

Praktische Evaluierung von Verfahren zur Schallfokussierung und Erzeugung von individualisierten Hörzonen

Masterarbeit

Raphael Kapeller, BSc

Graz 2018

Institute of Electronic Music and Acoustics
University of Music and Performing Arts Graz

Graz University of Technology

Assessor: Univ.Prof. Dr. Robert Höldrich
Supervisor: DI Markus Zaunschirm

Kurzfassung

Die Generierung von individualisierten Hörzonen bietet neue Nutzungsmöglichkeiten der Schallwiedergabe. Zonen, in denen das Audiomaterial hörbar sein soll, werden als helle Zonen definiert und jene Bereiche, in denen dasselbe Material nicht hörbar sein soll, als dunkle Zonen. In der Literatur wurden verschiedenen Ansätze zur Erzeugung von Hörzonen vorgestellt: *time reversal mirror (TRM)*, *brightness control (BC)*, *acoustic contrast control (ACC)*, *acoustic energy difference maximization (AEDM)*, *planarity control (PC)* und *pressure matching (PM)*. In dieser Arbeit werden die vorgestellten Verfahren simuliert und anhand eines kreisförmigen Lautsprecherarrays mit 32 Kanälen, das die Zonen umschließt, in einem reflexionsarmen Raum praktisch umgesetzt. Zur Evaluierung werden sowohl messtechnische Größen (*Kontrast, Arrayaufwand, Planarität*) als auch qualitative Beschreibungen des Höreindrucks in den generierten Zonen herangezogen. Die qualitativen Beschreibungen werden durch Hörversuche mit erfahrenen ProbandenInnen ermittelt und anschließend ausgewertet und diskutiert. Abschließend werden die Methoden für ein kuppelförmiges Lautsprecherarray mit 24 Kanälen und ein kompaktes Lautsprecherarray mit 20 Kanälen in reflektiver Umgebung realisiert und getestet.

Abstract

The generation of individual sound zones offers new possibilities for audio playback. Zones where an audio material should be audible are defined as bright zones, and zones where the same material is inaudible are defined as dark zones. Different algorithms to generate soundzones were introduced in literature: *time reversal mirror (TRM)*, *brightness control (BC)*, *acoustic contrast control (ACC)*, *acoustic energy difference maximization (AEDM)*, *planarity control (PC)*, and *pressure matching (PM)*. In this thesis, the suggested methods are simulated and practically implemented in an anechoic room using a 32 channel circular loudspeaker array surrounding the sound zones. For evaluation, measured quantities (*acoustic contrast, control effort, planarity*) and perceptual attributes characterizing the spatial and sound quality are used. The perceptual attributes are found with an elicitation process employing experienced listeners. The results from formal listening experiments are then discussed. Finally, the methods are implemented and evaluated for a 24 channel loudspeaker hemisphere and a 20 channel compact loudspeaker array in reflective environment.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Verfahren zur Schallfokussierung und zur Erzeugung von individualisierten Hörzonen	5
2.1	Messgrößen	7
2.2	Verfahren zur Schallfokussierung	9
2.2.1	Delay and Sum Beamforming - DS	9
2.2.2	Time-reversal mirroring - TRM	10
2.3	Verfahren zur Erzeugung von individualisierten Hörzonen	11
2.3.1	Brightness Control - BC	11
2.3.2	Acoustic Contrast Control - ACC	13
2.3.3	Acoustic Energy Difference Maximization - AEDM	15
2.3.4	Planarity Control Optimization - PC	16
2.3.5	Pressure Matching - PM	20
3	Evaluierung der Methoden zur Erzeugung individualisierter Hörzonen in einem reflexionsarmen Raum	23
3.1	Praktische Umsetzung der Methoden in einem reflexionsarmen Raum	23
3.1.1	Berechnung der Steuervektoren \mathbf{q}	25
3.1.2	Regularisierung und Konditionszahl der zu invertierenden Matrizen zur Berechnung der Steuervektoren	27
3.1.3	Entzerrungsfilter	31
3.2	Evaluierung der umgesetzten Methoden mittels physikalischer Größen in einem reflexionsarmen Raum	34
3.2.1	Energieverteilung, Kontrast und Planarität für die simulierten Steuervektoren	34
3.2.2	LS-Gewichte und \mathbf{r}_E -Vektoren	42
3.2.3	Stereo-Wiedergabe mit PC und PM	52

3.2.4	Messung kreisförmiges LS-Array	52
3.2.5	Vergleich Simulation zu Messung kreisförmiges LS-Array . . .	53
3.3	Evaluierung der umgesetzten Methoden mittels Hörversuchen in einem reflexionsarmen Raum	56
3.3.1	Lokalisation und Plausibilität	61
3.3.2	Distanz	62
3.3.3	Richtung und Öffnungswinkel	64
3.3.4	Robustheit der Lokalisation, Richtung und Lautheit	68
3.3.5	Qualität der Wiedergabe	71
3.3.6	Sprach- und Rauschwiedergabe in unterschiedlichen Zonen . .	72
3.3.7	Zusammenfassung der Ergebnisse	73
4	Schallfokussierung und Erzeugung von Hörzonen in reflektiver Umgebung	75
4.1	Messaufbau für den akustisch nicht bearbeiteten Raum	75
4.2	CUBE-LS-Kuppel	78
4.2.1	Auswirkungen auf die Funktionalität der Methoden bei Variation der Länge der Raumimpulsantworten für die Auswertung	88
4.2.2	Auswirkungen auf die Funktionalität der Methoden bei Variation der Länge der Steuervektoren	89
4.2.3	Messung CUBE-LS-Kuppel	93
4.3	Ikosaeder-Lautsprecher	95
4.3.1	Auswirkungen auf die Funktionalität der Methoden bei Variation der Länge der Raumimpulsantworten für die Auswertung	103
4.3.2	Auswirkungen auf die Funktionalität der Methoden bei Variation der Länge der Steuervektoren	104
5	Zusammenfassung	109
6	Appendix	111
	Bibliography	117

Kapitel 1

Einleitung

Mit der steigenden Anzahl an elektronischen Geräten mit audio-visuellen Wiedergabemöglichkeiten im alltäglichen Umfeld des modernen Menschen, steigt die akustische Belastung in einem Raum durch gleichzeitige Wiedergabe mehrerer Quellen. Die Verwendung von Kopfhörern bietet eine Möglichkeit der Abgrenzung von Audiomaterialien, hat aber den Nachteil, dass auch akustische Quellen der Umwelt in großem Maße gedämpft werden. Ein neuer Lösungsansatz ist die Wiedergabe von Audiosignalen über Lautsprecher bei gleichzeitiger Fokussierung auf einen definierten Bereich im Raum. So besteht die Möglichkeit, den Raum in mehrere Zonen einzuteilen und mit gewünschten Audiosignalen zu versorgen, ohne andere Bereiche zu stören.

Bereiche, in denen ein bestimmtes Signal hörbar sein soll, werden in der Literatur als *helle Zone/bright zone* bezeichnet und jene, die nicht beschallt werden sollen, als *dunkle Zone/dark zone* [CK02], [JE08], [JOMA11], [BZPA15], [Oli14].

Die technische Umsetzung zur Generierung von individualisierten Hörzonen ist Gegenstand gegenwärtiger Forschungsarbeit. In den Arbeiten von Olik [Oli14], Coleman [Col14], sowie Bethlehem et. al. [BZPA15] wird die Problematik bei der Erstellung von individualisierten Hörzonen beschrieben, und es wird eine Einteilung über die Art des Verfahrens als (i) Optimierung der Schallenergiedichte (*sound energy control*) und (ii) Schallfeldsynthese (*sound field synthesis*) vorgenommen. In dieser Arbeit wird nicht auf die Methoden der Schallfeldsynthese (Ambisonics, Wellenfeldsynthese) eingegangen. Eine Ausnahme bildet das Verfahren *Pressure Matching*, das strenggenommen in die Kategorie der Schallfeldsynthese aufzunehmen wäre.

Die in dieser Arbeit untersuchten Methoden werden in die Kategorien (I) Schallfokussierung und (II) Erzeugung von individualisierten Hörzonen eingeteilt. Unter Schallfokussierung versteht man jene Methoden, die den Schall an einem Punkt im Raum bündeln. Im Gegensatz dazu wird bei den Methoden zur Erzeugung von indivi-

dualisierten Hörzonen die Schallenergiedichte in einem definierten Bereich optimiert. Die behandelten Methoden sind:

I Schallfokussierung

- Delay and Sum Beamforming - DS
- Zeitumkehrspiegel/Time-reversal mirroring - TRM

II Erzeugung von individualisierten Hörzonen

- Brightness Control - BC
- Acoustic Contrast Control - ACC
- Acoustic Energy Difference Maximization - AEDM
- Planarity Control Optimization - PC
- Pressure Matching - PM

Die Definitionen und Beschreibungen der Methoden werden in Kap.2 angegeben. In Kap.3.1 wird die praktische Umsetzung der Methoden mit Hilfe eines Lautsprecher-Arrays bestehend aus 32 Lautsprechern (LS), die kreisförmig um zwei definierte Zonen angeordnet sind, beschrieben. Als Raum wird der reflexionsarme Messraum des IEM in Graz verwendet. Die Berechnung der Steuervektoren \mathbf{q} erfolgt in *Matlab* unter Verwendung von simulierten Übertragungsfunktionen. Neben der Realisierung der Methoden für dieses Setup wird auf die physikalischen Messgrößen *Kontrast*, *Planarität* und *Arrayaufwand* eingegangen, anhand derer die Methoden vergleichbar gemacht werden (Kap.3.2). Neben den physikalischen Messgrößen werden die Methoden mit Hilfe eines Hörversuchs evaluiert und qualitativ beschrieben. Die Evaluierung der Daten bietet einerseits die Möglichkeit, die Ergebnisse der Messgrößen mit den Daten des Hörversuchs zu vergleichen, aber auch, Aspekte der räumlichen Wahrnehmung als Vergleichswerte der Methoden miteinzubeziehen. Die räumlichen Aspekte wie *Lokalisation*, *Distanz*, *Richtung* und *Quellbreite* werden ebenso wie die Robustheit der Methoden gegenüber Bewegung in den Zonen von den HörversuchsteilnehmerInnen beurteilt. Außerdem wird die Qualität der Wiedergabe mit Hilfe eines Präferenzvergleichs evaluiert. Im letzten Teil des Hörversuchs wird der Kontrastwert von Sprache in einer Zone im Vergleich zu einem Störer in der benachbarten Zone bestimmt. Die Ergebnisse werden in Kap.3.3 präsentiert.

