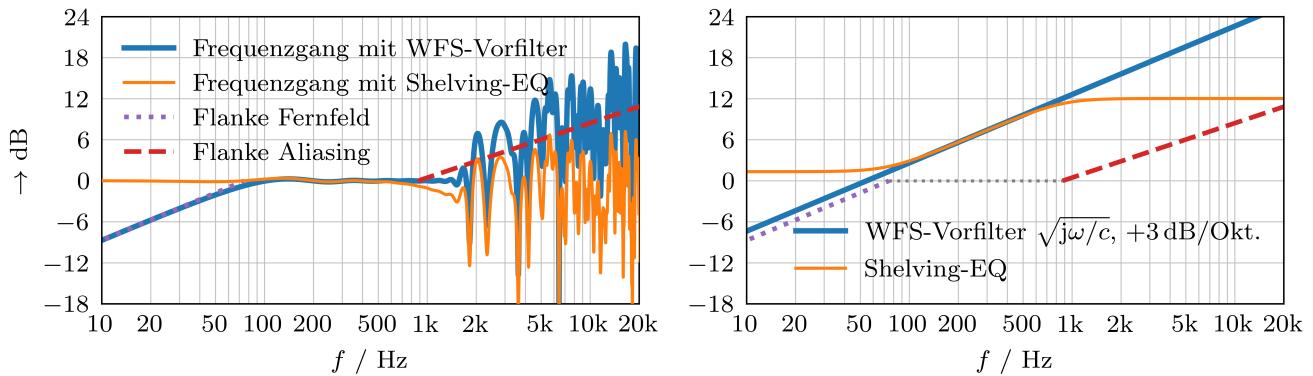


Abbildung 19. 2.5D-WFS-Szenario ähnlich Abb. 14 aber mit Kreisarray bestehend aus 64 Monopolen. Messpunkt $\mathbf{x}_r = (0, 0, 0)^T$ m. Frequenzgang (links, blau) unter Benutzung des theoretischen WFS-Vorfilters $\sqrt{j\omega/c}$ (rechts, blau). Dieser gemessene Frequenzgang weist zwei charakteristische Flanken mit ca. +3 dB/Oktave auf. Die tieffrequente Flanke in lila erklärt sich vor allem durch ein zu wenig ausgeprägtes Nahfeld des Arrays (Apertur kleiner als Wellenlänge). Die hochfrequente Flanke in rot erklärt sich durch den zu großen Abstand der Monopole im Array (räumliches Aliasing). Linearisierter Frequenzgang (links, orange) unter Benutzung eines Shelving-WFS-Vorfilters (rechts, orange). Die Shelving-Plateaus des Filters resultieren in einer tief- bzw. hochfrequenten Anhebung bzw. Absenkung im Vergleich zum theoretischen WFS-Vorfilter. Dies führt zu einer Linearisierung des Frequenzgangs für den gewählten Messpunkt. CC BY 4.0 Frank Schultz, Nara Hahn

von frequenzabhängigen Beugungs- und Aliasingartefakten für einen relevanten – meist groß intendierten – Zuhörerbereich. Erwähnenswert sind hier die numerischen Optimierungen von WFS-Referenzschallfeldern [24], [25], [38]. Diese Methoden erfordern umfangreiche Simulation und/oder Messung der Referenzschallfelder. Pro Lautsprecher wird dann ein zusätzliches Filter mit endlicher Impulsantwort (FIR-Filter) benötigt, damit frequenzabhängig Einfluss auf Delay und Gain genommen werden kann. Im WFS-Signalflussgraphen Abb. 8 ist dieses zusätzliche FIR-Filter optional nachgeschaltet. Erwähnenswert ist, dass die numerische Optimierung von 2.5D-Schallfeldproblemen nicht über physikalisch gesetzte Grenzen hinausgehen kann, d.h. die 2.5D-inhärente Amplitudencharakteristik lässt sich mit Numerik nicht kompensieren, sondern sollte vielmehr Bestandteil des Optimierungsziels sein.

