

institut für elektronische musik und akustik



FREQUENTIS

Innovations Graz

Toningenieur – Projekt: Studie zur Steuerung der örtlichen Schallfeldkonzentration

In Zusammenarbeit mit

Frequentis Nachrichtentechnik GesmbH (Graz)

(Projekt „dynamisches Beschallungskonzept für Tower Working-Positions“)

Bearbeitung: Franz Zotter

Betreuung: Prof. Robert Höldrich, DI Markus Noisternig

IEM - INSTITUT FÜR ELEKTRONISCHE MUSIK UND AKUSTIK
A-8010 Graz, Inffeldgasse 10/3, Tel.:+43 / 316 389 – 3170, FAX:+43 / 316 389 – 3171
Sekretariat: Brigitte Bergner • office@iem.at • <http://iem.at/>

Kurzfassung

Im Toningenieur-Projekt „Studie zur Steuerung der örtlichen Schallfeldkonzentration“ werden Untersuchungen über die dynamische Beschallung eines Flugsicherungs-Arbeitsplatzes (mit Flugfunkverkehr) angestellt. Diese Untersuchungen beinhalten Berechnungen, Simulationen, einen Systementwurf sowie einen Versuchsaufbau. Ziel dabei ist ein Schallfeld, das an der Position des Arbeitsplatz-Benutzers gut hörbar und im umgebenden Raum möglichst leise ist. Dazu wird eine einfache Lautsprecheranordnung verwendet, deren Richteigenschaften leicht über die entsprechende Ansteuerung beeinflusst werden kann. Mittels steuerbarer Echtzeit-Signalverarbeitung soll die erstrebte Schalldrucküberhöhung auf die jeweilige Sitzposition des Hörers ausgerichtet werden. Die Dimensionierung wird über analytische Berechnungen und numerische Simulationen in MATLAB festgelegt und ein Versuchsaufbau mit Echtzeit-Steuerung/Signalverarbeitung in pd¹ implementiert. Die Implementierung ist im Hinblick auf Ressourcen-effiziente Realisierbarkeit optimiert.

Abstract

The audio-engineering-project “studies on control of spatial sound field concentration” develops ideas about a dynamic sound-radiation (of radio traffic) on an air traffic control working-position. The aim is a well audible sound field at the operator’s working position and the lowest possible sound level in the surrounding sound field. A simple loudspeaker setup is used, the directivity of which can easily be influenced by the appropriate drive. The desired sound level maximum should be adjusted to the operator’s sitting position with the means of controllable real-time-signal processing. The dimensions are determined by analytic calculation and simulations in MATLAB. The real-time-signal processing and control is implemented in pd. A hardware-efficient implementation is being kept in view.

¹ PD – Pure Data von Miller Puckette ist eine grafische Programmiersprache zur Echtzeitsignalverarbeitung

INHALT

1.	Ziele	4
2.	Methoden – gerichtete Schallabstrahlung	5
2.1	delay&sum-Beamforming.....	5
2.2	Nahfeld-Beamforming	5
2.3	Wellenfeldsynthese	6
2.4	Fouriertransformation & Fenstertechnik.....	7
3.	Berechnungen & Betrachtungen	8
3.1	Grenzfrequenzen.....	8
3.1.1.	Untere Grenzfrequenz	8
3.1.2.	Obere Grenzfrequenz –Aliasing.....	8
3.1.3.	Membrandurchmesser	8
3.1.4.	Dimensionierungen	8
3.2	Ideale Strahler/Anforderungen	8
3.3	Fensterung – Schallkeulenbreite	9
3.4	Pegelkorrektur.....	9
4.	Simulation	10
4.1	„stereo-pan“.....	10
4.1.1.	Vorteile/Nachteile	11
4.2	Beamforming.....	11
4.2.1.	harmonic nesting	12
4.2.2.	shifting.....	13
4.2.3.	Vorteile/Nachteile	14
4.3	Nahfeld-Beamforming/WFS.....	14
4.3.1.	harmonic nesting	15
4.3.2.	sliding aperture.....	15
4.3.3.	Vorteile/Nachteile	17
4.4	Vertikale Richtcharakteristik.....	17
5.	Versuchsaufbau	18
5.1	Lautsprecher	18
5.2	Steuerung	19
5.2.1.	Blockschaltbild – Übersicht	19
5.2.1.1.	Trigonometrie-Berechnungen	20
5.2.1.2.	zeitliche Koinzidenz.....	20
5.2.1.3.	Fensterung – Ermitteln eines Fensters.....	21
5.2.2.	Frequenzgangkorrektur	21
5.2.3.	Blockfilterung	22
5.2.4.	CPU-Auslastung	22
5.3	Gemeinsame Hörprobe	22
5.3.1.	Diskussion der Ergebnisse.....	22
6.	Literatur	23
7.	Anhang A: Berechnungen	
8.	Anhang B: Tracking (Christoph Krall)	

1. Ziele

Zielsetzungen im Projekt ist eine dynamische Arbeitsplatzbeschallung, welche folgende Fähigkeiten besitzen soll:

- Überhöhung des Schalldruckes an der Hörerposition (Kopf des Hörers)
- Nachführbarkeit dieser Schalldrucküberhöhung in Echtzeit
- Möglichst geringe Energieabgabe in den umgebenden Raumes
- Sparsamer Umgang mit Ressourcen, sowohl Strahler als auch DSP-Leistung

Die Ermittlung der aktuellen Hörerposition (Kopf des Hörers) wird als gegeben betrachtet. Im Anhang B: Tracking (Christoph Krall) findet sich ein mögliches Verfahren mit einer Anordnung optischer Sensoren.

Arbeitsweise:

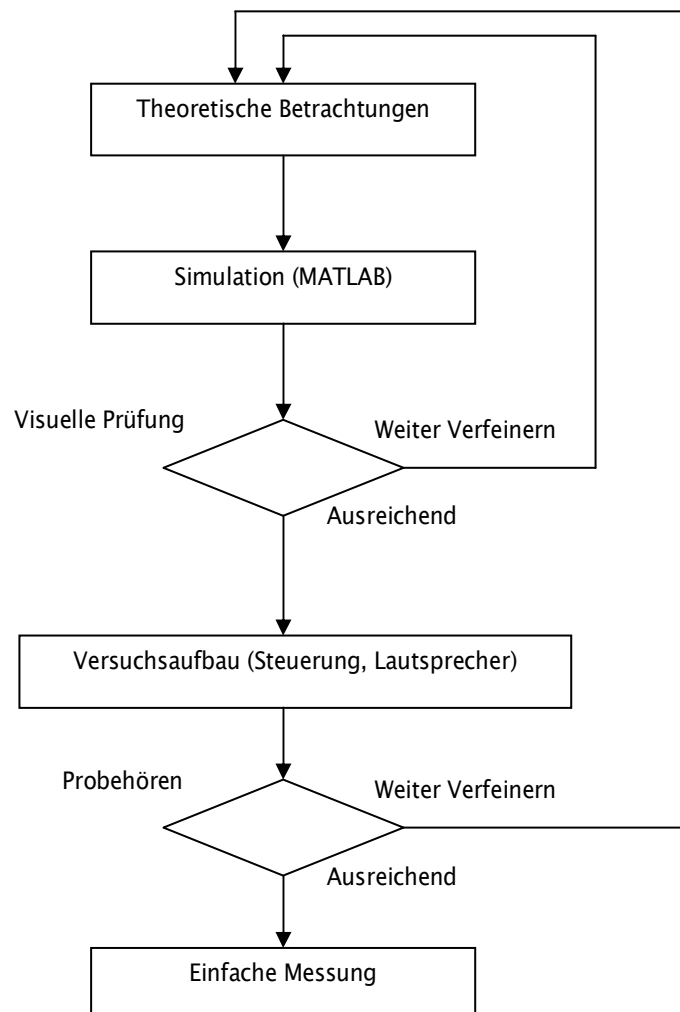


Abbildung 1: Arbeitsweise

2. Methoden – gerichtete Schallabstrahlung

2.1 delay&sum–Beamforming

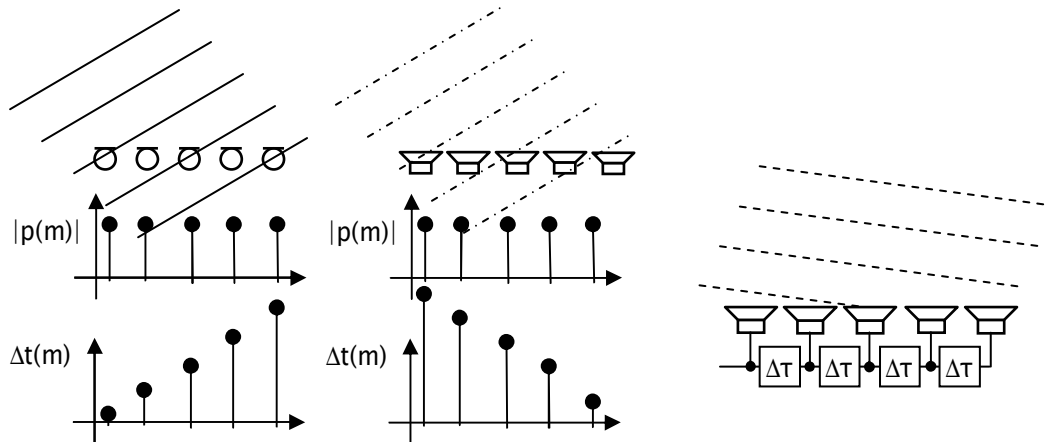


Abbildung 2: delay&sum–Beamformer bei Aufnahme und Wiedergabe, Blockschaltbild

Die häufigste Methode zur Erstellen einer Richtcharakteristik ist der delay&sum–Beamformer. Wie in der Abbildung 2 gezeigt, gilt das Prinzip sowohl für die Abstrahlung als auch für die Aufzeichnung einer Welle.

Hier müssen lediglich Laufzeiten zwischen den Lautsprechersignalen erzeugt werden, um eine Abstrahlung im vorgegebenen Winkel zu erzielen. Da die Laufzeiten benachbarter Lautsprecher gleich sind und keine Pegeldifferenzen auftreten, würde ein Wellenfeld bei der Aufzeichnung einer einfallenden ebenen Welle entsprechen.

Die erzielte Wirkung erklärt sich aus einer konstruktiven Überlagerung paralleler Schallstrahlen in einer Vorzugsrichtung. Die konstruktive Überlagerung gilt somit nur für das Fernfeld, in dem die parallelen Strahlen näherungsweise zusammentreffen. Werden keine Laufzeitdifferenzen eingesetzt, so ist die Hauptabstrahlrichtung normal auf die Lautsprecheranordnung. Im Idealfall gibt es nur eine Abstrahlrichtung.