Im abschließenden Teil der Arbeit werden zwei LS-Arrays zur Schallfokussierung und Erzeugung von individualisierten Hörzonen in einer reflektiven Umgebung verwendet. Die simulierten Übertragungsfunktionen werden durch in einem realen Raum gemessene Übertragungsfunktionen ersetzt und die Steuervektoren anhand der gemessenen Daten berechnet. Verwendet wird die CUBE-LS-Kuppel [ZSR03], bestehend aus 24 LS sowie ein kompaktes Lautsprecherarray in Form eines Ikosaeder-LS [ZS07] mit 20 koaxialen Membranen im Zentrum der Ikosaederflächen. Es werden die physikalischen Messgrößen der einzelnen Methoden verglichen und die verwendeten LS-Arrays einander gegenübergestellt.

Kapitel 2

Verfahren zur Schallfokussierung und zur Erzeugung von individualisierten Hörzonen

In dieser Arbeit wird auf zwei Verfahren der Schallfokussierung sowie auf fünf Verfahren der Erzeugung von individualisierten Hörzonen eingegangen. Im folgenden Teil werden allgemeine Größen und deren Schreibweise definiert. Gängige Messgrößen werden in Kap.2.1 definiert. Anschließend werden die Methoden in Kap.2.2 und Kap.2.3 näher erklärt.

Eine typisches Aufstellungsszenario für die Erzeugung von Hörzonen wird in Abb.2.1 gezeigt, wobei die Position, Form und Anzahl der Zonen beliebig definiert werden kann. In den Zonen befinden sich die Messpunkte bzw. Mikrophone, deren Positionen im karthesischen Koordinatensystem als Vektoren $\mathbf{x}_A^{(m_A)} = [x^{(m_A)}, y^{(m_A)}, z^{(m_A)}]^T$ definiert sind, wobei $(\cdot)_A$ den Zonen- und $m_A = [1, 2, \dots, M_A]$ den Mikrophonindex bezeichnet. Die Position eines LS mit Index $n = [1, 2, \dots, N]$ wird in einem Vektor $\mathbf{x}^{(n)}$ angegeben.

Der Schalldruck $p(\mathbf{x}_A^{(m_A)}, \omega)$ an einem Mikrophon m_A ergibt sich zu

$$p(\mathbf{x}_A^{(m_A)}, \omega) = \sum_{n=1}^N h(\mathbf{x}_A^{(m_A)} | \mathbf{x}^{(n)}, \omega) q(\mathbf{x}^{(n)}, \omega), \quad (2.1)$$

wobei $h(\mathbf{x}_A^{(m_A)} | \mathbf{x}^{(n)}, \omega)$ die Übertragungsfunktion zwischen Lautsprecher n und Mikrophon m_A im Frequenzbereich und $q(\mathbf{x}^{(n)}, \omega)$ das Steuersignal des LS n ist. Die Gleichungen werden in dieser Arbeit im Allgemeinen im Frequenzbereich angegeben, weshalb die Abhängigkeit von der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ in weiterer Folge nicht mehr

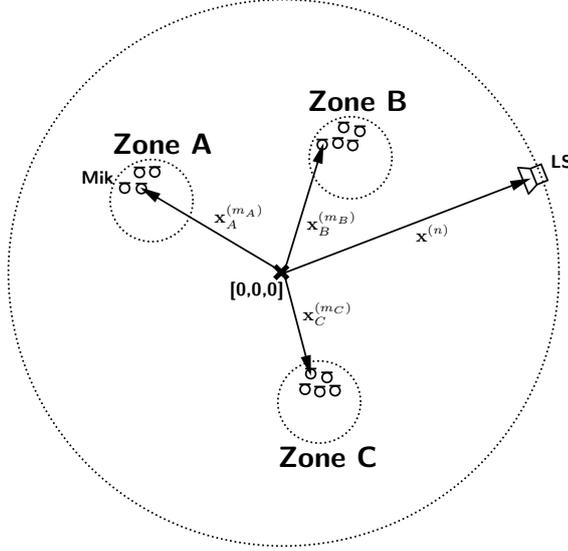


Abbildung 2.1: Typisches Aufstellungsszenario für die Erzeugung von individualisierten Hörzonen. Definition der Zonen und der Mikrofon- $\mathbf{x}_A^{(m_A)}$, $\mathbf{x}_B^{(m_B)}$, $\mathbf{x}_C^{(m_C)}$ und Lautsprecherpositionsvektoren $\mathbf{x}^{(n)}$.

explizit angeführt wird

$$p(\mathbf{x}_A^{(m_A)}) = \sum_{n=1}^N h(\mathbf{x}_A^{(m_A)} | \mathbf{x}^{(n)}) q(\mathbf{x}^{(n)}). \quad (2.2)$$

Der Schalldruck für alle Mikrophone M in einer Zone lässt sich in Matrixnotation wie folgt anschreiben

$$\mathbf{p}_A = \mathbf{H}_A \mathbf{q}, \quad (2.3)$$

wobei

$$\mathbf{p}_A = [p(\mathbf{x}_A^{(1)}), \dots, p(\mathbf{x}_A^{(m_A)}), \dots, p(\mathbf{x}_A^{(M_A)})]^T \quad (2.4)$$

$$\mathbf{q} = [q^{(1)}, \dots, q^{(n)}, \dots, q^{(N)}]^T \quad (2.5)$$

als Schalldruckvektor der Zone A und LS-Steuervektor bezeichnet werden. Die Übertragungsfunktionsmatrix \mathbf{H}_A beinhaltet alle Kombinationen der Übertragungsfunktionen zwischen Mikrofonen und Lautsprechern

$$\mathbf{H}_A = \begin{bmatrix} h(\mathbf{x}_A^{(1)} | \mathbf{x}^{(1)}) & \dots & h(\mathbf{x}_A^{(1)} | \mathbf{x}^{(N)}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h(\mathbf{x}_A^{(M_A)} | \mathbf{x}^{(1)}) & \dots & h(\mathbf{x}_A^{(M_A)} | \mathbf{x}^{(N)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\mathbf{h}_A^{(1)})^T \\ \vdots \\ (\mathbf{h}_A^{(M_A)})^T \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

Die Zeilen der Übertragungsfunktionsmatrix \mathbf{H}_A werden durch die Übertragungsfunktionen von allen LS $n = [1, 2, \dots, N]$ zu einem Mikrophon mit Index m_A gebildet

$$\mathbf{h}_A^{(m_A)} = \left[h(\mathbf{x}_A^{(m_A)} | \mathbf{x}^{(1)}), \dots, h(\mathbf{x}_A^{(m_A)} | \mathbf{x}^{(N)}) \right]^T. \quad (2.7)$$

Der Schalldruckvektor der hellen Zone \mathbf{p}_b bzw. der dunklen Zone \mathbf{p}_d wird aus den Schalldruckvektoren der vorhandenen Zonen A,B,C, usw. definiert, wodurch beliebige Kombinationen als helle bzw. dunkle Zone definiert werden können, z.B.: $\mathbf{p}_b = [\mathbf{p}_A, \mathbf{p}_B]^T$ und $\mathbf{p}_d = [\mathbf{p}_C, \mathbf{p}_D]^T$. In dieser Arbeit wird von einem Setup mit zwei Zonen (A und B) ausgegangen, wobei jeweils Zone A oder Zone B als helle bzw. dunkle Zone definiert werden kann. Die Indizes *bright* $(\cdot)_b$ und *dark* $(\cdot)_d$ bezeichnen allgemein die ausgewählte helle bzw. dunkle Zone.

2.1 Messgrößen

Vor der Definition der Methoden werden im folgenden Abschnitt die physikalischen Messgrößen vorgestellt, die eine Aussage über die Performance der Methoden ermöglichen. Es werden drei Messgrößen definiert [Oli14]:

- *Kontrast*

Der Kontrast K gibt Aufschluss über das Verhalten in den definierten Zonen. Er beschreibt die Dämpfung zwischen zwei Zonen durch das logarithmische Verhältnis der Summe der quadrierten Schalldrücke von heller Zone zu dunkler Zone. Hohe Kontrastwerte geben eine gute Trennung zwischen heller und dunkler Zone an. Der Operator $(\cdot)^H$ bezeichnet eine hermitsch transponierte Matrix¹.

$$K = 10 \log_{10} \left(\frac{\mathbf{p}_b^H \mathbf{p}_b}{\mathbf{p}_d^H \mathbf{p}_d} \right). \quad (2.8)$$

- *Arrayaufwand*

Der Arrayaufwand AE ist eine Messgröße des Wiedergabesystems. Er ist das Verhältnis der Summe der gesamten Arrayenergie zur Energie einer Referenzschallquelle $|q_r|^2$, die denselben Schalldruckpegel (SPL) in der hellen Zone generiert, wie das gesamte Array. Eine Randbedingung für die Simulation der Methoden ist die endliche Abstrahlenergie des LS-Arrays

$$AE = 10 \log_{10} \left(\frac{\mathbf{q}^H \mathbf{q}}{|q_r|^2} \right). \quad (2.9)$$

Das Steuersignal an der Referenzschallquelle wird mit q_r bezeichnet.

¹ $\mathbf{A}^H = (\mathbf{A}^*)^T$ ist die konjugiert komplexe und transponierte Matrix von \mathbf{A} .