C. Lokale WFS

Die Anwendung von WFS mit Optimierung für einen sehr begrenzten, kleineren Zuhörerbereich wird in der Literatur als sogenannte lokale WFS geführt. Ihr Forschungsschwerpunkt ist die Erzeugung kleiner, aliasing-reduzierter Schallfeldzonen [83], in letzter Zeit vorangetrieben zu (halb)-analytischen Lösungen des lokalen Schallfeldsyntheseproblems vor allem für kreisförmige Lautsprecherarrays [48], [50], [84]. Grundidee der lokalen Verfahren ist eine räumliche Bandbegrenzung der Ansteuerung, was lautsprecherindividuelle FIR-Filterung erfordert, die im Gegensatz zur *secondary source selection* bei WFS alle Lautsprecher betrifft. Abb. 20 und 21 zeigen Ergebnisse des lokalen WFS-Verfahrens nach [50] erneut mit dem Kreisarray aus 32 Lautsprechern auf 2 m Radius. Im jeweilig gewählten Referenzpunkt, d.h. im optimalen Zentrum der für die lokale WFS berücksichtigten Schallfeldzone, wird räumliches Aliasing vollständig vermieden. Die Synthese der impulsartigen, lokal ebenen Wellenfront gelingt in diesem Messpunkt artefaktfrei, weil die Interferenzen exakt auf dieses Ergebnis hin kontrolliert werden, d.h. die räumliche Bandbe-

grenzung ist dafür optimiert. Dies widerspiegelt sowohl die zeitlich kompakte Impulsantwort mit einem symmetrischen Peak zum gewählten Referenzzeitpunkt als auch der lineare Frequenzgang in blau. In unmittelbarer Nähe des Referenzpunktes, z.B. bei den rot dargestellten Messpunkten in 0,3 m Abstand, sind die Interferenzen nicht mehr perfekt zueinander abgestimmt. Daher resultieren Artefakte von räumlichem Aliasing und räumlicher Bandbegrenzung in den roten Frequenzgängen; diese Verzerrungen sind deutlich geringer als bei nicht-lokaler WFS in den Abb. 16 bis 18. Der energetisch gemittelte Frequenzgang in schwarz kann als weitgehend linear aufgefasst werden. Die lokale WFS erzeugt in diesem Beispiel also kopfgrößere, lokale Schallfeldzonen mit vergleichsweise wenig Klangverfärbung.

VI. WERKZEUGE

WFS-Ansteuerungsalgorithmen für objektorientiertes 3D-Audio mit echtzeitfähigem Rendering finden sich unter anderem in den folgenden Software-Projekten

- [85], [86] Derivate der TU Berlin WFS-Software
- [87]
- [88] als VST-Plugin
- [89] für SuperCollider
- [90] für Max
- [91] für WFS-Rendering auf GPUs

Kommerzielle, teils hardware-gebundene Lösungen für WFS sind unter anderem

- [92] Stand-Alone-Software für post production
- [93] für Max
- [94], optionale WFS-Lizenz; Stand-Alone, oder AAX-, AU-, VST-Plugins, oder mit Option für live production, u.a. für Digitalmischpulte
- [95]
- [96] (Verwendung von IRCAM SPAT Algorithmik)
- [97]

mit mutmaßlich proprietären WFS-Algorithmenweiterungen.