2.2 Nahfeld–Beamforming

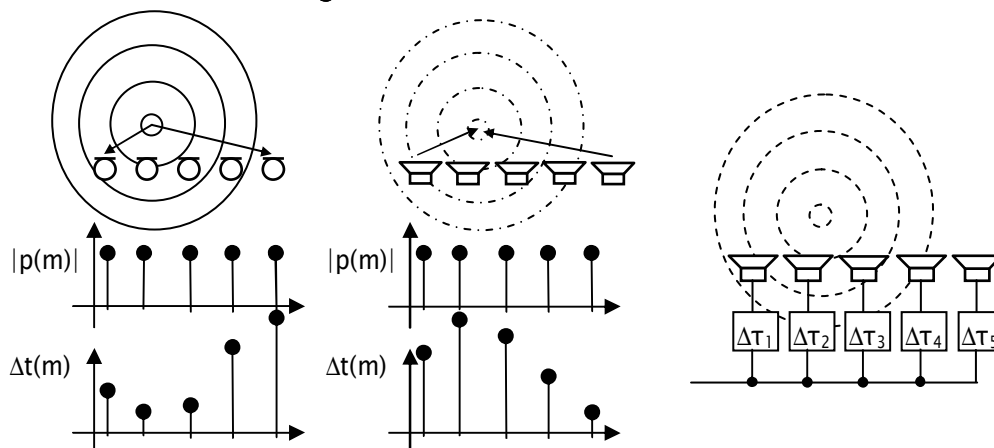


Abbildung 3: Nahfeld–Beamformer bei Aufnahme und Wiedergabe, Blockschaltbild

Im Nahfeld des delay&sum–Beamformers können ungewünschte Kammfiltereffekte auftreten, da nur parallele Schallstrahlen in die Hauptabstrahlrichtung konstruktiv überlagert werden können. Theoretisch ist die konstruktive Interferenz nur im Fernpunkt dieser Richtung möglich (der Abstand wäre unendlich groß). Eine konstruktive Interferenz im Nahfeld ist für einen allgemeinen Fall nicht gewährleistet!

Es können daher in einem Abhörpunkt der Hauptabstrahlrichtung Auslöschungen für bestimmte Frequenzen auftreten. Abhilfe dazu: Nahfeld–Beamforming.

Hinter dem Namen Nahfeld-Beamforming verbirgt sich ähnliches wie im Abschnitt delay&sum-Beamforming. Allerdings wird hier auf die zeitliche Koinzidenz der einfallenden Schallstrahlen in einem Punkt geachtet. Das entstehende Schallfeld ist dann zwar etwas schwächer gerichtet, Kammfiltereffekte werden aber vermieden. Ein Schallfeld bei Aufzeichnung einer Welle wäre hier eine Kugelquelle ohne Ausbreitungsdämpfung.

2.3 Wellenfeldsynthese

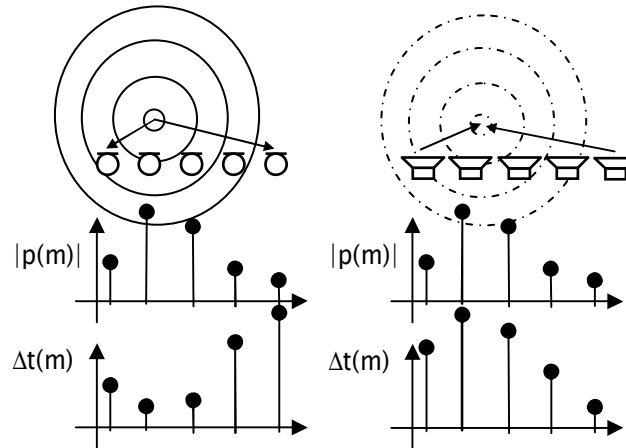
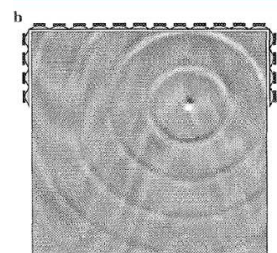


Abbildung 4: Wellenfeldsynthese. Aufnahme/Wiedergabe.

Prinzip/Idealfall:

Ein begrenztes Schallfeld kann durch den bekannten Schalldruckverlauf an seiner Begrenzungsfläche vollständig beschrieben werden. [3]

Zur Rekonstruktion werden nur genügend viele Strahler benötigt, die den bekannten Schalldruckverlauf an derselben Begrenzungsfläche wiederherstellen.



Veränderung der Phase:

Bleibt die Phase unverändert, würde das so erhaltene Schallfeld von der Begrenzungsfläche weg auslaufen. Wird die Phase konjugiert, so kann ein nach innen laufendes Schallfeld innerhalb der Begrenzung nachgebildet werden. Es können auf diese Weise im Idealfall Schallquellen vor der Lautsprecheranordnung abgebildet werden. (siehe Abbildung 4)

Virtuelles Schallfeld:

Zur Berechnung eines für die Schallfeldrekonstruktion geeigneten Schalldruckverlaufes für die Lautsprecherzeile bedient man sich eines einfachen Tricks: Die Annahme eines virtuellen (also nicht real existierenden) Schallfeldes führt zum dazugehörigen virtuellen Schalldruckverlauf an Punkten einer Begrenzungsfläche. Durch Veränderung der Phase kann das Schallfeld innerhalb der Begrenzungsfläche rekonstruiert werden. Hier wird das Modell einer idealen Kugelquelle mit Ausbreitungsdämpfung und Phasenverlauf angenommen. Diese Methodik lässt sich auch auf folgende Verfahren anwenden:

Beim *delay&sum-Beamforming* (2.1) könnte man als *virtuelles Schallfeld* eine unter bestimmtem Winkel einfallende ebene Welle zu Hilfe nehmen, beim *Nahfeld-Beamforming* (2.2) kann die Vorstellung einer Kugelquelle ohne Ausbreitungsdämpfung (konstanter Schalldruckverlauf) als virtuelles Schallfeld angenommen werden.

2.4 Fouriertransformation & Fenstertechnik

Zur Berechnung der Richtcharakteristik kann die Fouriertransformation im Ortsfrequenzbereich herangezogen werden.

Als Fouriertransformierte der Anregung $v(y_Q)$ (Schnelle) entlang einer Lautsprecherzeile (y_Q ...Punkt auf der Lautsprecherzeile, von $-L/2 \dots +L/2$) ergibt sich die Richtwirkung [1]:

$$p(R, \varphi) = \frac{\omega \rho}{2} \sqrt{\frac{2}{\pi k_0 R}} e^{j\frac{\pi}{4}} e^{-jk_0 R} \int_{-\infty}^{+\infty} v(y_Q) e^{jk_0 y_Q \sin(\varphi)} dy_Q$$

Dabei ist:

- R ... Distanz vom Mittelpunkt der Lautsprecherzeile
- φ ... Winkel von der Mittelachse der Lautsprecherzeile
- k_0 ... Wellenzahl im freien Medium $2\pi/\lambda$
- ρ ... Dichte der Luft
- ω ... Kreisfrequenz $2\pi \cdot f$

Beispiel: Die Fouriertransformierte $V(k)$ der Spaltfunktion $v(y_Q)$ einer konphas schwingenden Kolbenmembran/Lautsprecherzeile fließt direkt in die Richtcharakteristik ein [1]:

$$V(k) = v_0 L \frac{\sin(kL/2)}{kL/2} = v_0 L \frac{\sin(\pi L/\lambda)}{\pi L/\lambda}$$

Durch die Anwendung verschiedener Fensterungsmethoden können bei der ortsdiskreten Fouriertransformation – vgl. Fenstertechniken bei der zeitdiskreten Fouriertransformation – folgende Effekte erzielt werden:

1. Unterdrücken von Nebenkeulen
2. Steuern der Hauptkeulenbreite

Beispielsweise treten beim delay&sum-Beamformers auch Nebenabstrahlrichtungen auf, die durch die Fenstertechnik unterdrückt werden können. Da die Richtwirkung des delay&sum-Beamformers [1] für steigende Frequenzen eine schmalere Hauptkeule aufweist, tritt für Frequenzen ab 1,5 kHz bereits eine Abschattung durch den Kopf des Hörers auf. Durch geeignete Fensterung kann die Hauptkeulenbreite entsprechend angepasst werden.

3. Berechnungen & Betrachtungen

3.1 Grenzfrequenzen

Die oben erwähnten Methoden können hier nur mit ortsdiskreten Strahlergruppen endlicher Dimensionen angewendet werden. Aus der Ortsdiskretisierung, der Beschränkung der Ausdehnung und den in sich nichtidealen Strahlerelementen gelten folgende Einschränkungen:

3.1.1. Untere Grenzfrequenz

Array-Länge: $L > \frac{\lambda_0}{2} = \frac{c}{2f_{ug,L}}$ (Bedingung für destruktive Interferenzen)

Durch die Begrenzung der Lautsprecherzeilenlänge können nur ab jener unteren Grenzfrequenz wirkliche Auslöschungen erwartet werden, ab welcher mindestens eine halbe Wellenlänge in der Lautsprecherzeilenlänge enthalten ist.

3.1.2. Obere Grenzfrequenz –Aliasing

Abtasttheorem: $\Delta x < \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda_0}{2 \sin(\varphi)} = \frac{c}{2f_{og,A} \sin(\varphi_{max})}$ (Auftreten von Alias-Abstrahlrichtungen)

Bei der Ortsdiskretisierung muss das Shannon'sche Abtasttheorem eingehalten werden. Dieses fordert einen Minimalabstand der Lautsprecher Elemente voneinander, der eine halbe Wellenlänge nicht überschreitet. Diese Forderung kann unter den getroffenen Einschränkungen der Ressourcen-Effizienz nicht für den gesamten verwendeten Frequenzbereich eingehalten werden.

3.1.3. Membrandurchmesser

Einzellautsprecher: $\phi_M < \frac{\lambda_0}{2} = \frac{c}{2f_{og,M}}$ (gleichmäßige Abstrahlung [1])

Um eine gleichmäßige Abstrahlung der Lautsprecher zu erhalten, die im Idealfall einer Kugelcharakteristik entsprechen sollte, sollte das obenstehende Kriterium erfüllt werden.

3.1.4. Dimensionierungen

Frequenzband 200 Hz – 4 kHz, maximaler Auslenkwinkel 60°	
$\Delta x < 4.95 \text{ cm}$	Die Bedingung zur Vermeidung von Alias-Abstrahlrichtungen und jene für gleichmäßige Abstrahlung der Einzelstrahler kann nicht eingehalten werden.
$\phi_M < 4.29 \text{ cm}$	
$L > 85.75 \text{ cm}$	
Durch die zunehmend bündelnde Richtwirkung der LS für $f > 1.5 \text{ kHz}$ werden auftretende Alias-Abstrahlrichtungen der Lautsprecherzeile unterdrückt. Die seitliche Auslenkung beim Beamsteering wird jedoch dadurch eingeschränkt.	
Annahme Array mit $L = 65 \text{ cm}$	
$f_{ug,L} = 260 \text{ Hz}$	Hier ein realistisches Beispiel aus dem die Grenzfrequenzen errechnet wurden
5 LS, $f_{og,A} = 1.2 \text{ kHz}$	Ab 1–2 kHz ergeben sich zusätzliche (ungewollte) Abstrahlrichtungen
7 LS, $f_{og,A} = 1.8 \text{ kHz}$	
$\phi_M < 10 \text{ cm}$.	

3.2 Ideale Strahler/Anforderungen

Ideale Strahler sollten einen möglichst kleinen Durchmesser, einen möglichst ausgeglichenen Frequenzgang und eine Abstrahlcharakteristik einer Kugelquelle aufweisen, damit das mathematische Modell Gültigkeit besitzt. Die Abstrahlung hoher Frequenzen ist bei großen Membrandurchmessern stärker in die Achsrichtung der Strahler konzentriert. Vorteil am nicht optimalen Verhalten wäre, dass bei zentral ausgerichtem Schallstrahl der Lautsprecherzeile seitlich auslaufende Aliasing-Komponenten unterdrückt werden. Nachteil, dass eine seitliche Ausrichtung der Lautsprecherzeilenkeule nicht mehr gut funktioniert.