- *Planarität*

Die Planarität ist wie folgt definiert

$$P = \frac{\sum_{i=0}^I w_i \mathbf{u}_i^T \mathbf{u}_\chi}{\sum_{i=0}^I w_i}, \quad (2.10)$$

wobei w_i die Energie aus der i -ten Richtung $\Theta_i \equiv [\theta_i, \varphi_i]$ ist und φ_i bzw. θ_i den Azimuth- bzw. Zenithwinkel in sphärischen Koordinaten angeben. Hier sind \mathbf{u}_i die zugehörigen Einheitsvektoren

$$\mathbf{u}_i = \begin{bmatrix} \sin(\theta_i) \cos(\varphi_i) \\ \sin(\theta_i) \sin(\varphi_i) \\ \cos(\theta_i) \end{bmatrix}. \quad (2.11)$$

Jene Richtung, welche die meiste Energie transportiert, wird mit

$$\chi = \arg \max_i w_i \quad (2.12)$$

bezeichnet. Somit beschreibt die Planarität P die Ähnlichkeit des Schallfeldes in der Zone zu jenem Schallfeld, welches eine ebene Welle aus einer bestimmten Richtung erzeugen würde und liefert Werte zwischen $(0, 1]$. Werte gegen 0 bedeuten, dass es keine Vorzugsrichtung gibt. Werte gegen 1 bedeuten, dass ein Großteil der eingestrahnten Energie einer Vorzugsrichtung zugeordnet werden kann. Dieses Verhalten ist wünschenswert, da dadurch eine hohe Homogenität der Richtungswahrnehmung der Schallenergie in der hellen Zone gewährleistet ist.

- *Energievektor \mathbf{r}_E*

Verwendet man zwei oder mehrere LS zur Wiedergabe eines Audiosignals, ist es möglich, durch unterschiedliche Gewichtungen der Signale Phantomschallquellen zwischen den LS zu erzeugen. Für zwei LS bedeutet dies, dass sich bei gleichen Gewichten die Phantomschallquelle in der Mitte zwischen den beiden LS bildet. Bei unterschiedlicher Gewichtung verschiebt sich die Phantomschallquelle in Richtung des Lautsprechers mit dem höheren Gewicht. Energievektoren oder \mathbf{r}_E -Vektoren können verwendet werden, um die empfundene Position einer Phantomschallquelle mit einem einfachen Modell zu bestimmen, wobei die Anzahl der LS nicht beschränkt ist. Die mathematische Definition der \mathbf{r}_E -Vektoren lautet [Fra13]

$$\mathbf{r}_E = \frac{\sum_{n=1}^N (q^{(n)})^2 \mathbf{u}^{(n)}}{\sum_{n=1}^N (q^{(n)})^2}, \quad (2.13)$$

wobei $\mathbf{u}^{(n)}$ der normierte Richtungsvektor vom Bezugspunkt zum LS n ist. Die Länge des Vektors $\|\mathbf{r}_E\|_2$ im Intervall $(0, 1]$ kann zur Vorhersage der Quellbreite herangezogen werden [Fra13]

$$\boldsymbol{\nu} = 186,94^\circ(1 - \|\mathbf{r}_E\|_2) + 10,7^\circ. \quad (2.14)$$

Der Maximalwert 1 wird erreicht, wenn die gesamte Energie aus einer Richtung bzw. von einem LS übertragen wird. Werte gegen 0 bedeuten, dass die Schallquellen symmetrisch um den Abhörpunkt angeordnet sind und gleich viel Energie in den Abhörpunkt einstrahlen. Dadurch wird der Betrag des Vektors zu Null gesetzt, aber es wird keine Aussage über die Schallenergie in diesem Punkt getroffen.

2.2 Verfahren zur Schallfokussierung

Im folgenden Unterkapitel werden zwei Verfahren zur Schallfokussierung (Energieüberhöhung an definierten Punkten) präsentiert.

2.2.1 Delay and Sum Beamforming - DS

Delay and Sum Beamforming (DS) wird vor allem für kompakte Mikrophonarrays verwendet. Dabei wird die Richtcharakteristik bewusst in eine Richtung gelenkt, um eine Vorzugsrichtung der Schallaufnahme zu gewährleisten. Unter Annahme der Reziprozität, durch die ein Austausch von Quellen und Senken erlaubt ist, kann DS für LS-Arrays äquivalent angewendet werden. Für kompakte LS-Arrays bedeutet dies, dass der Großteil der Schallenergie in eine Richtung gelenkt wird (*beam-steering*) und somit die Abstrahlcharakteristik bestimmt wird. Im Fall einer um den Fokuspunkt im Raum verteilten Lautsprecheraufstellung werden die Verzögerungen der Lautsprechersignale für den Fokussierungspunkt äquivalent berechnet. Die Schallenergie im Fokussierungspunkt wird durch konstruktive Interferenz der einzelnen Signale maximiert. Die relativen Verzögerungen τ_n werden anhand der Distanz Δx_n vom Fokuspunkt $\mathbf{x}^{(fp)}$ zum jeweiligen LS n berechnet. In Glg.2.16 ist die Berechnung der

Distanz Δx_n bzw. des euklidischen Abstandes angeben. Anschließend wird der maximale Abstand Δx_{max} ausgewählt und die relativen Distanzen ermittelt. Die Division durch die Schallgeschwindigkeit c ergibt die relative Verzögerung τ_n

$$\Delta x_n = \|\mathbf{x}^{(n)} - \mathbf{x}^{(fp)}\|_2 = \sqrt{(x^{(n)} - x^{(fp)})^2 + (y^{(n)} - y^{(fp)})^2 + (z^{(n)} - z^{(fp)})^2} \quad (2.15)$$

$$\tau_n = \frac{\Delta x_{max} - \Delta x_n}{c}. \quad (2.16)$$

Die nächsten LS werden im Steuervektor am stärksten verzögert und der am weitesten entfernte LS wird nicht verzögert

$$\mathbf{q}_{DS} = \begin{bmatrix} e^{-j\omega\tau_1} \\ e^{-j\omega\tau_2} \\ \vdots \\ e^{-j\omega\tau_N} \end{bmatrix}. \quad (2.17)$$

Gute Ergebnisse können im Freifeld erwartet werden. In Räumen kommt es zu einer Unschärfe durch auftretende Reflexionen an den angrenzenden Wänden. Ein weiterer Nachteil besteht in der nicht steuerbaren dunklen Zone, wodurch ein schlechter Kontrast zwischen heller und dunkler Zone zu erwarten ist.

2.2.2 Time-reversal mirroring - TRM

Durch die Anwendung einer zeitlichen Spiegelung von Übertragungsfunktionen kann Schall in einem Punkt im Raum fokussiert werden. *Time-reversal mirroring (TRM)* bezieht sich auf die Verwendung eines linearen Arrays, wohingegen ein *time-reversal cavity (TRC)* die Schallquelle/den Fokussierungspunkt umschließt (Abb.2.2).

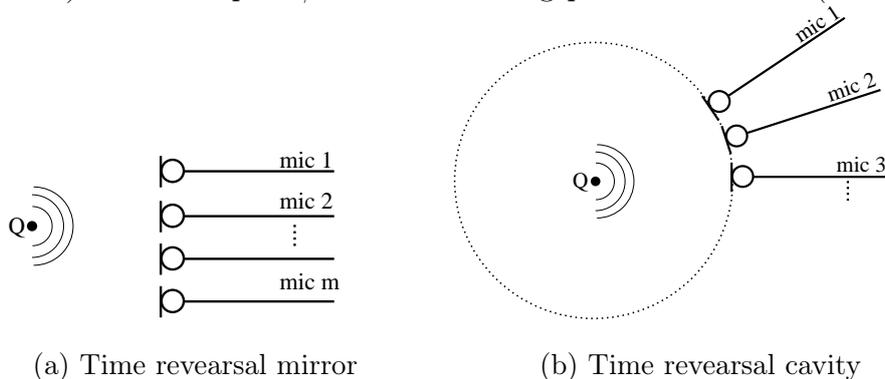


Abbildung 2.2: Grundlegende Array-Geometrien

Das Prinzip von TRM für Fokussierung von Ultraschall wird bei [Fin92] beschrieben und die Fokussierung von Schall in Räumen in [TAG⁺01], [YTF03], [FP01]. Die

Übertragungsfunktionen $h(\mathbf{x}^{(fp)}|\mathbf{x}^{(n)})$ aller LS im verwendeten Array zu einem Mikrofon im Fokuspunkt werden zeitlich gespiegelt bzw. im Frequenzbereich komplex konjugiert $(\cdot)^*$ und ergeben die Steuervektoren für TRM

$$\mathbf{q}_{TRM} = \begin{bmatrix} q^{(1)} \\ \vdots \\ q^{(n)} \\ \vdots \\ q^{(N)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h^*(\mathbf{x}^{(fp)}|\mathbf{x}^{(1)}) \\ \vdots \\ h^*(\mathbf{x}^{(fp)}|\mathbf{x}^{(n)}) \\ \vdots \\ h^*(\mathbf{x}^{(fp)}|\mathbf{x}^{(N)}) \end{bmatrix}. \quad (2.18)$$

Das Amplituden-Maximum wird zum Zeitpunkt der konstruktiven Superposition erreicht [Fin92]. Davor und danach treten aber ebenfalls Signale auf, die als Vor- und Nachechos bezeichnet werden. Bereiche außerhalb des Fokuspunktes können nicht kontrolliert werden und die Größe des Bereichs der Energieüberhöhung um den Fokussierungspunkt hängt dabei von der Arraygeometrie und der Wellenlänge der Schallwelle ab. In realen Räumen werden die Reflexionen bei TRM als Ausbreitungspfade miteinbezogen, und es sind bessere Resultate in Hinblick auf höhere Energie im Fokuspunkt als im Freifeld zu erwarten [YTF03]. Die Vor- und Nachechos sind in diesem Szenario stärker ausgeprägt. Der Vorteil von TRM ist dessen Einfachheit. Wird Linearität und Reziprozität vorausgesetzt, entspricht TRM einem räumlichen und zeitlichen *matched filter* [TAG⁺01].

2.3 Verfahren zur Erzeugung von individualisierten Hörzonen

Im folgenden Unterkapitel werden fünf Methoden zur Erzeugung von individualisierten Hörzonen beschrieben.

2.3.1 Brightness Control - BC

Unter *Brightness Control* versteht man ein Verfahren mit dem Ziel, eine hohe akustische Schallenergie in einer definierten Zone zu schaffen. Es wird nur die helle Zone definiert, in der die Energiedichte maximiert werden soll.