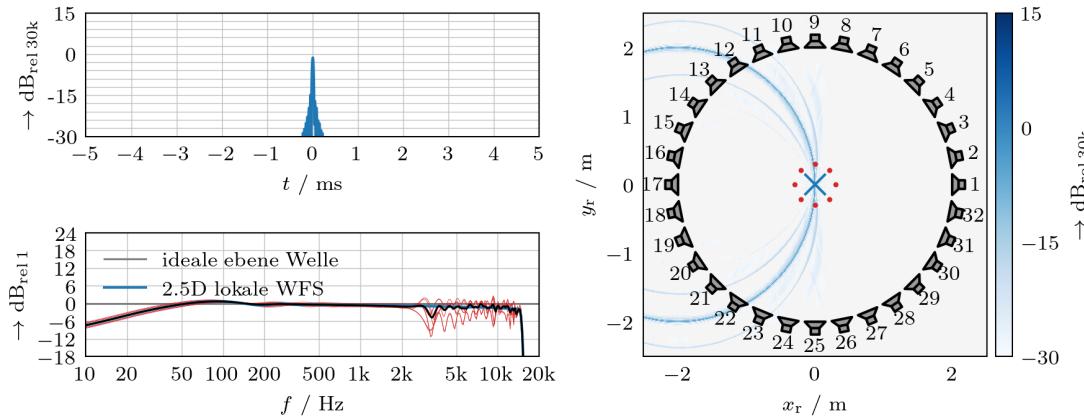


Abbildung 20. 2.5D lokale WFS einer lokal planaren, impulsartigen Wellenfront mit Ausbreitung in Richtung positiver x -Achse optimiert für den Referenzpunkt \times bei $x_r = (0, 0, 0)^T$ m. Wellendurchlauf am Referenzpunkt \times zum gewählten Zeitbezug $t = 0$ s. Gleiches Setup wie in Abb. 17; bei lokaler WFS sind alle Lautsprecher aktiv; Benutzung des idealen 2.5D-WFS-Vorfilters (23); Ordnungen für sphärische Harmonische, zylindrische Harmonische, Lagrange-Polynom, Fourier-Reihe: $N = 30$, $M_s = 15$, $\mathcal{M} = 5$, $M_a = 20$ und Kaiser-Bessel-Fenster mit $\beta = 6$. Im Vergleich zu WFS erzeugt lokale WFS im Referenzpunkt wegen weniger räumlicher Aliasingartefakte einen linearen Frequenzgang über größeren Frequenzbereich und eine zeitlich kompaktere Impulsantwort. Frequenzgänge in rot für die rot markierten Messpunkte auf dem Radius 0,3 m weisen größere Verzerrungen wegen zeitlich weniger kompakten Impulsantworten auf. Energetisch gemittelter Frequenzgang aus allen Messpunkten in schwarz. CC BY 4.0 Frank Schultz, Nara Hahn

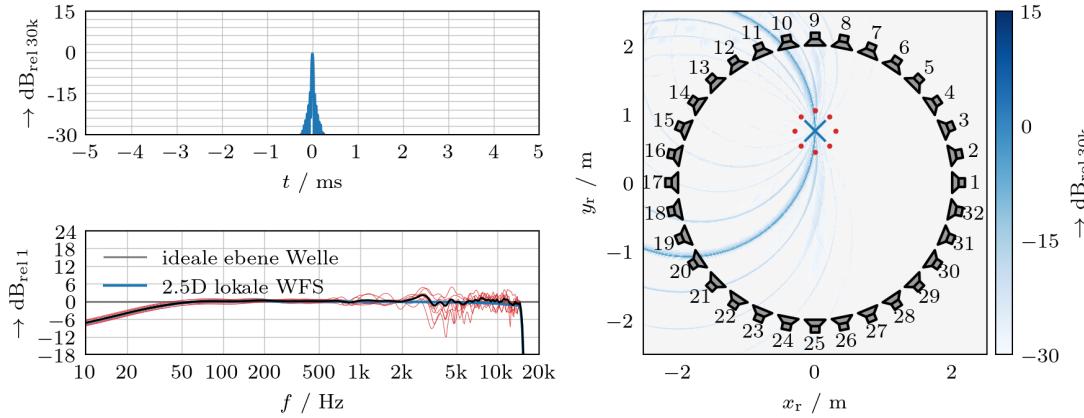


Abbildung 21. 2.5D lokale WFS optimiert für den Referenzpunkt \times bei $x_r = (0, \frac{3}{4}, 0)^T$ m, sonst wie Abb. 20. CC BY 4.0 Frank Schultz, Nara Hahn

Sowohl die Benutzerfreundlichkeit, konsistente Produktionsarbeitsabläufe als auch planare Lautsprecherpanele, welche mittels Audionetzwerken angesteuert werden [98], vgl. Holoplot, gewinnen an Bedeutung beim Einsatz von WFS für 3D-Beschallungsszenarien. Stand frühe 2020er Jahre scheinen Ambisonics, kanal- und objektbasierter Surround Sound, sowie kopfhörerbasierte Binauraltechnik die der WFS bevorzugten 3D-Wiedergabe-Verfahren zu sein. Es ist zu erwarten, dass vermehrt hybride Systeme mit 3D-Ambisonics und 2.5D- bzw. 3D-WFS zum Einsatz kommen, um beide Ansätze sinnvoll zu ergänzen.

Alle Grafiken dieses Kapitels sind in [99] unter CC BY 4.0 Lizenz verfügbar.

DANKSAGUNG

Wir danken Franz Zotter herzlich für die Entstehungsdy namik des Open Source & Open Educational Resources Projektes [74] und seiner damit verbunden initialen Niederschrift des hier wiedergegebenen Herleitungsformalismus, sowie für

zahlreiche Hinweise und Korrekturvorschläge für dieses Kapitel. Ein herzlicher Dank geht auch an Annika Neidhardt für ausgiebiges Korrekturlesen und Verbesserungsvorschläge. Wir danken Matthias Geier für den Hinweis auf den Artikel [8], der zur Einordnung der WFS-Ingenieursutopie nicht fehlen sollte.