3.3 Fensterung – Schallkeulenbreite

Da bei hohen Frequenzen eine sehr schmale Hauptkeule entsteht, und ab ca. 1500 Hz eine Abschattung durch den Kopf des Hörers, ist es sinnvoll die Apertur der Anordnung als räumliches Fenster zu betrachten:

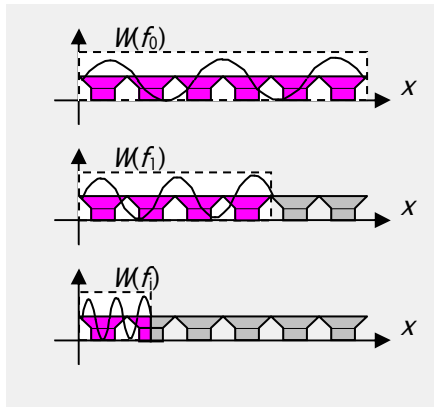


Abbildung 5: Fensteröffnung normiert auf Wellenlängen

Prinzip des „harmonic nesting“:

Für hohe Frequenzen sollen weniger Lautsprecher der Lautsprecherzeile betrieben werden, damit die Richtwirkung nicht zu groß wird, das Schalldruckbewertungsfenster soll örtlich gesehen schmaler werden. Bei tiefen Frequenzen soll die volle Richtwirkung der ganzen Lautsprecherzeile ausgenutzt werden und die Fensterfunktion weit geöffnet sein. Wenn innerhalb dieses Fensters stets dieselbe Anzahl von Wellenlängen Platz findet ergibt sich laut Theorie für eine ortskontinuierliche Lautsprecherzeile eine konstante Richtcharakteristik. Das kann auch anhand der Formel in 2.4 Fouriertransformation & Fenstertechnik nachvollzogen werden.

Die Grenzbereiche für diese Methode ergeben sich aus der Maximallänge L der Fensteröffnung und der Ortsdiskretisierung. Bei der Signalaufbereitung muss jedes Lautsprechersignal gefiltert werden. (siehe auch 5.2.1.3 Fensterung, 5.2.3 Blockfilterung, 7 Anhang A: Berechnungen)

Da eine Lautsprecherzeile des Spacings 15,5 cm bei 60° Auslenkung der Abstrahlung bereits ab 1,2 kHz Alias-Abstrahlrichtungen erzeugt, ist es sinnvoll als Gegenmaßnahme das Fensterzentrum mit der Hörerposition mit zu verschieben. Abstrahlung in eine Spiegelrichtung kann damit leicht geschwächt werden, indem entfernte Lautsprecher nicht in Betrieb sind.

Ein Rechteckfenster hat die Keulenbreite von ca. $\frac{4\pi}{N+1}$, ein Hann-Fenster ca. $\frac{8\pi}{N}$ [2]. Daraus ergibt sich

das Verhältnis der Richtkeulenbreite mit/ohne Fensterung zu $\frac{2(N+1)}{N}$. Laut Kapitel 7 (Anhang A:

Berechnungen) ergibt sich die Richtkeulenbreite zu: $\alpha = 2 \arccos \left(\frac{2(N+1)}{N} \frac{0,600335505}{n_{\lambda_0}} \right)$

Um eine konstante Hauptkeulenbreite von 20° zu erreichen muss die Breite der Fensterfunktion 5.6 Wellenlängen der jeweils betrachteten Frequenz betragen.

3.4 Pegelkorrektur

Die gemittelte abgegebene Schallleistung wird in 7 Anhang A: Berechnungen hergeleitet:

$$2\pi \overline{p_{sum}^2} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{p_{0,i}}{r_i} \right)^2 + 2 \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=n+1}^N \frac{p_{0,n} p_{0,m}}{r_n r_m} \cos(k(r_n - r_m) + \varphi_n - \varphi_m)$$

Für einen allgemeinen Schalldruckverlauf (frequenzabhängig) beim Nahfeld-Beamforming, bzw. der WFS einer Kugelquelle ist eine Frequenzgangkorrektur im Abhörpunkt nötig, siehe Berechnungsunterlagen:

$$p_{sum,s} = \sum_{i=1}^N \frac{p_{0,i}}{2\sqrt{\pi} r_i}$$

Beim delay&sum-beamforming ist eine Frequenzgangkorrektur für einen Punkt nicht so exakt lösbar, Auslöschungen durch Kammfiltereffekte können/dürfen aufgrund der Stabilität nicht ausgeglichen werden.

4. Simulation

Die Simulation beinhaltet im Wesentlichen 3 Darstellungen:

- Die anschaulichste Darstellung zeigt den Schalldruckpegel, der als farbige Höhenlandschaft über der xy-Ebene (Arbeitsplatz in [m]) dargestellt wird. Zu sehen sind zudem Höhenlinien (alle 6 dB, blau), die Lautsprecherpositionen als blaue Punkte, der Arbeitsbereich als schwarzes Rechteck, die virtuelle Schallquelle als rote Kreise und ein Richtdiagramm (schwarz), welches über den Radius vom Array-Mittelpunkt aus aufgetragen ist.
- Die wichtigste Darstellung zeigt alleine das Richtdiagramm, welches den Schalldruckpegel (rot) entlang aller Winkel mit dem Radius r , vom Array-Mittelpunkt ausgemessen, darstellt. (Gitter: 10 dB)
- 3D-Richtdiagramm (balloon). Dieses Diagramm ist nur auf Seite 16 zu sehen.

4.1 „stereo-pan“

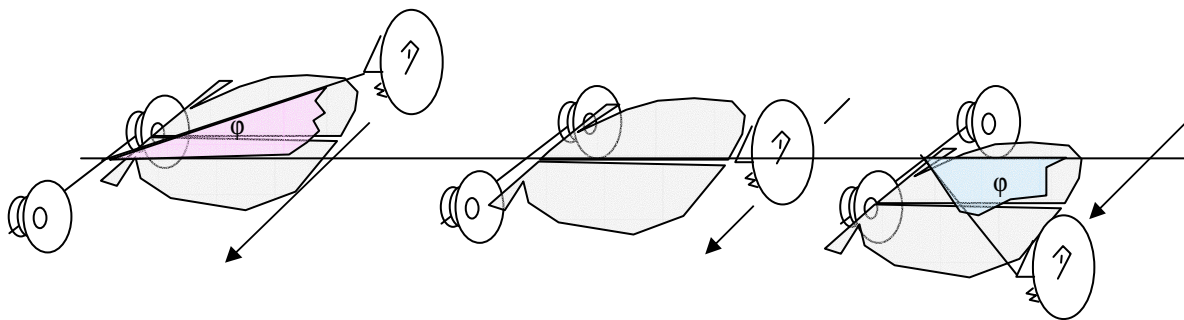


Abbildung 6: „Stereo-Pan“ Methode mit 2 Lautsprechern

Durch Betreiben des Näheren von 2 Lautsprechern, kann die unnötig abgegebene Schallenergie reduziert werden. Die Simulation rechnet mit einem Bewertungsfenster konstanter Öffnung, welches zwischen linkem und rechtem Lautsprecher hin und her verschoben werden kann. Verzögerungen werden so eingesetzt, dass am Hörort konstruktive Überlagerung auftreten kann.

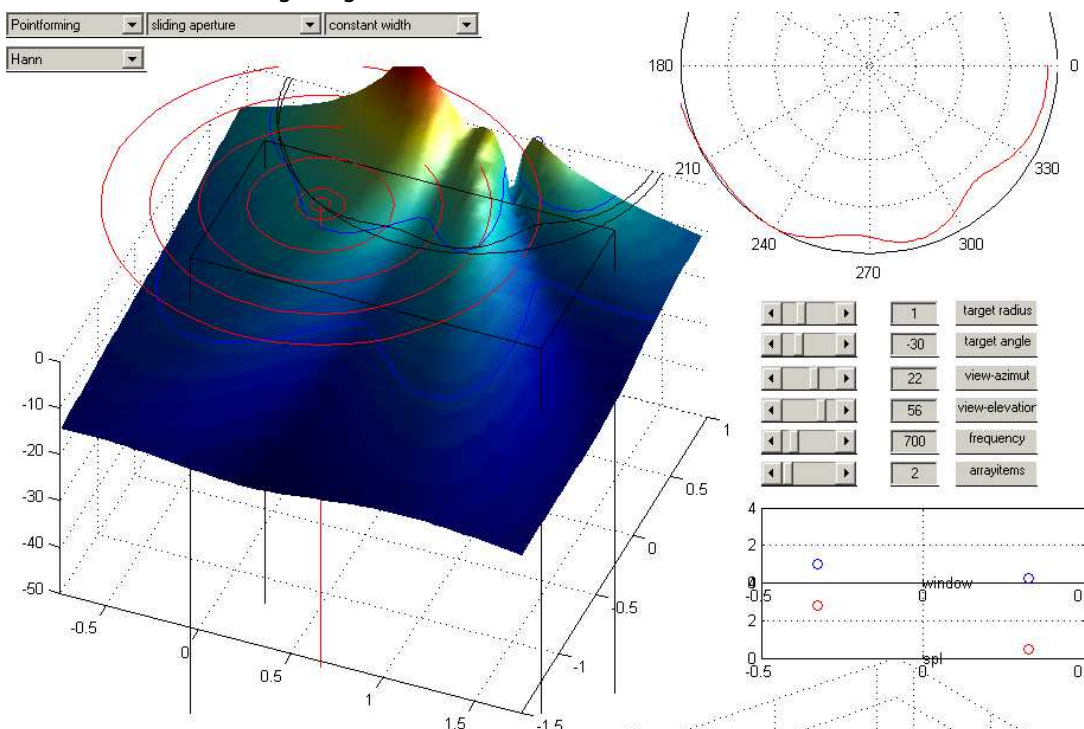


Abbildung 7: Simulation „Stereo-Pan“, 700 Hz

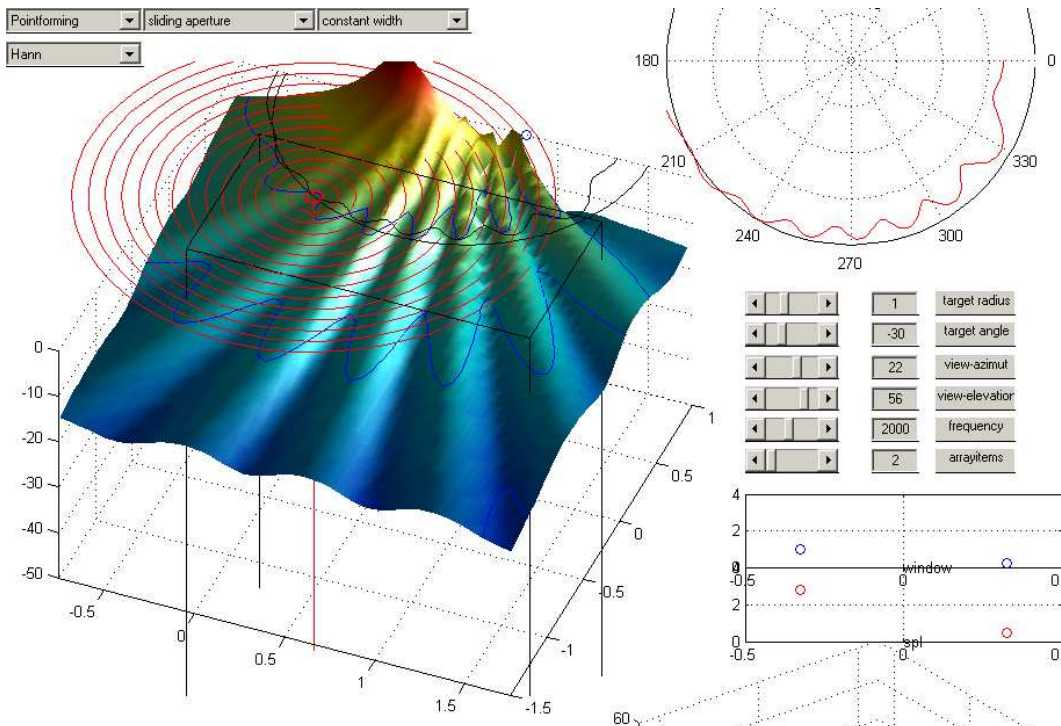


Abbildung 8: Simulation „Stereo-Pan“, 2000 Hz

4.1.1. Vorteile/Nachteile

Wie man auf den Abbildungen der Simulation erkennen kann, ist durch das Verwenden von nur 2 Lautsprechern bereits eine kleine Nachführung der Beschallung möglich. Die Ausblendung der Beschallung in den unerwünschten Bereichen ist allerdings nicht besonders groß, da im Wesentlichen nur die Ausbreitungsdämpfung ausgenutzt wird.