Die Helligkeit² ist durch die Maximierung der Schallenergiedichte in der hellen Zone definiert [CK02]. Die Schallenergiedichte e_b ist proportional zum Integral über den quadrierten Schalldruck im vorhandenen Volumen der hellen Zone V_b

²*acoustical brightness*

$$e_b = \frac{1}{V_b} \int_{V_b} p(\mathbf{x}_b^{(m_b)})^* p(\mathbf{x}_b^{(m_b)}) dV. \quad (2.19)$$

Durch Einsetzen von Glg.2.2 und Integration über alle Punkte $m_b \in V_b$ im Volumen ergibt sich die Schallenergiedichte proportional zu

$$e_b = \mathbf{q}^H \left(\frac{1}{V_b} \int_{V_b} \left(\mathbf{h}_b^{(m_b)} \right)^H \left(\mathbf{h}_b^{(m_b)} \right) dV \right) \mathbf{q} = \mathbf{q}^H \mathbf{R}_b \mathbf{q}, \quad (2.20)$$

wobei \mathbf{R}_b als räumliche Korrelations-Matrix der hellen Zone bezeichnet wird, die für den diskreten Fall näherungsweise als

$$\mathbf{R}_b \cong \mathbf{H}_b^H \mathbf{H}_b \quad (2.21)$$

definiert ist. Den optimalen Steuervektor findet man über die Maximierung der Energiedichte unter der Nebenbedingung einer endlichen Eingangsenergie (E) am LS-Array

$$\arg \max_{\mathbf{q}} \mathbf{q}^H \mathbf{R}_b \mathbf{q} \quad (2.22)$$

$$u.d.N. \mathbf{q}^H \mathbf{q} \leq E. \quad (2.23)$$

Ohne diese Nebenbedingung wird durch Maximierung von \mathbf{q} die Maximierungsaufgabe erfüllt. Für die Praxis ist diese Lösung aufgrund von Übersteuerung des Wiedergabesystems nicht anwendbar. Mit dem Lagrange-Multiplikator lässt sich die Optimierung mit Nebenbedingung als Kostenfunktion wie folgt anschreiben [CK02]

$$J_{BC}(\mathbf{q}, \alpha) = \mathbf{q}^H \mathbf{R}_b \mathbf{q} - \alpha (\mathbf{q}^H \mathbf{q} - E). \quad (2.24)$$

Durch partielles Ableiten nach \mathbf{q} und α der Kostenfunktion J_{BC} in Glg.2.24 und anschließendes *Nullsetzen* können die stationären Punkte gefunden werden [Oli14]

$$\frac{\partial J_{BC}(\mathbf{q}, \alpha)}{\partial \mathbf{q}_{BC}} = 2 (\mathbf{R}_b \mathbf{q} - \alpha \mathbf{q}) = 0$$

$$\mathbf{R}_b \mathbf{q} = \alpha \mathbf{q} \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial J_{BC}(\mathbf{q}, \alpha)}{\partial \alpha} = 2 \mathbf{q}^H \mathbf{q} - E = 0$$

$$E = \mathbf{q}^H \mathbf{q}. \quad (2.26)$$

In Glg. 2.25 ist zu erkennen, dass die Maximierung der Kostenfunktion ein Eigenwertproblem ist und somit mit Hilfe der Eigenwertzerlegung gelöst werden kann. Die

Korrelationsmatrix \mathbf{R}_b wird in die quadratische Matrix \mathbf{V} , in deren Spalten die Eigenvektoren \mathbf{v}_k stehen

$$\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1 \quad \cdots \quad \mathbf{v}_k \quad \cdots \quad \mathbf{v}_K] \quad (2.27)$$

und in die Diagonalmatrix

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & \lambda_2 & 0 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_K \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

mit den zugehörigen Eigenwerten λ_k , zerlegt

$$\mathbf{R}_b = \mathbf{V}^{-1} \Lambda \mathbf{V}. \quad (2.29)$$

Der Index $\hat{k} = \arg \max_k \lambda_k$ des größten Eigenwerts wird gesucht und der zugehörige Eigenvektor $\mathbf{v}_{\hat{k}}$ der Korrelationsmatrix \mathbf{R}_b entspricht dem optimalen Steuervektor

$$\mathbf{q}_{BC} = \mathbf{v}_{\hat{k}}. \quad (2.30)$$

Die gleiche Lösung wird durch die Formulierung mit Rayleigh-Quotienten erreicht [CK02]

$$J_{BC} = \frac{\mathbf{q}^H \mathbf{R}_b \mathbf{q}}{\mathbf{q}^H \mathbf{q}}. \quad (2.31)$$

Berechnet man \mathbf{q}_{BC} für nur einen Punkt in der hellen Zone, erhält man die gleiche Lösung wie für TRM (Vergl. Glg. 2.18). Daher kann BC als Weiterentwicklung von TRM von einem Punkt auf viele Punkte in einem Volumen bzw. in der hellen Zone gesehen werden. Die Nebenbedingung gewährleistet eine endliche Eingangsleistung am Lautsprecherarray. Es gibt keine Nebenbedingungen für die Bereiche außerhalb der hellen Zone. Wie auch bei TRM, kommt es in diesen Bereichen zu Überlagerungen von Signalen, die nicht steuerbar sind. Daher ist zu erwarten, dass der Kontrast zwischen heller und dunkler Zone nur von der Position der Zonen, der Wellenlänge des Signals und der Arraygeometrie abhängig ist.

2.3.2 Acoustic Contrast Control - ACC

Acoustic Contrast Control [CK02] ist eine Weiterführung von BC, bei der die Optimierung nicht für eine Maximierung der Schallenergiedichte in der hellen Zone, sondern für eine Maximierung des Kontrastes zwischen heller und dunkler Zone berechnet

wird. Der Kontrast wird als das Verhältnis zwischen der Schallenergiedichte e_b der hellen Zone und der Schallenergiedichte e_d der dunklen Zone definiert (vgl. Glg.2.8). Die Schallenergiedichte der hellen Zone ist bereits aus Glg.2.20 bekannt und e_d und $\mathbf{R}_d = \mathbf{H}_d^H \mathbf{H}_d$ wird analog dazu definiert

$$e_d = \mathbf{q}^H \mathbf{R}_d \mathbf{q}. \quad (2.32)$$

Choi und Kim [CK02] definieren das Maximierungsproblem als

$$J_{ACC} = \max \frac{\mathbf{q}^H \mathbf{R}_b \mathbf{q}}{\mathbf{q}^H \mathbf{R}_d \mathbf{q}}. \quad (2.33)$$

Die Lösung von \mathbf{q} kann analytisch durch partielles Ableiten nach \mathbf{q} und substituieren von J_{ACC}

$$\mathbf{R}_d^{-1} \mathbf{R}_b \mathbf{q} = J_{ACC} \mathbf{q} \quad (2.34)$$

gefunden werden. Die anschließende Eigenwertzerlegung von $\mathbf{R}_d^{-1} \mathbf{R}_b$ aus Glg.2.34 und Auswahl des Eigenvektors zum größten Eigenwert liefert den optimalen Steuervektor \mathbf{q} . Die Invertierung von \mathbf{R}_d zur Berechnung der Eigenwerte kann zu numerischen Problemen bei schlecht konditionierten Matrizen führen. Die Konditionierung ist abhängig vom physikalischen Setup des Systems. Ist die Anzahl der Mikrophone in der dunklen Zone kleiner als die Anzahl der LS, wird \mathbf{R}_d singulär [ECCK12]. Mit Hilfe einer Regularisierung können die numerischen Probleme behoben werden (vgl. Kap.3.1.2). Elliot et. al [ECCK12] formulieren das Kontrastmaximierungsproblem aus diesem Grund um. Die indirekte Formulierung minimiert die Schallenergiedichte mit der Nebenbedingung einer konstanten Schallenergiedichte in der dunklen Zone und eines endlichen Arrayaufwandes ³

$$\arg \min_{\mathbf{q}} \mathbf{q}^H \mathbf{R}_d \mathbf{q} \quad (2.35)$$

$$u.d.N. \mathbf{q}^H \mathbf{R}_b \mathbf{q} \geq A \quad (2.36)$$

$$\mathbf{q}^H \mathbf{q} \leq E. \quad (2.37)$$

³Eine andere Lösung zur Maximierung des Kontrastes wäre die Maximierung der Schallenergiedichte in der hellen Zone mit Nebenbedingung einer konstanten Energiedichte in der dunklen Zone und eines konstanten Arrayaufwands.

$$\arg \max_{\mathbf{q}} \mathbf{q}^H \mathbf{R}_b \mathbf{q}$$

$$u.d.N. \mathbf{q}^H \mathbf{R}_d \mathbf{q} \leq A$$

$$\mathbf{q}^H \mathbf{q} \leq E$$

Die Kostenfunktion kann mit Lagrange-Multiplikatoren aufgestellt werden

$$J_{ACC}(\mathbf{q}, \mu, \alpha) = \mathbf{q}^H \mathbf{R}_d \mathbf{q} + \mu(\mathbf{q}^H \mathbf{R}_b \mathbf{q} - A) + \alpha(\mathbf{q}^H \mathbf{q} - E). \quad (2.38)$$

Partielles Ableiten nach \mathbf{q} , μ und α der Glg.2.38 und anschließendes *Nullsetzen* ergibt die stationären Punkte, wobei die Lösung von $\frac{\partial J_{ACC}(\mathbf{q}, \mu, \alpha)}{\partial \mathbf{q}} = 0$ in folgender Gleichung dargestellt ist

$$-\mathbf{R}_b^{-1}(\mathbf{R}_d + \alpha \mathbf{I}) \mathbf{q} = \mu \mathbf{q}. \quad (2.39)$$

Für das Minimierungsproblem wird der Eigenvektor zum kleinsten Eigenwert gesucht, dies ist allerdings äquivalent zum Eigenvektor des größten Eigenwertes der Inversen. Das bedeutet, in Glg.2.40 kann $-\mathbf{R}_b^{-1}(\mathbf{R}_d + \alpha \mathbf{I})$ invertiert werden und ergibt folgende Gleichung

$$(\mathbf{R}_d + \alpha \mathbf{I})^{-1} \mathbf{R}_b \mathbf{q} = \mu \mathbf{q}. \quad (2.40)$$

In dieser Gleichung wird α zum Regularisierungsparameter der zu invertierenden Matrix. Mit Hilfe der Eigenwertzerlegung wird der Eigenvektor $\mathbf{v}_{\hat{k}}$ zum größten Eigenwert $\hat{k} = \arg \max_k \lambda_k$ gesucht und ergibt die optimale Lösung des Steuervektors

$$\mathbf{q}_{ACC} = \mathbf{v}_{\hat{k}}. \quad (2.41)$$

2.3.3 Acoustic Energy Difference Maximization - AEDM

Acoustic Energy Difference Maximization wurde von Shin et.al 2010 [SLF⁺10] vorgestellt und maximiert die Energiedifferenz zwischen der hellen Zone und der dunklen Zone. Bei dieser Methode kann mit Hilfe eines Steuerparameters ζ eingestellt werden, ob die Energiedifferenz oder die maximale Energie in der hellen Zone als das entscheidende Kriterium festgelegt wird. Das Maximierungsproblem kann folgend dargestellt werden

$$\arg \max_{\mathbf{q}} \mathbf{q}^H \mathbf{R}_b \mathbf{q} - \zeta \mathbf{q}^H \mathbf{R}_d \mathbf{q} \quad (2.42)$$

$$u.d.N. \mathbf{q}^H \mathbf{q} \leq E \quad (2.43)$$

und die Kostenfunktion kann mit Hilfe von Lagrange-Multiplikatoren formuliert werden

$$J_{AEDM}(\mathbf{q}, \alpha) = \mathbf{q}^H \mathbf{R}_b \mathbf{q} - \zeta \mathbf{q}^H \mathbf{R}_d \mathbf{q} - \alpha(\mathbf{q}^H \mathbf{q} - E). \quad (2.44)$$

Aus Glg. 2.44 ist die Funktion des Steuerparameters ζ erkennbar. Wird $\zeta = 0$ gesetzt, wird der AEDM-Ansatz gleich dem Maximierungsproblem von BC (Glg. 2.24).