LITERATUR

- [1] D. de Vries, *Wave Field Synthesis—AES Monograph*. New York: Audio Eng. Soc., 2009.
- [2] T. Sporer, K. Brandenburg, S. Brix, and C. Sladeczek, *Immersive Sound*. New York: Routledge, 2018, ch. 10: Wave Field Synthesis.
- [3] R. Ranjan and W.-S. Gan, “Wave Field Synthesis: The Future of Spatial Audio,” *IEEE Potentials*, vol. 32, no. 2, pp. 17–23, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MPOT.2012.2212051>
- [4] S. Spors, H. Wierstorff, A. Raake, F. Melchior, M. Frank, and F. Zotter, “Spatial Sound With Loudspeakers and Its Perception: A Review of the Current State,” *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 9, pp. 1920–1938, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2264784>
- [5] A. J. Berkhouit, “A Holographic Approach to Acoustic Control,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 36, no. 12, pp. 977–995, 1988. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=5117>
- [6] D. de Vries, “Vom Helmholtz-Integral zur Helmholtz-Medaille,” in *Fortschritte der Akustik—45. DAGA, Rostock*, Rostock, 2019, pp. 1–7.

- [Online]. Available: https://pub.dega-akustik.de/DAGA_2019/data/articles/000439.pdf
- [7] W. B. Snow, "Basic Principles of Stereophonic Sound," *J. SMPTE [reprinted as IRE Trans. Audio, 3(2):42-53, 1955]*, vol. 61, no. 5, pp. 567-589, 1953. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5594/J00963>
- [8] H. Fletcher, "Auditory perspective – Basic requirements," *Electrical Engineering*, vol. 53, no. 1, pp. 9–11, 1934. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/EE.1934.6540356>
- [9] J. C. Steinberg and W. B. Snow, "Auditory Perspective–Physical Factors," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng. [also as Physical Factors in Bell Sys. Tech. J., 13(2), 245–258, 1934]*, vol. 53, no. 1, pp. 12–17, 1934. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1934.5056476>
- [10] A. J. Berkhouit, D. de Vries, and P. Vogel, "Acoustic control by wave field synthesis," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 93, no. 5, pp. 2764–2778, 1993. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1121/1.405852>
- [11] P. Vogel, "Application of Wave Field Synthesis in Room Acoustics," Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, 1993. [Online]. Available: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:4d236099-096e-444c-bf40-b7b163076bf6>
- [12] M. M. Boone, E. N. G. Verheijen, and P. F. van Tol, "Spatial Sound-Field Reproduction by Wave-Field Synthesis," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 43, no. 12, pp. 1003–1012, 1995. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=7920>
- [13] D. de Vries, "Sound Reinforcement by Wavefield Synthesis: Adaptation of the Synthesis Operator to the Loudspeaker Directivity Characteristics," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 44, no. 12, pp. 1120–1131, 1996. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=7872>
- [14] E. W. Start, "Direct Sound Enhancement by Wave Field Synthesis," Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, 1997. [Online]. Available: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:c80d5b58-67d3-4d84-9e73-390cd30bde0d>
- [15] E. Verheijen, "Sound Reproduction by Wave Field Synthesis," Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, 1997. [Online]. Available: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:9a35b281-f19d-4f08-bec7-64f6920a3821>
- [16] J.-J. Sonke, "Variable Acoustics by Wave Field Synthesis," Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, 2000. [Online]. Available: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:2039d23c-4da3-4021-9fb1-2c21b4cf7275>
- [17] S. Brix, T. Sporer, and J. Plogsties, "CARROUSO—An European Approach to 3D-Audio," in *110th Audio Eng. Soc. Conv., Amsterdam, Paper 5314*, no. #5314, Amsterdam, 2001. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=10014>
- [18] J. Plogsties, O. Baum, and B. Grill, "Conveying Spatial Sound Using MPEG-4," in *24th Intl. Audio Eng. Soc. Conf., Banff, Paper 10*, no. #10, Banff, 2003. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=12305>
- [19] T. Sporer, "Wave Field Synthesis—Generation and Reproduction of Natural Sound Environments," in *7th Intl. Conf. on Digital Audio Effects (DAFx), Naples*, Naples, 2004, pp. 133–138. [Online]. Available: https://www.dafx.de/paper-archive/2004/P_133.PDF
- [20] G. Theile, H. Wittek, and M. Reisinger, "Potential Wavefield Synthesis Applications in the Multichannel Stereophonic World," in *24th Intl. Audio Eng. Soc. Conf., Banff, Paper 35*, no. #35, Banff, 2003. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=12280>
- [21] A. Apel, T. Röder, and S. Brix, "Equalization of Wave Field Synthesis Systems," in *116th Audio Eng. Soc. Conv., Berlin, Paper 6121*, no. #6121, Berlin, 2004. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=12788>
- [22] E. Hulsebos, "Auralization using Wave Field Synthesis," Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, 2004. [Online]. Available: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:49fb99c4-4983-4db0-bedb-b4e142e94333>
- [23] S. Spors, "Extension of an Analytic Secondary Source Selection Criterion for Wave Field Synthesis," in *123rd Audio Eng. Soc. Conv., New York, Paper 7299*, no. #7299, New York, 2007. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14356>
- [24] P.-A. Gauthier and A. Berry, "Equalization in an Extended Area Using Multichannel Inversion and Wave Field Synthesis," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 54, no. 12, pp. 1140–1161, 2006. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=13892>