4.2 Beamforming

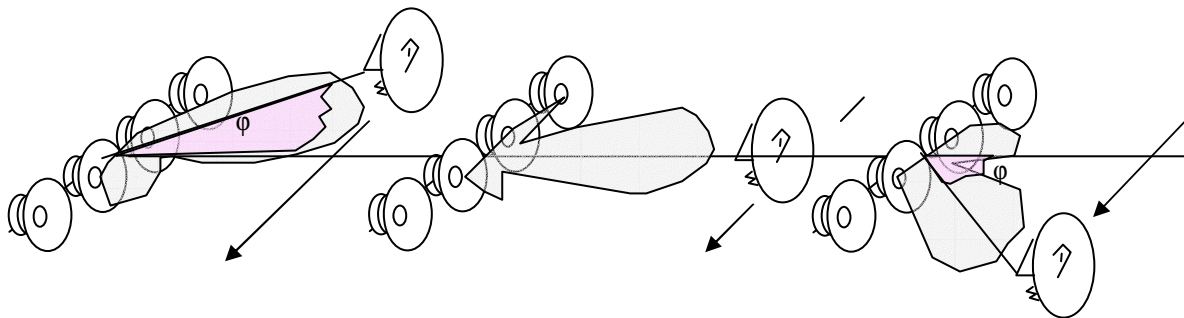


Abbildung 9: Beamforming in der Horizontalebene

Beim Beamforming wird versucht eine Wellenfront einer auslaufenden ebenen Welle zu erzeugen. Durch die Wahl der Verzögerungszeiten kann der Ausfallswinkel gesteuert werden. Durch mögliche Kammfiltereffekte im Nahfeld der Lautsprecherzeile ist eine Frequenzgangkorrektur nicht exakt durchführbar.

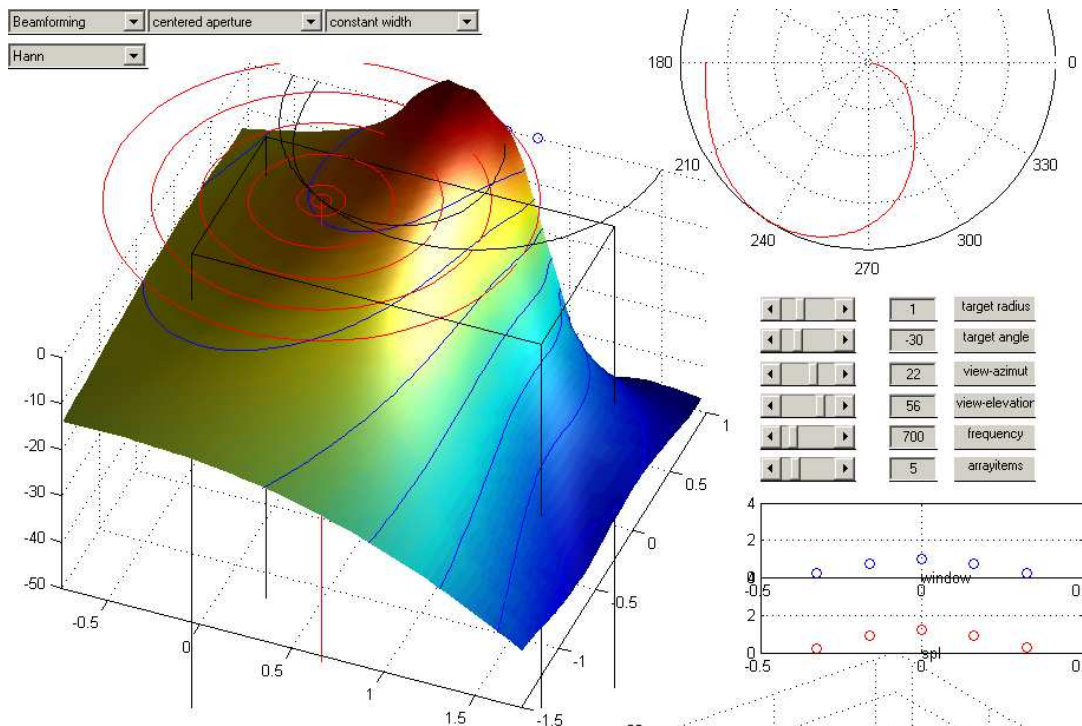


Abbildung 10: Simulation Beamforming, zentriertes Hann-Fenster konstanter Breite, 700 Hz

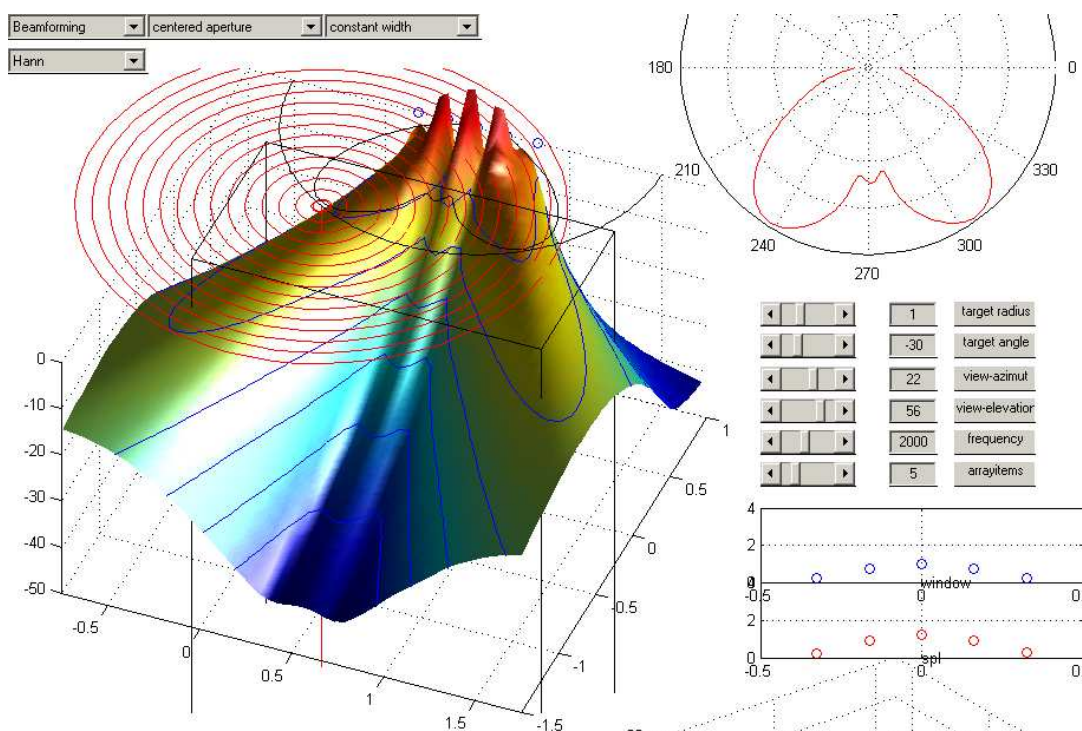


Abbildung 11: Simulation Beamforming, zentriertes Hann-Fenster konstanter Breite, 2000 Hz

4.2.1. harmonic nesting

Durch harmonic nesting wird das verwendete Bewertungsfenster in Wellenlängen angegeben. Daher wird es je nach Frequenz gedehnt/gestaucht. Damit soll eine konstante Richtkeulenbreite erreicht werden, natürlich gibt es Einschränkungen durch: begrenzte Lautsprecherzeilenlänge und diskretem Spacing.

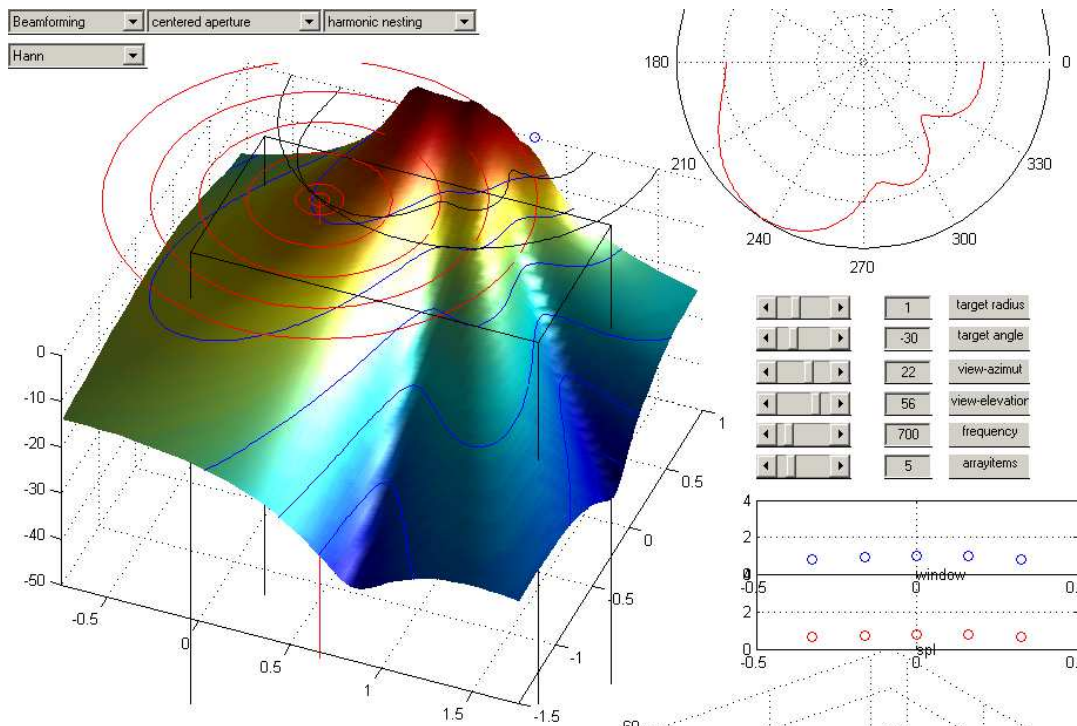


Abbildung 12: Simulation Beamforming, zentriertes Hann-Fenster mit Breite in Wellenlängen, 700 Hz