In diesem Fall wird die Schallenergiedichte in der hellen Zone maximiert. Für einen steigenden Wert von $\zeta \geq 1$ wird eine stärkere Gewichtung auf die Minimierung der Energie in der dunklen Zone gelegt. Partielles Ableiten und anschließendes *Nullsetzen* liefert nach der Eigenwertzerlegung von $(\mathbf{R}_b - \zeta \mathbf{R}_d)$ und der Auswahl des Eigenvektors $\mathbf{v}_{\hat{k}}$ des größten Eigenwertes $\lambda_{\hat{k}}$ mit Index $\hat{k} = \arg \max_k \lambda_k$ den optimierten Steuervektor $\mathbf{q}_{AEDM} = \mathbf{v}_{\hat{k}}$. Der Vorteil dieses Ansatzes besteht in der Robustheit der Methode, da keine Matrixinvertierung zur Berechnung der Steuervektoren durchzuführen ist. Der Nachteil besteht in der empirischen Ermittlung für die Auswahl des Parameters ζ .

2.3.4 Planarity Control Optimization - PC

Planarity Control Optimization ist eine weitere Methode zur Optimierung des Kontrasts zwischen den Zonen [CJOP13]. Als Nebenbedingung werden allerdings nur gewisse Einstrahlungsrichtungen erlaubt. Die Optimierung findet jene Richtungen aus den erlaubten Einstrahlungsrichtungen, die den maximalen Kontrast in den Zonen liefern [Oli14]. Es entsteht ein planares Schallfeld ohne explizite Definition der Einstrahlungsrichtung durch das zur Verfügung stellen eines Bereichs der Einstrahlungsrichtungen. Durch dieses Vorgehen sollen die Nachteile der Methoden der Energieoptimierung (oft nicht vorhersagbare Schalldruckverteilung in den Zonen) und der Methoden der Schallfeldsynthese (geringer Kontrast zwischen den Zonen) durch Kombination der Vorgehensweisen ausgeglichen werden. Das Kontrastmaximierungsproblem kann wie für ACC auf verschieden Arten dargestellt werden. Die folgende Gleichung zeigt die indirekte Formulierung, bei der die Schallenergiedichte in der dunklen Zone minimiert wird. Die Nebenbedingungen fordern einen endlichen Arrayaufwands und eine konstanten Energiedichte in der hellen Zone für die ausgewählten Einstrahlungsrichtungen

$$\arg \min_{\mathbf{q}} \mathbf{q}^H \mathbf{R}_d \mathbf{q} \quad (2.45)$$

$$u.d.N. \mathbf{q}^H \mathbf{H}_b^H \mathbf{B}^H \mathbf{\Gamma} \mathbf{B} \mathbf{H}_b \mathbf{q} \geq A \quad (2.46)$$

$$\mathbf{q}^H \mathbf{q} \leq E. \quad (2.47)$$

Die Beamformergewichtsmatrix \mathbf{B} beinhaltet eine diskrete Anzahl an Einstrahlungsrichtungen $i = [1, 2, \dots, I]$ und die Diagonalmatrix $\mathbf{\Gamma}$ dient zur Auswahl der gewünschten Richtung(en). Die zugehörige Kostenfunktion zum Minimierungsproblem ist in Glg.2.62 angegeben. Zuvor wird auf die Beamformer für PC eingegangen. Das

Beamformerausgangssignal Ψ ergibt sich zu

$$\mathbf{\Psi} = \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \vdots \\ \Psi_I \end{bmatrix} = \mathbf{B}\mathbf{p}, \quad (2.48)$$

und die *steered-response-power* bzw. der Energiefluss für die i -te Richtung ergibt sich zu

$$w_i = \frac{1}{2} \Psi_i^* \Psi_i. \quad (2.49)$$

Der Energiefluss der einzelnen Richtungen wird in einem Vektor $\mathbf{w} = [w_1, \dots, w_I]^T$ eingetragen. Die Besetzung der Beamformergewichtsmatrix \mathbf{B} kann auf unterschiedliche Weise durchgeführt werden. Eine Möglichkeit bietet der Ansatz eines DS-Beamformers, bei dem die Steuermatrix analytisch unter der Annahme von ebenen Wellen berechnet wird. Das bedeutet, die Steuermatrix

$$\mathbf{B}_{ds} = \begin{bmatrix} b(\mathbf{x}_A^{(1)} | \mathbf{u}_1) & \dots & b(\mathbf{x}_A^{(1)} | \mathbf{u}_I) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b(\mathbf{x}_A^{(M)} | \mathbf{u}_1) & \dots & b(\mathbf{x}_A^{(M)} | \mathbf{u}_I) \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

besteht aus den Übertragungsfunktionen

$$b(\mathbf{x}_A^{(m)} | \mathbf{u}_i) = e^{j\omega \mathbf{x}_A^{(m_A)} \mathbf{u}_i \frac{1}{c}} \quad (2.51)$$

zwischen den Mikrofonen $m = [1, 2, \dots, M]$ und den Einstrahlungsrichtungen $i = [1, 2, \dots, I]$ der ebenen Welle, berechnet über Green'sche Funktionen für das Freifeld.

Coleman et. al. [CJOP13] stellen eine weitere Definitionsmöglichkeit der Matrix \mathbf{B} vor, die sie als *superdirective beamforming* bezeichnen. Dabei werden für jede Hauptrichtung i die errechneten Green'schen Funktionen in einen Durchlassbereich \mathbf{B}_{pb} (*pass beam*) mit den Richtungen $\mathbf{u}_{i'} \mathbf{u}_i \leq \sigma_{pb}$ (als Cosins zwischen der Hauptrichtung i und den Passbandrichtungen i') und in einen Sperrbereich \mathbf{B}_{sr} (*stop range*) mit den Richtungen $\mathbf{u}_{i''} \mathbf{u}_i \geq \sigma_{pb}$ eingeteilt und als Matrix wie zuvor dargestellt

$$\mathbf{B}_{pb} = \begin{bmatrix} b(\mathbf{x}_A^{(1)} | \mathbf{u}_{i'=1}) & \dots & b(\mathbf{x}_A^{(M)} | \mathbf{u}_{i'=1}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b(\mathbf{x}_A^{(1)} | \mathbf{u}_{i'=I'}) & \dots & b(\mathbf{x}_A^{(M)} | \mathbf{u}_{i'=I'}) \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_{sr} = \begin{bmatrix} b(\mathbf{x}_A^{(1)} | \mathbf{u}_{i''=1}) & \dots & b(\mathbf{x}_A^{(M)} | \mathbf{u}_{i''=1}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b(\mathbf{x}_A^{(1)} | \mathbf{u}_{i''=I''}) & \dots & b(\mathbf{x}_A^{(M)} | \mathbf{u}_{i''=I''}) \end{bmatrix}. \quad (2.52)$$

Um zwischen dem räumlichen Durchlassbereich und dem Sperrbereich einen Übergangsbereich zu ermöglichen, muss $\sigma_{pb} < \sigma_{sr}$ gelten.

Der Beamformergewichtsvektor $\mathbf{b}_{sd}^{(i)}$ für eine Hauptrichtung i wird durch Eigenwertzerlegung von $(\mathbf{B}_{sr}^H \mathbf{B}_{sr})^{-1} \mathbf{B}_{pb}^H \mathbf{B}_{pb}$ und Auswahl des Eigenvektors zum maximalen Eigenwert $\lambda_{\hat{k}}$ für jede Richtung des Beamformers gefunden

$$\mathbf{b}_{sd}^{(i)} = \mathbf{v}_{\hat{k}} \quad \text{mit} \quad \hat{k} = \arg \max_k \{\lambda_k\}, \quad (2.53)$$

und bilden die Beamformergewichtsmatrix

$$\mathbf{B}_{sd} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{sd}^{(1)} & \dots & \mathbf{b}_{sd}^{(I)} \end{bmatrix}. \quad (2.54)$$

Anstelle der von Coleman et. al. [CJOP13] definierten Gruppierung von Durchlass- und Sperrbereich kann ein *superdirective beamformer* im klassischen Sinn verwendet werden. Im Vergleich zu einem DS-Beamformer erreicht der SD-Beamformer eine höhere Direktivität, wodurch Signalanteile aus anderen Richtungen als der gewünschten Richtung stark unterdrückt werden. Die Beamformergewichtsmatrix \mathbf{B}_{sd} wird für definierte Richtungen und Frequenzen im Vorhinein berechnet. Der *superdirective beamformer* wird im folgenden Teil beschrieben.