- [25] P.-A. Gauthier and A. Berry, "Adaptive Wave Field Synthesis for Sound Field Reproduction: Theory, Experiments, and Future Perspectives," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 55, no. 12, pp. 1107–1124, 2007. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14185>
- [26] F. Melchior, C. Sladeczek, D. de Vries, and B. Fröhlich, "User-Dependent Optimization of Wave Field Synthesis Reproduction for Directive Sound Fields," in *124th Audio Eng. Soc. Conv., Amsterdam, Paper 7376*, no. #7376, Amsterdam, 2008. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14506>
- [27] A. Franck, K. Brandenburg, and U. Richter, "Efficient Delay Interpolation for Wave Field Synthesis," in *125th Audio Eng. Soc. Conv., San Francisco, Paper 7613*, no. #7613, San Francisco, 2008. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14764>
- [28] C. D. Salvador, "Discrete Driving Functions for Horizontal Reproduction using Wave Field Synthesis and Higher Order Ambisonics," in *129th Audio Eng. Soc. Conv., San Francisco, Paper 8244*, no. #8244, San Francisco, 2010. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=15666>
- [29] C. Kuhn, R. Pellegrini, D. Leckschat, and E. Cortee, "An Approach to Mixing and Mixing of Music Ensembles Using Wave Field Synthesis," in *115th Audio Eng. Soc. Conv., New York, Paper 5929*, no. #5929, New York, 2003. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=12469>
- [30] H. Wittek, F. Rumsey, and G. Theile, "Perceptual Enhancement of Wavefield Synthesis by Stereophonic Means," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 55, no. 9, pp. 723–751, 2007. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14192>
- [31] H. Wittek, "Perceptual differences between wavefield synthesis and stereophony," Ph.D. dissertation, University of Surrey, 2007. [Online]. Available: <http://epubs.surrey.ac.uk/id/eprint/856932>
- [32] F. Melchior, T. Röder, S. Brix, S. Wabnik, and C. Riegel, "Authoring System for Wave Field Synthesis Content Production," in *115th Audio Eng. Soc. Conv., New York, Paper 5972*, no. #5972, New York, 2003. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=12461>
- [33] R. Väänänen, "User Interaction and Authoring of 3D Sound Scenes in the Carrouso EU project," in *114th Audio Eng. Soc. Conv., Amsterdam, Paper 5764*, no. #5764, Amsterdam, 2003. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=12483>
- [34] R. Pellegrini and C. Kuhn, "Wave Field Synthesis: Mixing and Mastering Tools for Digital Audio Workstations," in *116th Audio Eng. Soc. Conv., Berlin, Paper 6117*, no. #6117, Berlin, 2004. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=12695>
- [35] M. A. Baalman, "On wave field synthesis and electro-acoustic music, with a particular focus on the reproduction of arbitrarily shaped sound sources," Ph.D. dissertation, TU Berlin, 2008. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.14279/depositonce-1883>
- [36] R. Nicol and M. Emerit, "3D-Sound Reproduction Over an Extensive Listening Area: A Hybrid Method Derived from Holophony and Ambisonic," in *16th Intl. Audio Eng. Soc. Conf., Rovaniemi, Paper 16-039*, no. #16-039, Rovaniemi, 1999. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=8015s>
- [37] J. Daniel, R. Nicol, and S. Moreau, "Further Investigations of High Order Ambisonics and Wavefield Synthesis for Holophonic Sound Imaging," in *114th Audio Eng. Soc. Conv., Amsterdam, Paper 5788*, no. #5788, Amsterdam, 2003. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=12567>
- [38] P.-A. Gauthier and A. Berry, "Adaptive wave field synthesis with independent radiation mode control for active sound field reproduction: Theory," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 119, no. 5, pp. 2721–2737, 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1121/1.2186514>
- [39] S. Spors and J. Ahrens, "A comparison of Wave Field Synthesis and Higher-Order Ambisonics with respect to physical properties and spatial sampling," in *125th Audio Eng. Soc. Conv., San Francisco, Paper 7556*, no. #7556, San Francisco, 2008. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14708>
- [40] J. Ahrens and S. Spors, "Sound Field Reproduction Using Planar and Linear Arrays of Loudspeakers," *IEEE Trans. Audio Speech Language Process.*, vol. 18, no. 8, pp. 2038–2050, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TASL.2010.2041106>
- [41] F. M. Fazi, "Sound field reproduction," Ph.D. dissertation, University of Southampton, 2010. [Online]. Available: <https://eprints.soton.ac.uk/id/eprint/158639>
- [42] S. Spors and J. Ahrens, "Analysis and Improvement of Pre-Equalization in 2.5-Dimensional Wave Field Synthesis," in *128th Audio Eng. Soc. Conv., London, Paper 8121*, no. #8121, London, 2010. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=15418>
- [43] F. Völk and H. Fastl, "Wave Field Synthesis with Primary Source Correction: Theory, Simulation Results, and Comparison to Earlier Approaches," in *133rd Audio Eng. Soc. Conv., San Francisco, Paper 8717*, no. #8717, San Francisco, 2012. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=16459>
- [44] F. Zötter and S. Spors, "Is sound field control determined at all frequencies? How is it related to numerical acoustics?" in *52nd Intl. Audio Eng. Soc. Conf., Guildford, Paper 1-3*, no. #1-3, Guildford, 2013. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=16921>