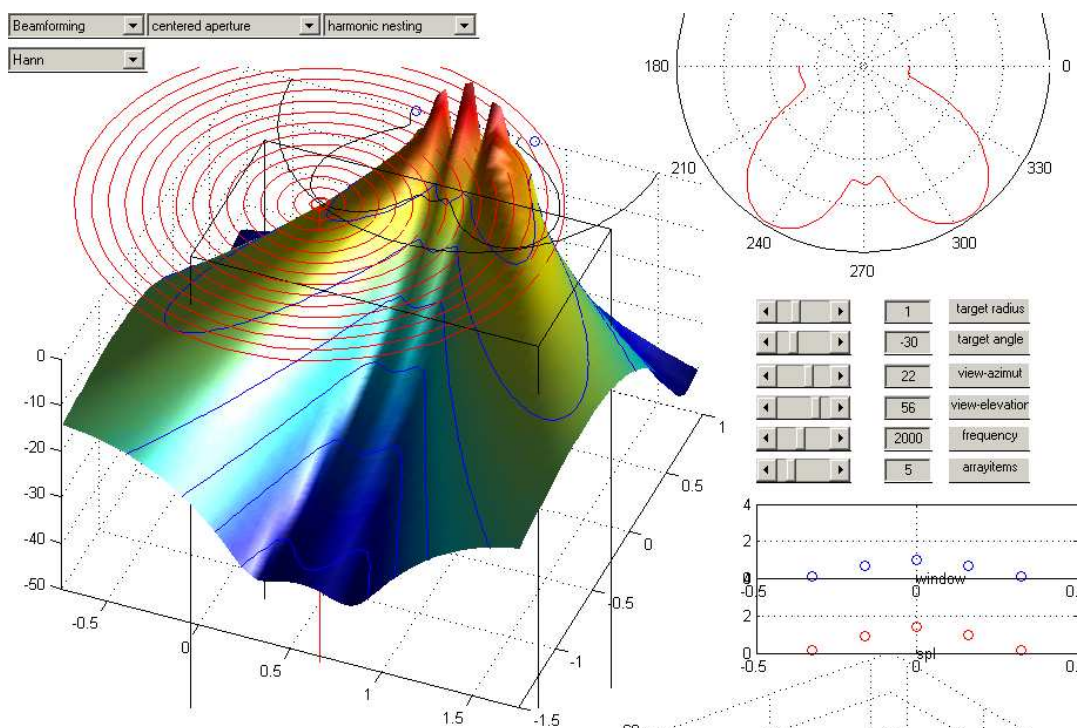


Abbildung 13: Simulation Beamforming, zentriertes Hann-Fenster mit Breite in Wellenlängen, 2000 Hz

4.2.2. shifting

Die Alias-Abstrahlrichtung in Abbildung 13 könnte durch shifting des Fensterzentrums um ein paar dB gesenkt werden, siehe 4.3.2 sliding aperture Abbildung 19.

4.2.3. Vorteile/Nachteile

Vorteil des delay&sum-Beamformings ist die starke Richtwirkung und die Verwendung von nur einer Verzögerungszeit als Parameter. Nachteilig ist jedoch (siehe auch 7 Anhang A: Berechnungen), dass Kammfiltereffekte auftreten können und eine Pegelnormalisierung im Abhörpunkt schwerer lösbar ist.

4.3 Nahfeld-Beamforming/WFS

Hier wird die Wellenfeldsynthese einer idealen Kugelquelle mit einer Fensterung kombiniert.

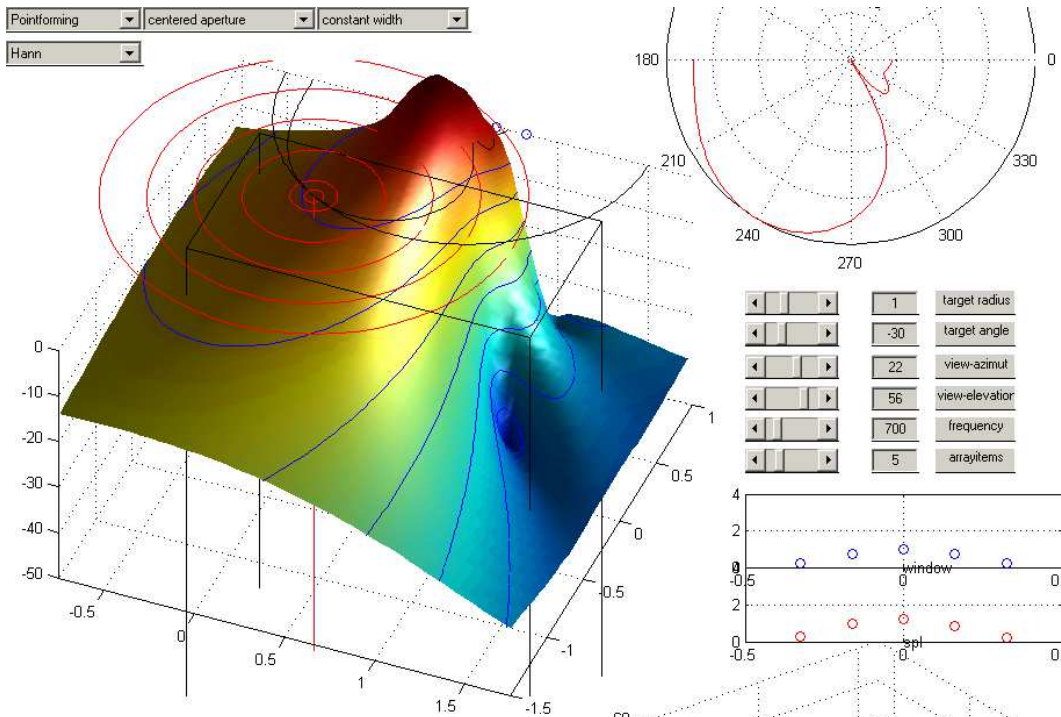


Abbildung 14: Simulation WFS, zentriertes Hann-Fenster konstanter Breite, 700 Hz

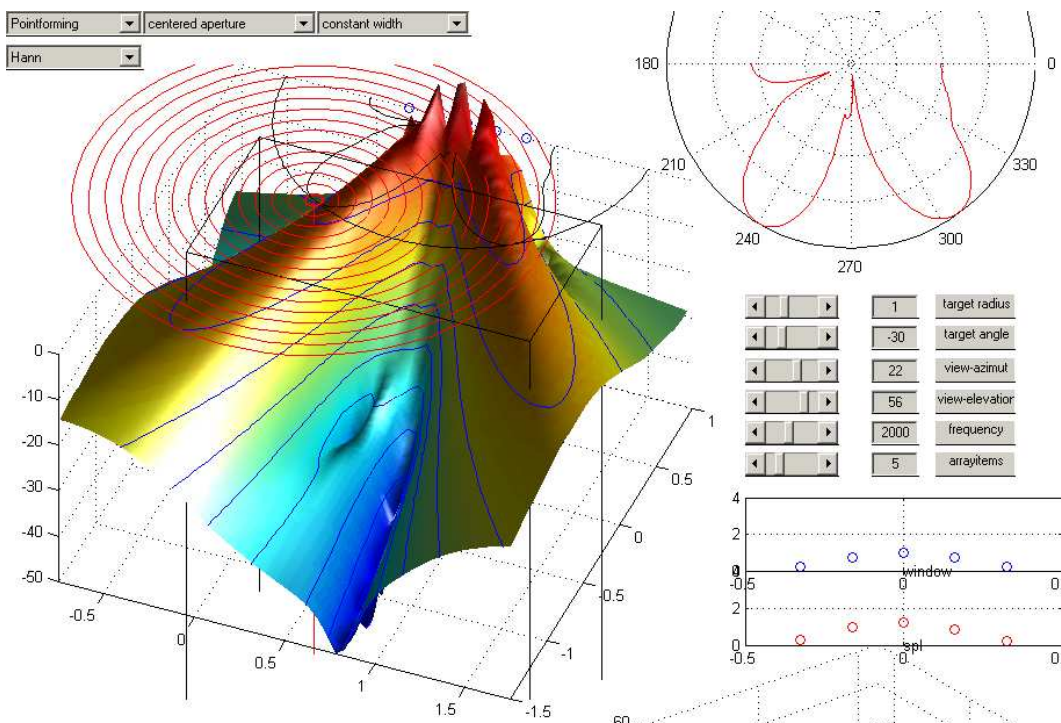
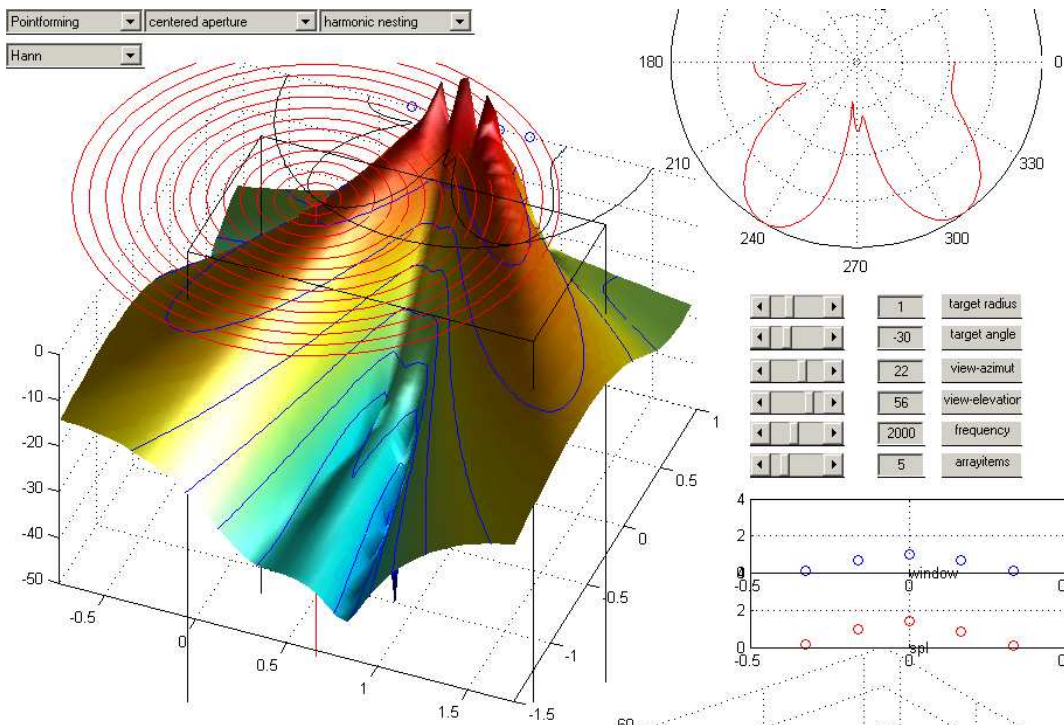
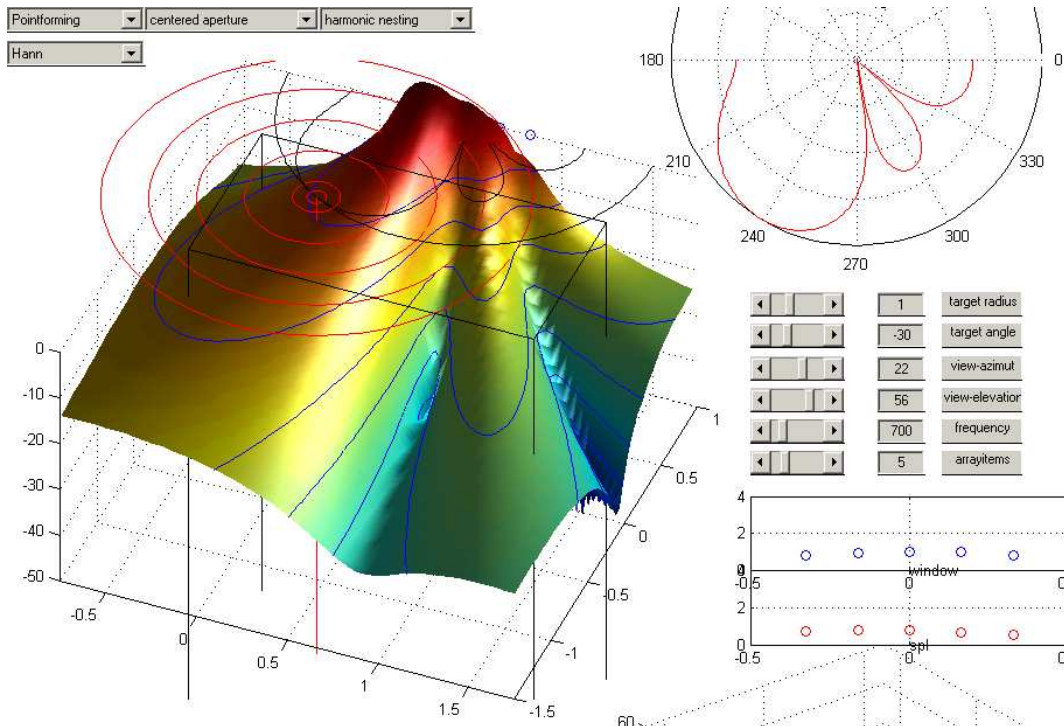


Abbildung 15: Simulation WFS, zentriertes Hann-Fenster konstanter Breite, 2000 Hz

4.3.1. harmonic nesting

Harmonic nesting wird wie oben durch eine Fensterung mit einer auf Wellenlängen bezogenen Fensteröffnung vorgenommen. Es soll wiederum damit erreicht werden, dass für hohe Frequenzen die Richtwirkung nicht zu schmal wird.