Ein beliebiges akustisches Signal Y_m kann aus einem Nutzsignal S_m und einem Störanteil V_m zu $Y_m = S_m + V_m$ zusammengesetzt werden. Um einen optimalen Beamformer zu realisieren, muss die Energie des Arrayausgangssignals minimiert werden, unter der Nebenbedingung, dass in der ausgewählten Richtung des Beams eine unverzerrte Signalwiedergabe gegeben ist [BW01]. Das bedeutet, die triviale Lösung wird ausgeschlossen $\mathbf{B}_{sd}^H \mathbf{h}_{sd}^{(i)} = 0$, wobei der Übertragungsfunktionsmatrix $\mathbf{h}_{sd}^{(i)}$ über Green'schen Funktionen für das Freifeld berechnet wird

$$\mathbf{h}_{sd}^{(i)} = \begin{bmatrix} e^{j\omega \mathbf{x}^{(1)} \mathbf{u}_i \frac{1}{c}} \\ \vdots \\ e^{j\omega \mathbf{x}^{(M)} \mathbf{u}_i \frac{1}{c}} \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

oder mit gemessenen Übertragungsfunktionen besetzt wird. Das Optimierungsproblem wird folgend dargestellt

$$\arg \min_{\mathbf{q}} \mathbf{B}_{sd}^H \Phi_{YY} \mathbf{B}_{sd} \quad (2.56)$$

$$u.d.N. \mathbf{B}_{sd}^H \mathbf{h}_{sd}^{(i)} = 1. \quad (2.57)$$

Die Korrelationsmatrix Φ_{YY} bezeichnet die spektrale Leistungsdichte (*Power Spectral Density* - PSD). Sie errechnet sich aus den Erwartungswerten der Signale an den unterschiedlichen Mikrofonpositionen

$$\Phi_{YY} = \mathcal{E}\{Y_m Y_m^H\} = \begin{bmatrix} \Phi_{Y_1 Y_1} & \cdots & \Phi_{Y_1 Y_M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{Y_M Y_1} & \cdots & \Phi_{Y_M Y_M} \end{bmatrix}. \quad (2.58)$$

Für die Optimierung in Glg.2.56 wird nur die Störkorrelationsmatrix Φ_{VV} verwendet, da der Störanteil minimiert werden soll und eine perfekte Übereinstimmung der gewünschten Richtung und der eingestellten Blickrichtung des Arrays angenommen wird [BW01]. Dadurch ändert sich der allgemeine Ansatz aus Glg.2.56 zu

$$\arg \min_{\mathbf{q}} \mathbf{B}_{sd}^H \Phi_{VV} \mathbf{B}_{sd} \quad (2.59)$$

Der Beamformergewichtsvektor $\mathbf{b}_{sd}^{(i)}$ wird folgend berechnet (*Minimum Variance Distortionless Response* - MVDR):

$$\mathbf{b}_{sd}^{(i)} = \frac{\Phi_{VV}^{-1} \mathbf{h}_{sd}^{(i)}}{\mathbf{h}_{sd}^{(i)H} \Phi_{VV}^{-1} \mathbf{h}_{sd}^{(i)}}. \quad (2.60)$$

Die Beamformergewichtsvektoren werden in die Beamformergewichtsmatrix \mathbf{B}_{sd} eingesetzt (vgl. Glg.2.54). Wird die Mikrofoncharakteristik als ideale Kugel angenommen, kann Φ_{VV} in vereinfachter Form für jede Kombination aus Mikrofonen m und $o = [1, 2, \dots, M]$ folgend berechnet werden

$$\begin{aligned} \Phi_{VV} &= \frac{A_m(\omega) A_o^*(\omega)}{2} \int_0^\pi e^{-j\omega(\mathbf{x}^{(m)} - \mathbf{x}^{(o)})^T \mathbf{u}_i \frac{1}{c}} \sin\theta d\theta \\ &= A_m(\omega) A_o^*(\omega) \operatorname{sinc} \left(\frac{\omega(\mathbf{x}^{(m)} - \mathbf{x}^{(o)})^T \mathbf{u}_i}{c} \right), \end{aligned} \quad (2.61)$$

wobei $A_m(\omega) = a_m(\omega) e^{-j\psi_m(\omega)}$ die Mikrofoncharakteristik in Betrag und Phase darstellt. Für die weitere Berechnung des Steuervektors \mathbf{q}_{PC} zur Erzeugung individualisierter Hörzonen bleibt das Optimierungsproblem ident für jede Auswahl von \mathbf{B} . Die Diagonalmatrix $\mathbf{\Gamma}$ in der Kostenfunktion in Glg.2.62 dient zur Auswahl der gewünschten Einstrahlungsrichtungen. Um eine einfache Anwendung zu gewährleisten, werden der Einfallswinkel φ und der Öffnungswinkel ψ definiert (Abb.2.3). Mit diesen beiden Angaben können im Fall eines zweidimensionalen Arrayaufbaus die Einheitsvektoren \mathbf{u}_i , die in diesen Grenzen liegen, gesucht werden, um sie anschließend über die Diagonalmatrix $\mathbf{\Gamma}$ auszuwählen. Für einen dreidimensionalen Arrayaufbau werden vier Winkelangaben, bestehend aus Azimutwinkel, Elevationswinkel, Öffnungswinkel-Azimuth und Öffnungswinkel-Elevation, benötigt. Dadurch entsteht ein Kugelsegment der zugelassenen Richtungen auf der Oberfläche der Einheitskugel.

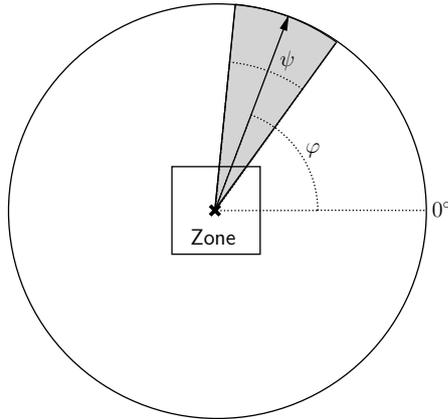


Abbildung 2.3: Definition des Richtungswinkels φ und des Öffnungswinkels ψ

Die Werte der Elemente der Diagonalmatrix $\mathbf{\Gamma}$ liegen im Intervall $[0, 1]$. Werden alle Werte bis auf einen zu 0 gesetzt, kann die Optimierung für nur eine Einstrahlungsrichtung berechnet werden. Die Kostenfunktion für PC wird aus dem Minimierungsproblem aus Glg.2.45 über den Ansatz mit Lagrange-Multiplikator folgend aufgestellt

$$J_{PC}(\mathbf{q}, \mu, \alpha) = \mathbf{q}^H \mathbf{R}_d \mathbf{q} + \mu (\mathbf{q}^H \mathbf{H}_b^H \mathbf{B}^H \mathbf{\Gamma} \mathbf{B} \mathbf{H}_b \mathbf{q} - A) + \alpha (\mathbf{q}^H \mathbf{q} - E), \quad (2.62)$$

und partielles Ableiten nach \mathbf{q}_c , μ und α und Nullsetzen liefert die stationären Punkte. Glg.2.63 gibt die Lösung für $\frac{\partial J_{PC}(\mathbf{q}, \mu, \alpha)}{\partial \mathbf{q}} = 0$ an

$$(\mathbf{R}_d + \alpha \mathbf{I})^{-1} (\mathbf{H}_b^H \mathbf{B}^H \mathbf{\Gamma} \mathbf{B} \mathbf{H}_b) \mathbf{q} = \mu \mathbf{q}. \quad (2.63)$$

Der Steuervektor \mathbf{q}_{PC} korrespondiert mit dem Eigenvektor $\mathbf{v}_{\hat{k}}$ des größten Eigenwertes $\lambda_{\hat{k}}$ mit Index $\hat{k} = \arg \max_k \lambda_k$ der Eigenwertzerlegung von $(\mathbf{R}_d + \alpha \mathbf{I})^{-1} (\mathbf{H}_b^H \mathbf{B}^H \mathbf{\Gamma} \mathbf{B} \mathbf{H}_b)$. Das Problem ist in der indirekten Form gestellt, da im zu invertierenden Term der Regularisierungsparameter α eingeführt wird (vergl. ACC Kap.2.3.2).

2.3.5 Pressure Matching - PM

Pressure Matching ist eine Methode zur Reproduktion eines Schallfeldes in einem definierten Bereich unter Verwendung von endlich vielen Monopol-Schallquellen bzw. Lautsprechern [KN93]. Dazu wird ein gewünschtes Schallfeld $\hat{\mathbf{p}}$ in der Zone mit Hilfe von ebenen Wellen modelliert. Das reproduzierte Schallfeld \mathbf{p} wird mit dem gewünschten Schallfeld verglichen und der auftretende Fehler zwischen den beiden Feldern mit Hilfe der Frobeniusnorm berechnet

$$\|\mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}}\|_F^2 = \|\mathbf{H}\mathbf{q} - \hat{\mathbf{p}}\|_F^2 = \mathbf{e}^H \mathbf{e} \quad (2.64)$$

Das Optimierungsproblem lässt sich folgend ausdrücken

$$\arg \min_{\mathbf{q}} \mathbf{e}^H \mathbf{e} \quad (2.65)$$

$$u.d.N. \mathbf{q}^H \mathbf{q} \leq E. \quad (2.66)$$

Die zugehörige Kostenfunktion lässt sich folgend darstellen [CJO⁺14]

$$J_{PM}(\mathbf{q}, \alpha) = (\mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}})^H (\mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}}) + \alpha (\mathbf{q}^H \mathbf{q} - E) = (\mathbf{H}\mathbf{q} - \hat{\mathbf{p}})^H (\mathbf{H}\mathbf{q} - \hat{\mathbf{p}}) + \alpha (\mathbf{q}^H \mathbf{q} - E) \quad (2.67)$$

In diesem Fall werden die Impulsantworten für die helle und die dunkle Zone in eine Matrix übereinander geschrieben

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_b \\ \mathbf{H}_d \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{p}}_b \\ \hat{\mathbf{p}}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{p}_b^{(1)} \\ \vdots \\ \hat{p}_b^{(M)} \\ \hat{p}_d^{(1)} \\ \vdots \\ \hat{p}_d^{(M)} \end{bmatrix}. \quad (2.68)$$