- [45] L. Rohr, E. Cortel, K.-V. Nguyen, and H. Lissek, "Vertical Localization Performance in a Practical 3-D WFS Formulation," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 61, no. 12, pp. 1001–1014, 2013. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=17077>
- [46] H. Wierstorf, "Perceptual assessment of sound field synthesis," Ph.D. dissertation, TU Berlin, 2014. [Online]. Available: <https://dnb.info/1067388109/34>
- [47] G. Firtha, "A Generalized Wave Field Synthesis Framework with Application for Moving Virtual Sources," Ph.D. dissertation, Budapest University of Technology and Economics, 2019. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/10890/13177>
- [48] F. Winter, "Local Sound Field Synthesis," Ph.D. dissertation, University of RostockRostock, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.18453/rosdok_id00002568
- [49] V. Erbes, "Wave Field Synthesis in a Listening Room," Ph.D. dissertation, University of Rostock, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.18453/rosdok_id00002763
- [50] N. Hahn, F. Schultz, and S. Spors, "Cylindrical Radial Filter Design With Application to Local Wave Field Synthesis," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 70, no. 6, pp. 510–525, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17743/jaes.2022.0013>
- [51] E. Skudrzyk, *The Foundations of Acoustics*. Springer, 1971. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-8255-0>
- [52] R. Väänänen, O. Warusfel, and M. Emerit, "Encoding and Rendering of Perceptual Sound Scenes in the Carrouso Project," in *22nd Intl. Audio Eng. Soc. Conf., Espoo, Paper 000261*, no. #000261, Espoo, 2002. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=11123>
- [53] K. Brandenburg, S. Brix, and T. Sporer, "Wave Field Synthesis: From research to applications," in *12th EUSIPCO, Vienna*, Vienna, 2004, pp. 1369–1376. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7080215>
- [54] M. Geier, S. Spors, and S. Weinzierl, "The Future of Audio Reproduction, Technology—Formats—Applications," in *6th Intl. Workshop on Adaptive Multimedia Retrieval, Berlin*, Berlin, 2008, pp. 1–17. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-642-14758-6_1
- [55] D. de Vries, L. Hörczencs, and P. Grond, "Extraction of 3D Information from Circular Array Measurements for Auralization with Wave Field Synthesis," *J. Adv. Sig. Proc.*, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2007/13416>
- [56] S. Spors, R. Rabenstein, and J. Ahrens, "The Theory of Wave Field Synthesis Revisited," in *124th Audio Eng. Soc. Conv., Amsterdam, Paper 7358*, no. #7358, Amsterdam, 2008. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14488>
- [57] E. Cortel, "Synthesis of Directional Sources Using Wave Field Synthesis, Possibilities, and Limitations," *J. Adv. Sig. Proc.*, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2007/90509>
- [58] A. Franck, M. Rath, C. Sladeczek, and S. Brix, "Efficient Rendering of Directional Sound Sources in Wave Field Synthesis," in *45th Intl. Audio Eng. Soc. Conf., Helsinki, Paper 4-6*, no. #4-6, Helsinki, 2012. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=16199>
- [59] L. Romoli, S. Cecchi, P. Peretti, and F. Piazza, "Real-time implementation and performance evaluation of digital control for loudspeakers line arrays," *Appl. Acoust.*, vol. 97, pp. 121–132, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.04.002>
- [60] F. Schultz, G. Firtha, P. Fiala, and S. Spors, "Wave Field Synthesis Driving Functions for Large-Scale Sound Reinforcement Using Line Source Arrays," in *142nd Audio Eng. Soc. Conv., Berlin, Paper 9722*, no. #9722, Berlin, 2017. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=18599>
- [61] A. Franck, A. Gräfe, T. Korn, and M. Strauß, "Reproduction of Moving Sound Sources by Wave Field Synthesis: An Analysis of Artifacts," in *32nd Intl. Audio Eng. Soc. Conf., Hillerød, Paper 10*, no. #10, Hillerød, 2007. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14206>
- [62] J. Ahrens and S. Spors, "Wave field synthesis of moving virtual sound sources with complex radiation properties," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 130, no. 5, pp. 2807–2816, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1121/1.3640850>
- [63] A. J. Berkhout, D. de Vries, and P. Vogel, "Wave Front Synthesis: A New Direction in Electroacoustics," in *93rd Audio Eng. Soc. Conv., San Francisco, Paper 3379*, no. #3379, San Francisco, 1992. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=6754>
- [64] A. J. Berkhout, P. Vogel, and D. de Vries, "Use of Wave Field Synthesis for Natural Reinforced Sound," in *92nd Audio Eng. Soc. Conv., Vienna, Paper 3299*, no. #3299, Vienna, 1992. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=6834>