4.3.2. sliding aperture

Durch Verschieben des Fensterzentrums sollen hier wieder Alias-Komponenten unterdrückt werden.

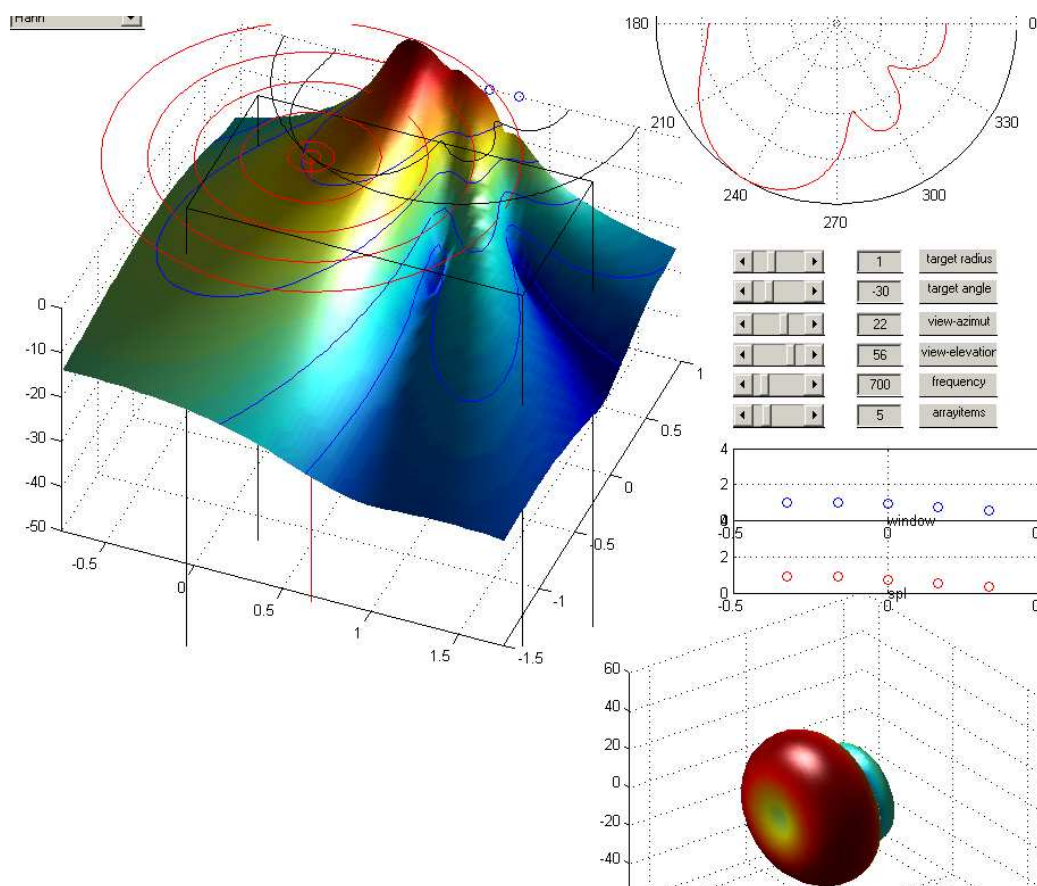


Abbildung 18: Simulation WFS, verschobenes Hann-Fenster mit Breite in Wellenlängen, 700 Hz

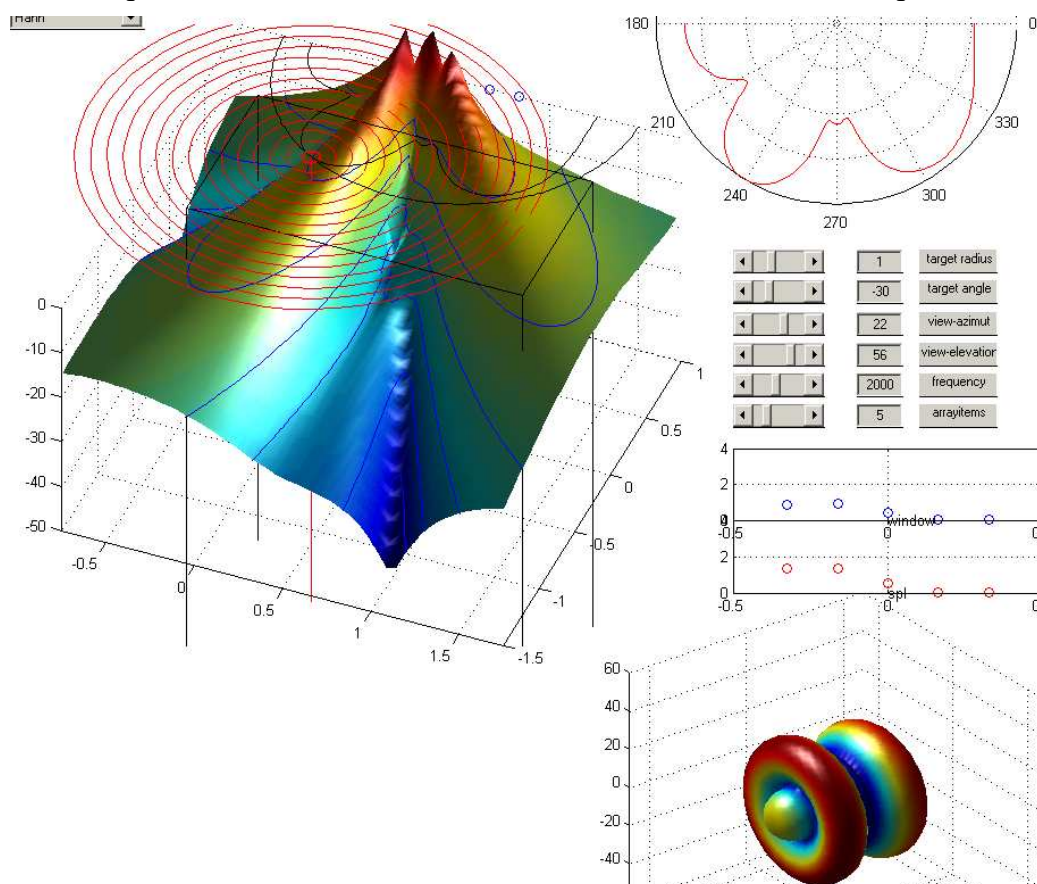


Abbildung 19: Simulation WFS, verschobenes Hann-Fenster mit Breite in Wellenlängen, 2000 Hz

4.3.3. Vorteile/Nachteile

Vorteil beim Nahfeld-Beamforming ist die einfache Pegelnormalisierung, siehe 7 Anhang A: Berechnungen. Zudem kann sich die kegelförmig verlaufende Schallausbreitung als günstig erweisen, da die Schallenergie mit steigender Entfernung schneller abnimmt. Die Kombination „harmonic nesting“ und „sliding aperture“ erweist sich als günstig, da Alias-Abstrahlrichtungen ein wenig gedämpft werden und die Richtbreite für hohe Frequenzen nicht zu schmal wird. Nachteil: Die begrenzte Lautsprecherzahl ermöglicht es zwar nicht bei der Dimensionierung (3.1.4), alle Forderungen einzuhalten, aber eine allgemeine Schalldrucküberhöhung kann dennoch geschaffen werden.

4.4 Vertikale Richtcharakteristik

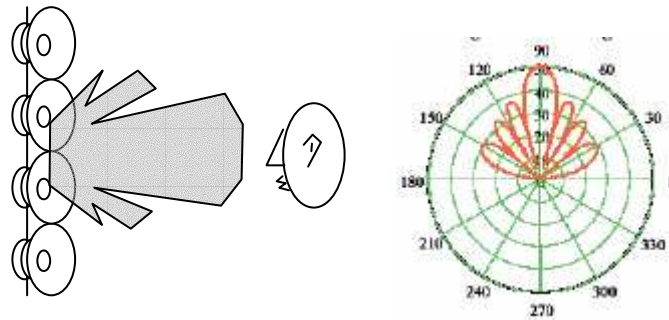


Abbildung 20: vertikales Array

Eine statische Richteigenschaft mittels vertikaler Lautsprecherzeile würde Boden- und Deckenreflexionen vermeiden. Ziel wäre es durch Reduktion des reflektierten Schallfeldes das Übersprechen auf andere Arbeitsplätze zu verringern, allerdings ist die erreichte zylinderförmige Wellenausbreitung im Direktschallpfad der Lautsprecherzeile möglicherweise störender.

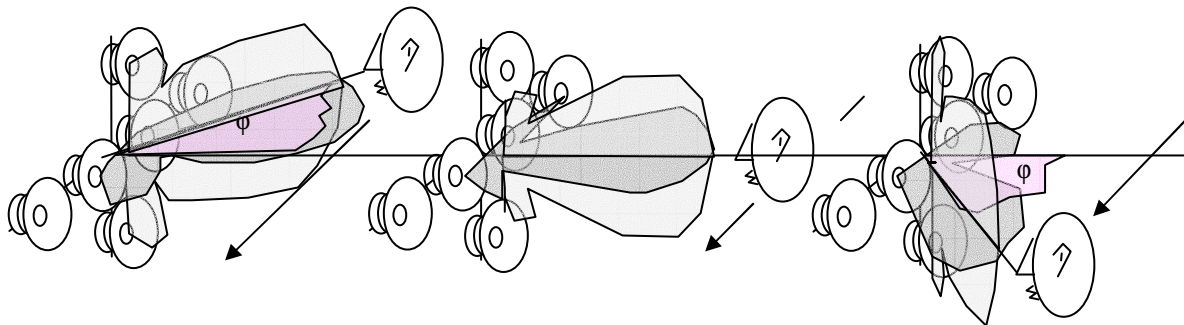


Abbildung 21: Erweiterung um vertikale Richtwirkung

Ein weiterer Ausbau der zeitvarianten Richteigenschaften wäre die Erweiterung der Lautsprecherzeile auf ein Lautsprecherfeld. Dafür wäre die Vermeidung von Boden- und Deckenreflexionen ein möglicher Anstoß. Allerdings ist hier eine sparsame Realisierung mit nur 2 zusätzlichen Lautsprechern nur bedingt möglich, da dies nur beim Betrieb ohne gleitendes Fensterzentrum und nur für tiefe Frequenzen stabil einsatzfähig ist.

5. Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau wurde im Lehrstudio des Instituts für Elektronische Musik und Akustik aufgestellt. Die Systemkomponenten des Versuchsaufbaus:

- 8 „JBL Control 1“ Lautsprecher
- 2 digitale 4-Kanalverstärker
- PC mit installiertem „pd“ [*] und einer „RME“-Audiokarte (optische 8-Kanalausgänge)
- 8 analoge AUX-Ausspielwege des digitalen Studiomischpultes „YAMAHA O2R“

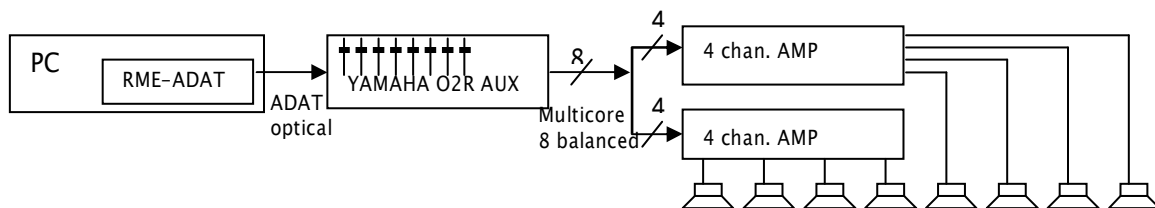


Abbildung 22: Blockschaltbild Versuchsaufbau

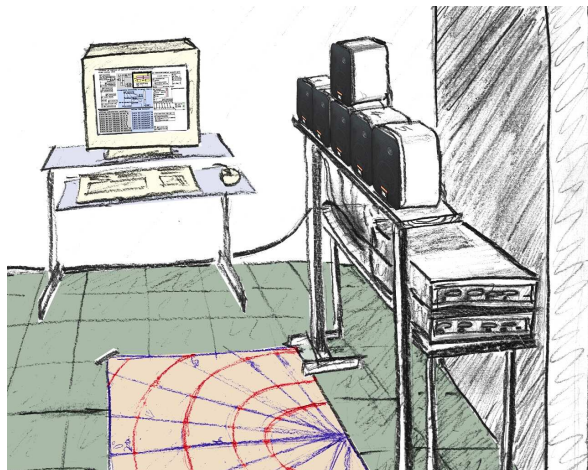


Abbildung 23: Skizze Versuchsaufbau im Test

5.1 Lautsprecher

Als Systemlautsprecher werden hier JBL-Control One im Versuchsaufbau eingesetzt. Die Anspeisung geschieht über 2 digitale 4-Kanalverstärker, welche ihrerseits das Signal aus dem Studiomischpult beziehen. Die 8 Signale aus der Steuerungssoftware, welche in pd implementiert wurde, gehen über eine RME-Karte mit optischem Ausgang ans Studiomischpult.

5.2 Steuerung

Die wichtigsten Steuerungsparameter sind r und ϕ . Beliebige Audiosamples können ausgegeben werden. In Abbildung 24 ist die Bildschirmansicht der Echtzeitprogrammierung in pd [*] mit den einstellbaren Parametern zu sehen.

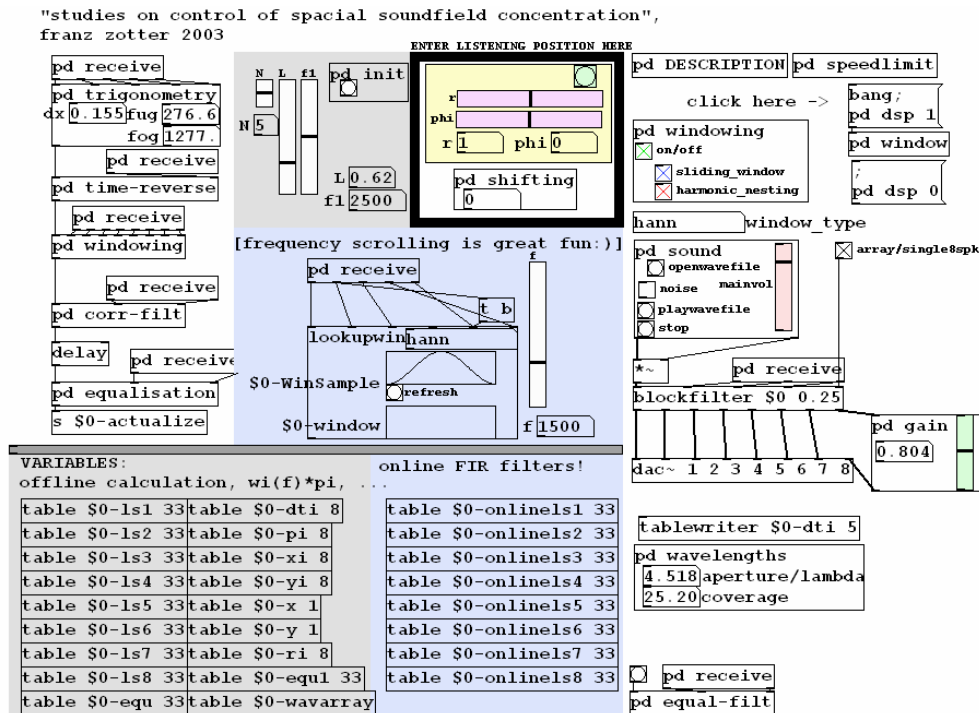


Abbildung 24: Bildschirmansicht des pd-Programmes zur Echtzeitsteuerung

5.2.1. Blockschaltbild – Übersicht

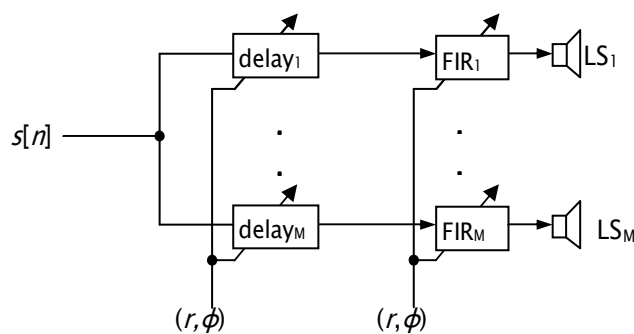


Abbildung 25: Übersichtsblockschaltbild Signalverarbeitung

5.2.1.1. Trigonometrie-Berechnungen

Aus den berechneten Radien können Schalldrücke und Verzögerungszeiten berechnet werden. Danach wird ein Bewertungsfenster über den Schalldruck gelegt.

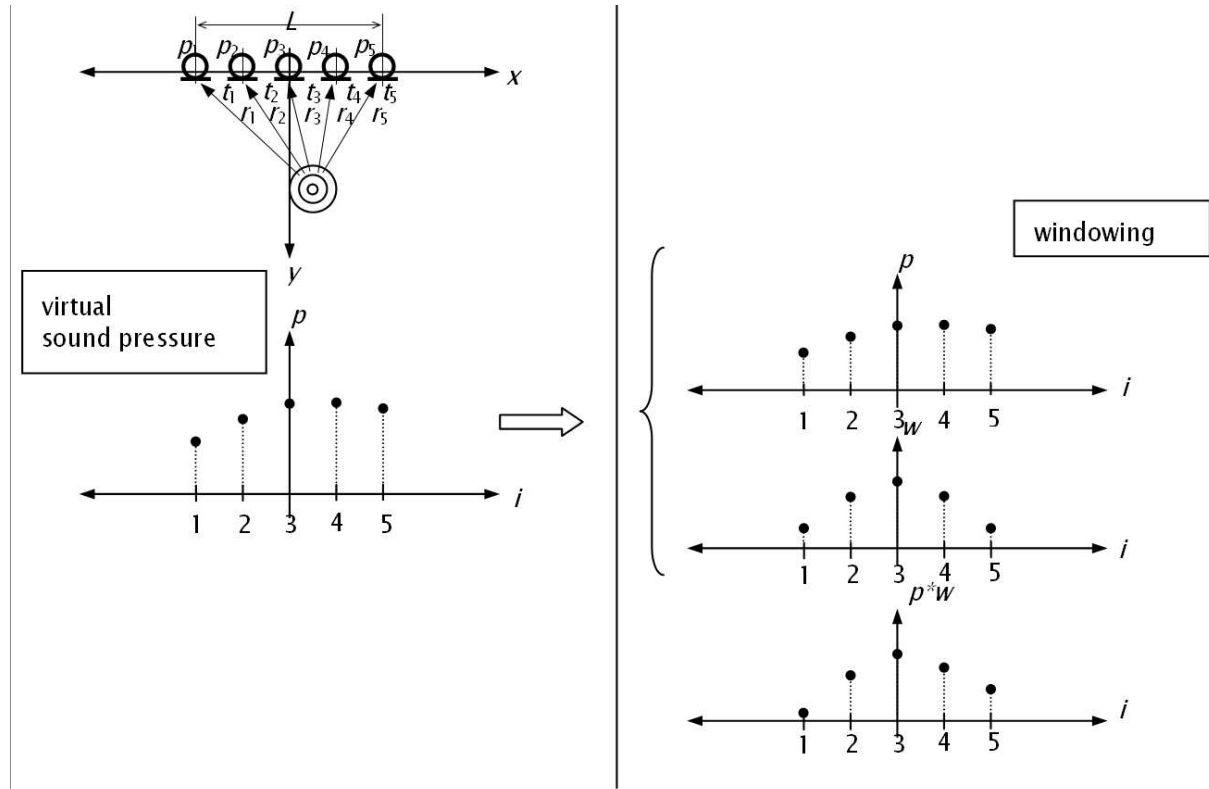


Abbildung 26: virtuelles (li) und reelles Schallfeld (re). Trigonometrische Berechnungen

5.2.1.2. zeitliche Koinzidenz

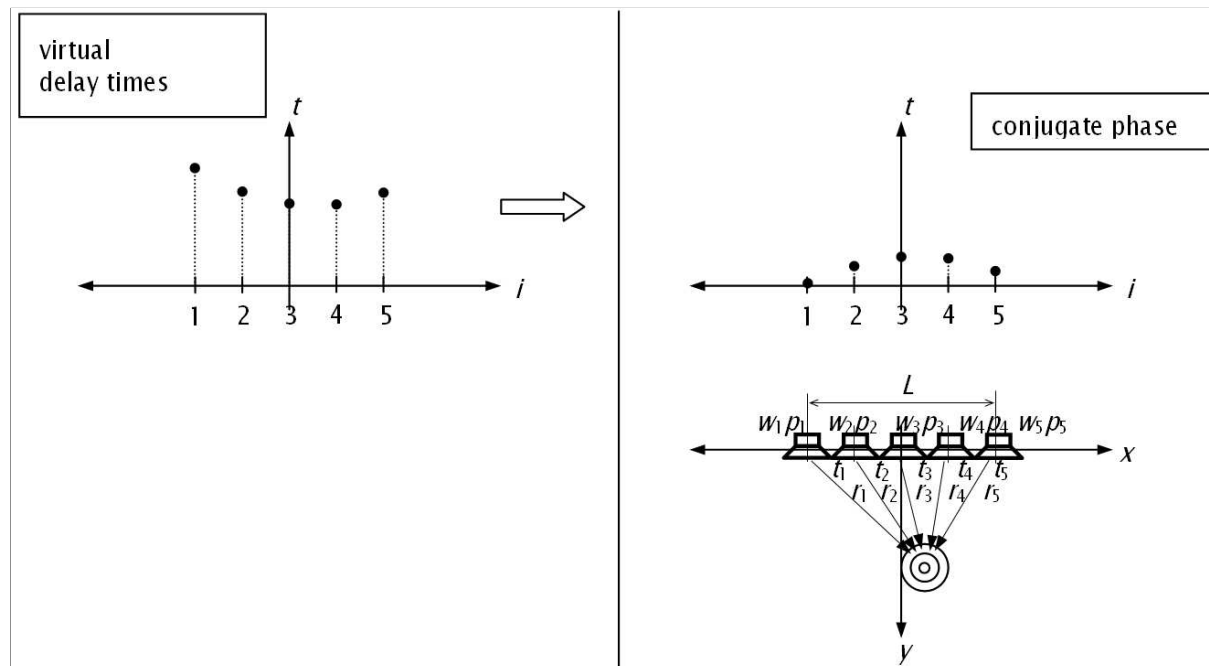


Abbildung 27: virutelles (li) und reelles Schallfeld (re). Herstellen der zeitlichen Koinzidenz

Vor einer Wiedergabe wird zum Herstellen der zeitlichen Koinzidenz am Abhörpunkt die Phase konjugiert.