Setzt man Glg.2.68 in Glg.2.67 ein, erhält man folgende Gleichung:

$$J_{PM}(\mathbf{q}, \alpha) = (\mathbf{H}_b \mathbf{q} - \hat{\mathbf{p}}_b)^H (\mathbf{H}_b \mathbf{q} - \hat{\mathbf{p}}_b) + (\mathbf{H}_d \mathbf{q} - \hat{\mathbf{p}}_d)^H (\mathbf{H}_d \mathbf{q} - \hat{\mathbf{p}}_d) + \alpha (\mathbf{q}^H \mathbf{q} - E) \quad (2.69)$$

Für die Optimierung des Kontrastes wird die dunkle Zone zu Null gesetzt. Das bedeutet, es wird das gewünschte Schallfeld in der dunklen Zone zu $\hat{\mathbf{p}}_d = \mathbf{0}$. Dadurch vereinfacht sich Glg.2.69 zu

$$J_{PM}(\mathbf{q}, \alpha) = (\mathbf{H}_b \mathbf{q} - \hat{\mathbf{p}}_b)^H (\mathbf{H}_b \mathbf{q} - \hat{\mathbf{p}}_b) + \mathbf{q}^H \mathbf{H}_d^H \mathbf{H}_d \mathbf{q} + \alpha (\mathbf{q}^H \mathbf{q} - E). \quad (2.70)$$

Die Ableitung nach \mathbf{q} und α und *Nullsetzen* liefert die direkte Lösung für \mathbf{q} , wodurch keine Eigenwertzerlegung mehr durchgeführt werden muss

$$(\mathbf{R}_d + \mathbf{R}_b + \alpha I)^{-1} (\mathbf{H}_b^H \hat{\mathbf{p}}_b) = \mathbf{q}_{PM}. \quad (2.71)$$

Kapitel 3

Evaluierung der Methoden zur Erzeugung individualisierter Hörzonen in einem reflexionsarmen Raum

Die in Kapitel 2 vorgestellten Verfahren zur Erzeugung von individualisierten Hörzonen werden im folgenden Kapitel für eine Aufstellung wie in Abb.3.1 dargestellt umgesetzt und hinsichtlich der eingeführten Qualitätskriterien gegenübergestellt. Allgemeine Beschreibungen, Parameter und technische Umsetzungen werden in Kap.3.1 behandelt. Neben den Qualitätsbeschreibungen über Messgrößen (Kap.3.2) werden die erzeugten Hörzonen perzeptiv mittels Hörversuchen (Kap.3.3) beschrieben.

3.1 Praktische Umsetzung der Methoden in einem reflexionsarmen Raum

Zur praktischen Umsetzung der Methoden wurde der Messraum des IEM ausgewählt. Der Raum hat ein Volumen von etwa $55m^3$ und die Wände sind mit akustischen Absorbern verkleidet und nicht parallel zueinander angeordnet. Es werden 32 LS für das kreisförmige Lautsprecherarray verwendet. Der Radius des Kreises beträgt $r = 1.6m$ und die LS sind in 11.25° Schritten gleichförmig auf der Kreislinie verteilt und auf einer Höhe von $1.35m$ angeordnet. Innerhalb des Lautsprecherarrays befindet sich die helle und die dunkle Zone mit den Ausmaßen von jeweils $0.35m \times 0.35m$. Die Distanz zwischen den Innenkanten der Zonen beträgt $1m$. Wie in Abb.3.1 dargestellt, wird für die weiteren Betrachtungen der Methoden Zone A als die helle und Zone B als die dunkle Zone definiert. In diesem Fall ergeben sich die Mikrofonindizes für

die helle Zone $m_b = m_A$ und für die dunkle Zone $m_d = m_B$.

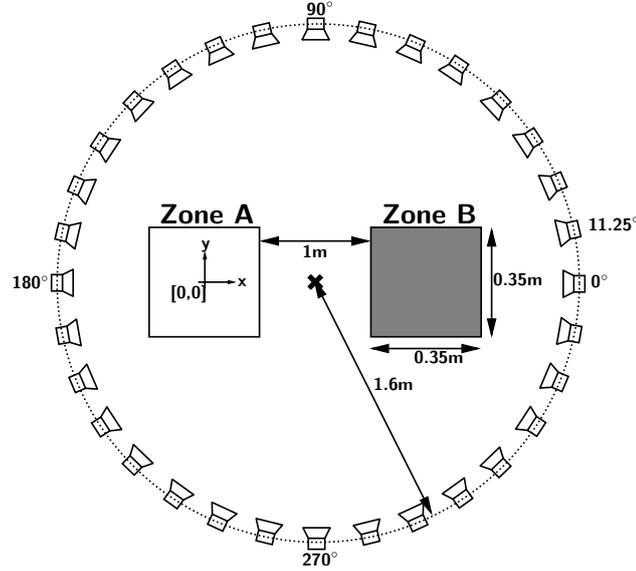


Abbildung 3.1: Aufbau kreisförmiges LS-Arrays mit der hellen Zone A links und der dunklen Zone B rechts.

Für die Anwendung im reflexionsarmen Raum werden in diesem Kapitel nur Raumimpulsantworten zwischen LS und Mikrofonen aus Simulationen verwendet. In Kap.4 werden dann gemessene Raumimpulsantworten zur Berechnung der Steuervektoren verwendet. Für die Simulation der Raumimpulsantworten werden die Zonen mit einem Raster von 8×8 Mikrofonen, die in einem Abstand von $\Delta x = \Delta y = 0.05m$ angeordnet sind, abgetastet. Die Raumimpulsantworten werden für alle Kombinationen von LS zu Mikrofonen simuliert und in einer dreidimensionalen Matrix der Form $[T \times M \times N]^1$ gespeichert. Die Raumimpulsantworten wurden mit Hilfe von *MCRoomSim* [WEJV10] generiert. In diesem Softwarepaket für *MATLAB* ist es möglich, beliebig viele Quellen bzw. Lautsprecher und Senken bzw. Mikrophone in einem virtuellen Raum zu platzieren. Der Grundriss des virtuellen Raumes ist rechteckförmig und wurde für diese Simulation mit $[l_x \times l_y \times l_z] = [4.8m \times 4.2m \times 2.7m]$ angenommen, um ein ähnliches Raumvolumen wie im Messraum des IEM zu erreichen. Die Charakteristik der LS und Mikrophone wird als kugelförmig angenommen. Da der Messraum reflexionsarm gestaltet ist, werden die frühen Reflexionen als auch der diffuse Nachhall der Raumimpulsantwort in *MCRoomSim* nicht simuliert. Die Samplingfrequenz f_s wurde auf $44100Hz$ und die Schallgeschwindigkeit c mit $343 \frac{m}{s}$ festgelegt.

¹ T steht für die Länge der Raumimpulsantworten. $T = 1246samples = 28.3ms$. M ist die Mikrofonanzahl und N ist die LS-Anzahl

3.1.1 Berechnung der Steuervektoren \mathbf{q}

Im folgenden Abschnitt wird auf Details der praktischen Umsetzung der Methoden zur Schallfokussierung und Erzeugung von individualisierten Hörzonen eingegangen. Folgende Methoden werden näher betrachtet:

- Schallfokussierung
 - Delay and Sum Beamforming - DS
 - Zeitumkehrspiegel/Time-reversal mirroring - TRM

- Hörzonen
 - Brightness Control - BC
 - Acoustic Contrast Control - ACC
 - Acoustic Energy Difference Maximization - AEDM
 - Planarity Control Optimization - PC
 - * $\text{PC}_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$
 - * $\text{PC}_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$
 - Pressure Matching - PM
 - * $\text{PM}_{\varphi=90^\circ}$
 - * $\text{PM}_{\varphi=45^\circ}$

Steuervektoren \mathbf{q} für Delay and Sum Beamforming (DS) und Time Reversal Mirroring (TRM): Die Berechnung des Steuervektors für DS ist in Glg.2.17 angegeben und die Berechnung des Steuervektors für TRM in Glg.2.18. Um die Anforderung eines endlichen Array-Aufwands $\mathbf{q}^H \mathbf{q} = 1$ zu erfüllen und um die Methoden vergleichbar zu machen, wird zusätzlich eine Normierung der Steuervektoren durchgeführt.

Steuervektoren \mathbf{q} für Brightness Control (BC) und Acoustic Contrast Control (ACC): Der Steuervektor für BC (Glg.2.30) ist durch die Eigenwertzerlegung der Matrix \mathbf{R}_b berechenbar. Für die Berechnung der Steuervektoren von ACC (Glg.2.41) muss die Inverse der Korrelationsmatrix der dunklen Zone \mathbf{R}_d^{-1} berechnet werden. Auf die Problematik, hervorgerufen durch die Invertierung, wird in Kap.3.1.2 eingegangen.

Steuervektoren \mathbf{q} für Acoustic Energy Difference Maximization (AEDM):

Die Berechnung des Steuervektors \mathbf{q} für AEDM (Kap.2.3.3) erfolgte mit einem Steuerparameter von $\zeta = 10$, wodurch eine stärkere Gewichtung auf die Minimierung der Schallenergiedichte in der dunklen Zone gelegt wird.

Steuervektoren \mathbf{q} für Planarity Control (PC):

In dieser Arbeit wurde für PC immer der Ansatz mit SD-Beamformer verwendet. Die Beamformergewichtsmatrix \mathbf{B}_{sd} (Glg.2.54) des SD-Beamformers wurde für 360 Richtungen (in der Azimutebene in 1° -Schritten) und 64 Mikrophone berechnet, wodurch sich eine Dimensionierung der Matrix von 360×64 ergibt. PC wurde für die Einstrahlungsrichtungen $\varphi = 90^\circ$ und $\varphi = 45^\circ$ berechnet. Der Öffnungswinkel betrug dabei jeweils $\psi = 10^\circ$. Bei einer Rasterung von 360 Richtungen in 1° Schritten werden daher zehn Richtungen ausgewählt, die im Bereich von $\pm 5^\circ$ der Einstrahlungsrichtung liegen.

Steuervektoren \mathbf{q} für Pressure Matching (PM):

Für PM ist es möglich, einen gewünschten Schallfeldverlauf in der hellen Zone vorzugeben. In dieser Arbeit wurde der gewünschte Schallfeldverlauf als der Verlauf, den eine ebene Welle aus einer bestimmten Richtung in der Zone erzeugen würde, definiert. Dadurch ist es möglich (ähnlich wie bei PC), eine Einstrahlungsrichtung der Schallenergie für die Berechnung der Steuervektoren (Glg.2.71) vorzugeben. Die Angabe des Öffnungswinkels entfällt für das Modell der ebenen Welle. Für die Simulation und den Hörversuch wurden die Einstrahlungsrichtungen von $\varphi = 90^\circ$ und $\varphi = 45^\circ$ berechnet. Glg.2.71 enthält die direkte Lösung für den Steuervektor \mathbf{q}_{PM} .