- [65] F. Schultz, "Sound Field Synthesis for Line Source Array Applications in Large-Scale Sound Reinforcement," Ph.D. dissertation, University of Rostock, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.18453/rosdok_id00001765
- [66] P.-A. Gauthier and A. Berry, "Objective Evaluation of Room Effects on Wave Field Synthesis," *Acta Acust. United Acust.*, vol. 93, no. 5, pp. 824–836, 2007.
- [67] N. Bleistein, "Two-And-One-Half Dimensional In-Plane Wave Propagation," *Geophysical Prospecting*, vol. 34, no. 5, pp. 686–703, 1986. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1986.tb00488.x>
- [68] S. Ise, "A Principle of Sound Field Control Based on the Kirchhoff-Helmholtz Integral Equation and the Theory of Inverse Systems," *Acta Acust. United Acust.*, vol. 85, no. 1, pp. 78–87, 1999.
- [69] M. Kolundžija, C. Faller, and M. Vetterli, "Sound Field Reconstruction: An Improved Approach For Wave Field Synthesis," in *126th Audio Eng. Soc. Conv., Munich, Paper 7754*, no. #7754, Munich, 2009. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14950>
- [70] M. R. Bai, Y.-H. Hua, C.-H. Kuo, and Y.-H. Hsieh, "An integrated analysis-synthesis array system for spatial sound fields," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 137, no. 3, pp. 1366–1376, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1121/1.4913277>
- [71] S. Koyama, G. Chardon, and L. Daudet, "Optimizing Source and Sensor Placement for Sound Field Control: An Overview," *IEEE/ACM Trans. Audio Speech Language Process.*, vol. 28, pp. 696–714, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TASLP.2020.2964958>
- [72] J. Ahrens and S. Spors, "An analytical approach to sound field reproduction using circular and spherical loudspeaker distributions," *Acta Acust. United Acust.*, vol. 94, no. 6, pp. 988–999, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3813/AAA.918115>
- [73] S. Koyama, "Boundary Integral Approach to Sound Field Transform and Reproduction," Ph.D. dissertation, University of Tokyo, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15083/00007263>
- [74] F. Zotter, F. Schultz, and L. Gölls, "WFS Basics—Short and Complete," University of Music and Performing Arts Graz / University of Rostock, Tech. Rep., 2020. [Online]. Available: <https://git.iem.at/zotter/wfs-basics>
- [75] S. M. Deregowski and S. M. Brown, "A Theory of Acoustic Diffractors Applied to 2-D Models," *Geophysical Prospecting*, vol. 31, no. 2, pp. 293–333, 1983. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1983.tb01055.x>
- [76] F. Winter, H. Wierstorf, M. Geier, N. Hahn, F. Schultz, and S. Spors, "Open Source Sound Field Synthesis Toolbox," in *Fortschritte der Akustik—45. DAGA, Rostock*, 2019. [Online]. Available: <https://10.5281/zenodo.2633830>
- [77] M. Möser, *Technische Akustik*, 10th ed. Springer, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-47704-5>
- [78] K.-D. Kammerer and K. Kroschel, *Digitale Signalverarbeitung*, 10th ed. Springer Vieweg, 2022.
- [79] H. Stenzel, "Über die Richtwirkung von Schallstrahlern," *Elektrische Nachrichtentechnik*, vol. 4, no. 6, pp. 239–253, 1927.
- [80] J. Blauert, *Spatial Hearing*. MIT Press, 1997. [Online]. Available: <https://doi.org/10.7551/mitpress/6391.001.0001>
- [81] M. Kolundžija, C. Faller, and M. Vetterli, "Designing Practical Filters For Sound Field Reconstruction," in *127th Audio Eng. Soc. Conv., New York, Paper 7851*, no. #7851, New York, 2009. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=15046>
- [82] F. Schultz, N. Hahn, and S. Spors, "Shelving Filter Cascade with Adjustable Transition Slope and Bandwidth," in *148th Audio Eng. Soc. Conv., Virtual Vienna, Paper 10339*, no. #10339, Vienna, 2020. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=20756>
- [83] E. Cortel, R. Pellegrini, and C. Kuhn-Rahloff, "Wave Field Synthesis with increased aliasing frequency," in *124 Audio Eng. Soc. Conv., Amsterdam, Paper 7362*, Amsterdam, 2008. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14492>
- [84] N. Hahn, F. Winter, and S. Spors, "2.5D Local wave field synthesis of a virtual plane wave using a time domain representation of spherical harmonics expansion," in *23rd Intl. Congr. on Acoustics (ICA), Aachen*, Aachen, 2019, pp. 1132–1139. [Online]. Available: <https://pub.dega-akustik.de/ICA2019/data/articles/001440.pdf>
- [85] wonder, "wonder." [Online]. Available: <https://github.com/dvzrv/wonder>
- [86] ———, "wonder." [Online]. Available: <https://github.com/ntonnaett/wonder>
- [87] Sound Scape Renderer, "Sound Scape Renderer." [Online]. Available: <https://github.com/SoundScapeRenderer>
- [88] IEM WFS, "IEM WFS." [Online]. Available: <https://git.iem.at/audioplugins/iem-wfs>
- [89] WFSCollider, "WFSCollider." [Online]. Available: <https://github.com/GameOfLife/WFSCollider>