5.2.1.3. Fensterung – Ermitteln eines Fensters

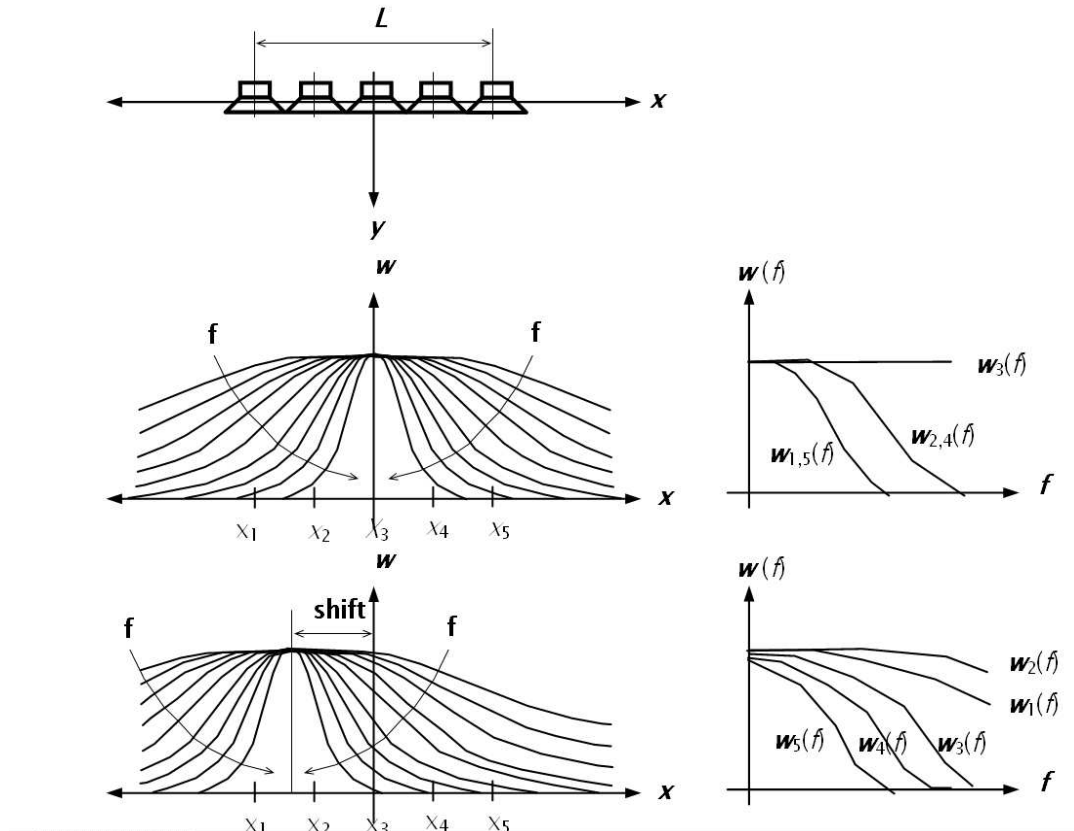


Abbildung 28: window-lookup. Parameter f , $x(i)$, shift

Das Bewertungsfenster für den Schalldruck wird durch frequenzabhängige Stauchung/Dehnung eines Fensters in x -Richtung ermittelt. Zudem ist es möglich das Fensterzentrum zu verschieben. Aus den einzelnen Fenstern ergeben sich an jedem Lautsprecher ($x_1 \dots x_N$) Frequenzgänge.

5.2.2. Frequenzgangkorrektur

Durch Absenkung hoher Frequenzanteile in den Fensterfrequenzgängen, muss auf die verarbeiteten Signale eine Frequenzgangkorrektur angewandt werden. Bei doppelter Frequenz ist in etwa nurmehr die Hälfte der Lautsprecher in Betrieb, das wäre eine gewöhnliche Hochpasscharakteristik 1. Ordnung.

Grenzbereiche in der Umsetzung:

1. Tiefe Frequenzen: ist das Bewertungsfenster länger als die Lautsprecherzeile, steigt die Anzahl der betriebenen Lautsprecher (und ihre Amplitude) bei fallender Frequenz nicht weiter, der abgegebene Schallpegel bleibt konstant.
2. Hohe Frequenzen:
 - a. Liegt der Mittelpunkt des Bewertungsfensters auf einer Lautsprecherposition, so ist das Bewertungsfenster am betreffenden Lautsprecher für alle Frequenzen 1. Ab der Frequenz, bei welcher nur mehr dieser Lautsprecher betrieben wird, fällt die abgegebene Schallenergie bei steigender Frequenz nicht weiter.
 - b. Liegt das Fensterzentrum zwischen zwei Lautsprechern kann es sein, dass hochfrequente Signalanteile ganz unterdrückt werden.
3. Randposition des Fensters: Veränderung der Ordnung der Hochpasscharakteristik (Ordnung 1/2).

In der Steuerung wird wegen zahlreicher Ausnahmen kein HP 1. Ordnung verwendet. Der Kehrwert des Summenschallpegels am Hörort ergibt die

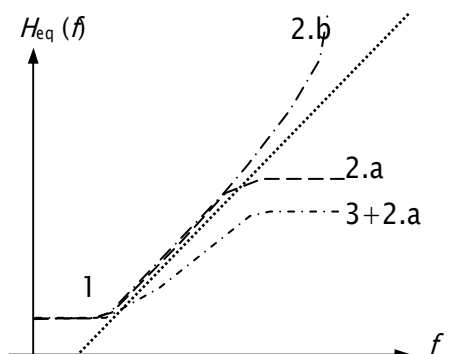


Abbildung 29: Frequenzgangkorrektur

Frequenzgangkorrektur, die keine zusätzlichen Ressourcen benötigt, da sie zu den Lautsprecherblockfiltern dazumultipliziert werden kann.

5.2.3. Blockfilterung

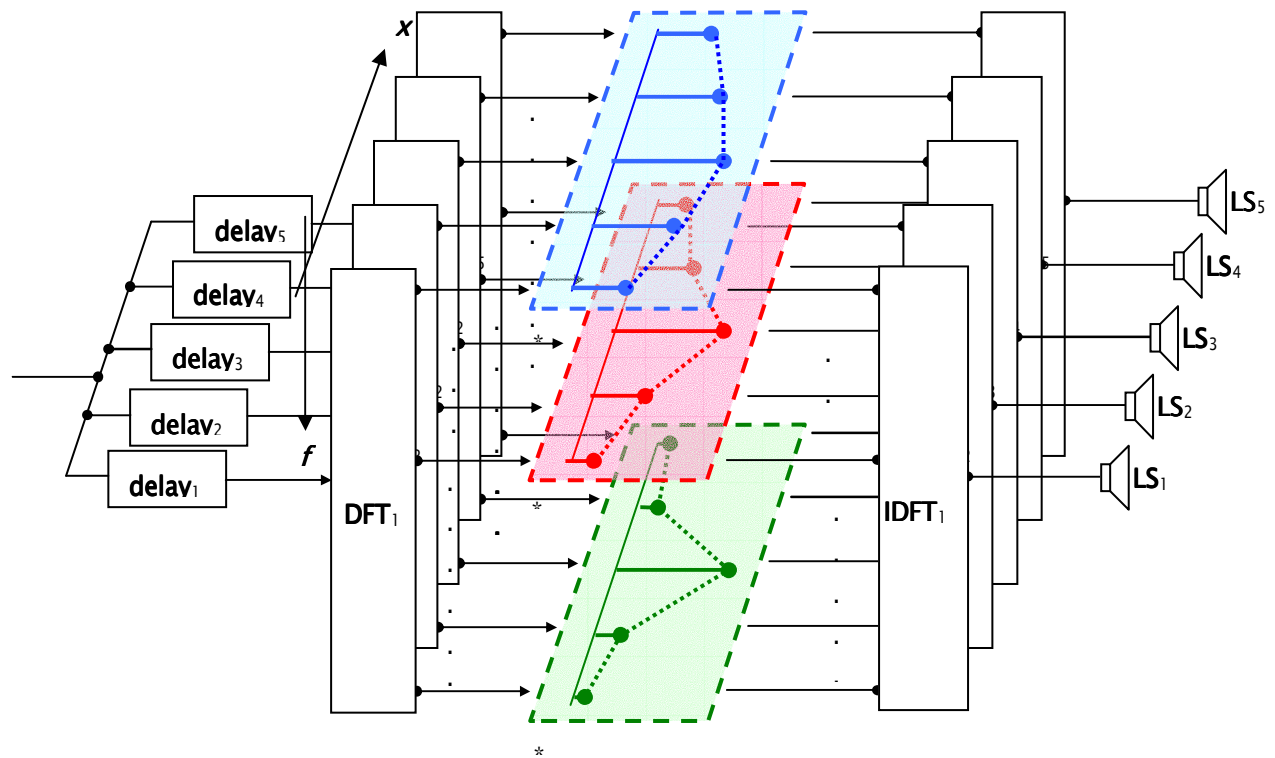


Abbildung 30: Blockfilterung/Fensterung. Frequenzgang in f , Fenster in x -Richtung

Bei der Blockfilterung kann mit downgesampten Signalen gearbeitet werden. In der Steuerung wird von 44,1 kHz auf 11,025 kHz heruntergesampled, da das verwendete Signal nur 4 kHz Nutzbandbreite hat.

5.2.4. CPU-Auslastung

Durch das 4-fach-Downsampling steigt die CPU-Auslastung des verwendeten 800 MHz PCs auch bei der Signalverarbeitung für 8 Lautsprecher nicht über 18% an.

5.3 Gemeinsame Hörprobe

Im Zuge einer Besichtigung des Instituts IEM seitens Frequentis wurde das als Versuchsaufbau realisierte System in seiner Wirkungsweise vorgeführt. Im Vergleich der gerichteten Lautsprecherzeilen-Abstrahlung zur ungerichteten Abstrahlung des Einzellautsprechers konnten in der gemeinsamen Hörprobe erhebliche Unterschiede hörbar gemacht werden. Das dynamische Auslenken der Schallfeldkonzentration wurde auch vorgeführt.

5.3.1. Diskussion der Ergebnisse

Eine dynamische Arbeitsplatzbeschallung ist möglich und sinnvoll. Die Ausblendung des Übersprechens auf benachbarte Arbeitsplätze funktioniert bei passender Raumakustik (geringe Nachhallzeit, wenig kritische Reflexionsflächen), kann allerdings keine Wunder wirken. Der Unterschied zu einem einzelnen Strahler ist im Vergleich ohne Schwierigkeit festzustellen.

6. Literatur

- [1] Analyse und Synthese akustischer Spektren, Michael Möser, 1988, Springer
- [2] Discrete-Time Signal Processing, Oppenheim/Schafer/Buck, 2nd Ed., 1998, Prentice Hall
- [3] E. Verheijen, Diplomarbeit 1997, Delft University of Technology, Netherlands

Fußnote

- [*] pd: Pure Data von Miller Puckette, eine grafische Programmierumgebung zur Echtzeit-Signalverarbeitung

7. Anhang A: Berechnungen

8. Anhang B: Tracking (Christoph Krall)