- [90] Wave Field Synthesis DIY, “Wave Field Synthesis DIY.” [Online]. Available: <https://wfs-diy.net/>
- [91] J. A. Belloch, A. Gonzalez, E. S. Quintana-Orti, M. Ferrer, and V. Välimäki, “GPU-Based Dynamic Wave Field Synthesis Using Fractional Delay Filters and Room Compensation,” *IEEE Trans. Audio Speech Language Process.*, vol. 25, no. 2, pp. 435–447, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TASLP.2016.2631338>
- [92] IRCAM Panoramix, “IRCAM Panoramix.” [Online]. Available: <https://forum.ircam.fr/projects/detail/panoramix/>
- [93] IRCAM SPAT Revolution, “IRCAM SPAT Revolution.” [Online]. Available: <https://forum.ircam.fr/projects/detail/spat/>
- [94] Flux SPAT Revolution Ultimate, “Flux Spat Revolution Ultimate.” [Online]. Available: <https://www.flux.audio/project/spat-revolution/>
- [95] Encircled Audio IOSONO inside, “Encircled Audio IOSONO inside.” [Online]. Available: <https://encircled-audio.com/>
- [96] Amadeus HOLOPHONIX, “Amadeus HOLOPHONIX.” [Online]. Available: <https://holophonix.xyz/>
- [97] Holoplot, “Holoplot.” [Online]. Available: <https://holoplot.com/>
- [98] T. Reussner, C. Sladeczek, M. Rath, S. Brix, K. Preidl, and H. Scheck, “Audio Network-Based Massive Multichannel Loudspeaker System for Flexible Use in Spatial Audio Research,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 61, no. 4, pp. 235–245, 2013. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=16708>
- [99] F. Schultz, N. Hahn, and S. Spors, “Wellenfeldsynthese,” 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8060879>

INDEX

- 2.5D-Synthese, 5
- 3D-Synthese, 5
- Abtastkriterium, räumlich, 9
- Aliasing, räumlich, 9
- amplitudenkorrekte Synthese, 7
- Apertur, 7, 11
- Dipol, 2
- Fernfeld, 8
- Fernfeld-/Hochfrequenznäherung, 4
- Fernfeldrichtcharakteristik, 8
- Gitterkeule, 9
- grating lobe, 9
- Hauptkeule, 3, 9
- Hochfrequenz-/Fernfeldnäherung, 4
- Kirchhoff-Helmholtz-Integral, 3
- main lobe, 9
- Monopol, 2
- Nahfeld, 8
- Nebenkeule, 9
- Primärquelle, 4
- Sattelpunktsnäherung, 5
- Schallfeldsynthese, 1
- Schallstrahlenmodell, 10
- secondary source selection criterion, 6
- Sekundärquelle, 3, 4
- side lobe, 9
- Wellenfeldsynthese, 1
- Wellenfront, 1
- Wellenfrontkrümmung, 8
- Wellenfrontsynthese, 4
- WFS pre-filtering, 7
- WFS-Vorfilter, 8