PM kann um einen Einstellparameter β_d erweitert werden mit dessen Hilfe die dunklen Zone gewichtet werden kann. Wird $0 \leq \beta_d < 1$ gesetzt, werden die Werte der Korrelationsmatrix \mathbf{R}_d kleiner und damit dessen Einfluss auf die zu invertierende Matrix geringer. Bei $\beta_d = 0$ wird nur noch \mathbf{R}_b regularisiert und invertiert. Bei Werten $1 < \beta_d$ werden die Werte der Korrelationsmatrix \mathbf{R}_d größer und somit relevanter für die Regularisierung und Invertierung. Für die allgemeine Simulation sowie für den Hörversuch wurden $\beta_d = 1$ gesetzt. In Kap.3.2.1 ist eine Gegenüberstellung für unterschiedliche Einstellungen von β_d ausgeführt.

$$(\beta_d \mathbf{R}_d + \mathbf{R}_b + \alpha I)^{-1} (\mathbf{H}_b^H \hat{\mathbf{p}}_b) = \mathbf{q}_{PM} \quad (3.1)$$

Wie bei DS und TRM wird auch bei PM eine Normierung des errechneten Steuervektors durchgeführt.

3.1.2 Regularisierung und Konditionszahl der zu invertierenden Matrizen zur Berechnung der Steuervektoren

Bei der Berechnung der Steuervektoren \mathbf{q} für die Methoden ACC, PC und PM muss eine Matrixinvertierung durchgeführt werden. Dabei kommt es zu numerischen Problemen wenn die Matrix schlecht konditioniert ist. Anhand der Konditionszahl einer Matrix kann die Konditionierung bestimmt werden. Die Konditionszahl κ ist der Betrag des Verhältnisses zwischen größtem zu kleinstem Singulärwert einer Matrix

$$\kappa = \left| \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}} \right| \quad (3.2)$$

und gibt die Verstärkung eines Eingangsfehlers für den ungünstigsten Fall an. Das bedeutet, gut konditionierte Matrizen ergeben kleine Konditionszahlen (≥ 1) und schlecht Konditioniert Matrizen ergeben hohe Konditionszahlen ($\gg 1$). Schlecht konditionierte Matrizen müssen regularisiert werden. In Kap.2.3.2 wurde auf die indirekte Formulierung zur Maximierung des Kontrasts eingegangen. Bei dieser Formulierung wird der Parameter α , der aus der Nebenbedingung eines endlichen Arrayaufwandes $\mathbf{q}^H \mathbf{q} \leq E$ herrührt, direkt als Regularisierungsparameter eingeführt. Die Wahl des Regularisierungsparamters beeinflusst die Performance, also den Kontrast sowie den Arrayaufwand der Methoden. Zhu et.al. [ZCWF17] stellten unterschiedliche, frequenzabhängige Ansätze zur Wahl des Regularisierungsparameters gegenüber. Unter anderem werden zwei Ansätze basierend auf der Kontrolle des Arrayaufwands getestet. Dabei wird der Parameter α gesucht, der den Arrayaufwand für jede Frequenz $AE = 10 \log_{10} \left(\frac{\mathbf{q}^H \mathbf{q}}{|q_r|^2} \right)$ optimiert. Die proportionale Energie der Referenzschallquelle soll gleich der proportionalen Energie in der hellen Zone sein, also $(q_r \mathbf{h}_r)^H (q_r \mathbf{h}_r) = \mathbf{q}^H \mathbf{R}_b \mathbf{q}$. Das bedeutet, es wird beim Ansatz EL0

$$AE_{EL0} = 10 \log_{10} \left(\frac{\mathbf{q}^H \mathbf{q}}{|q_r|^2} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{(\mathbf{q}^H \mathbf{q})(\mathbf{h}_r^H \mathbf{h}_r)}{\mathbf{q}^H \mathbf{R}_b \mathbf{q}} \right) = 0dB \quad (3.3)$$

gesetzt und der zugehörige Parameter α für die Regularisierung ausgewählt. In obiger Gleichung ist

$$\mathbf{h}_r = \left[h(\mathbf{x}_A^{(1)} | \mathbf{x}^{(r)}), \dots, h(\mathbf{x}_A^{(M)} | \mathbf{x}^{(r)}) \right]^T \quad (3.4)$$

der Übertragungsfunktionsvektor der Referenzschallquelle an der Position $\mathbf{x}^{(r)}$. Für ELM wird $10 \log_{10} \left(\frac{(\mathbf{q}^H \mathbf{q})(\mathbf{h}_r^H \mathbf{h}_r)}{\mathbf{q}^H \mathbf{R}_b \mathbf{q}} \right)$ minimiert und der dazugehörige Wert für α ausgewählt. Ein weiterer Ansatz ist SW (Singulärwert-Ansatz), der auf dem maximalen Singulärwert der zu invertierenden Matrix aufbaut und in weitere Folge genauer erklärt wird. Zhu et.al. zeigen, dass EL0 leicht *unter-robuste*, SW leicht *über-robuste* und

ELM ebenfalls leicht *über-robuste* Ergebnisse liefert. Vergleicht man diese Ansätze, werden die besten Kontrastwerte mit dem SW-Ansatz erreicht². Für alle Invertierungen in dieser Arbeit wurde eine Singulärwertzerlegung³ für die zu invertierende Matrix X der Form $X = U S V^H$ durchgeführt. Hier steht U für eine unitäre Matrix in deren Spalten die Links-Singulärvektoren stehen, S steht für eine reelle Matrix mit den Singulärwerten σ_i in der Diagonale und V^H ist die Adjungierte einer unitären Matrix in deren Spalten die Rechts-Singulärvektoren stehen. Zu den Singulärwerten σ_i in S wird ein prozentualer Faktor a_r des größten Singulärwertes σ_{max} hinzugegeben, wodurch sichergestellt wird, dass kein Eintrag der Hauptdiagonale Null ist und dadurch die Diagonalmatrix invertierbar ist. Die Berechnung der Inverse X^{-1} ist in Glg.3.6 angegeben

$$S^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1 + a_r * \sigma_{max}} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \frac{1}{\sigma_2 + a_r * \sigma_{max}} & 0 & \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_3 + a_r * \sigma_{max}} & \\ \vdots & & & \ddots \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$X^{-1} = V S^{-1} U^H. \quad (3.6)$$

Nach Invertierung der Korrelationsmatrix \mathbf{R}_d können die Steuervektoren für ACC und PC mit Hilfe einer Eigenwertzerlegung von $\mathbf{R}_d^{-1} \mathbf{R}_b$ und Auswahl des maximalen Eigenwerts gefunden werden. Die Steuervektoren werden bei der Eigenwertzerlegung in MATLAB automatisch auf 1 normiert. Die Regularisierung der zu invertierenden Matrix hat eine große Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit der Methoden. In Abb.3.2a ist der Kontrast von ACC für unterschiedliche Werte des Regularisierungsparameters a_r dargestellt. Der Kontrast berechnet sich aus dem Logarithmus der Summe der Energie in der hellen Zone A $e_b^{(m_b, f_c)}$ zur Summe der Energie in der dunklen Zone B $e_d^{(m_d, f_c)}$ (vergl. Glg.2.8)

$$K^{(f_c)} = 10 * \log \left(\frac{\sum_{m=1}^M e_b^{(m_b, f_c)}}{\sum_{m=1}^M e_d^{(m_d, f_c)}} \right). \quad (3.7)$$

Es wird eine Mittelung des Kontrastes über Terzbänder mit Mittenfrequenzen f_c durchgeführt. Die Energie $e_b^{(m_b, f_c)}$ bzw. $e_d^{(m_d, f_c)}$ wird pro Terzband mit Hilfe eines *Cosinus-Roll-Off-Filters* gemittelt. Die Mittenfrequenzen im Vektor \mathbf{f}_c sind

²Sehr gute Ergebnisse werden auch mit dem Ansatz PMO (Probability-Model Optimization) erreicht. Auf dieses Verfahren wird in dieser Arbeit allerdings nicht näher eingegangen.

³singular value decomposition - SVD

$$\mathbf{f}_c = [100, 128, 160, 200, 256, 320, \dots, 12800, 16384]^T \text{ in } Hz \quad (3.8)$$

und berechnen sich aus den 2er-Potenzen⁴ der drei Frequenzen [32, 40, 50] in Hz.

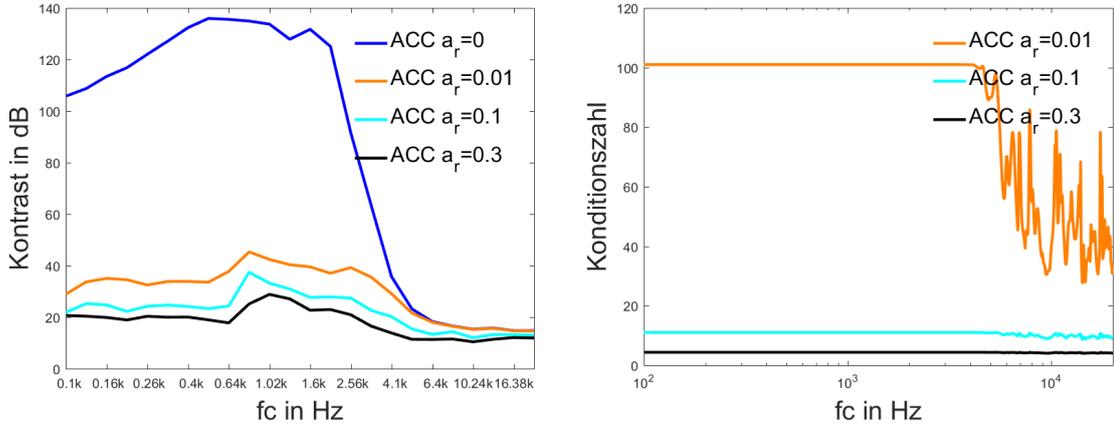
Die blaue Linie in Abb.3.2a gibt den Kontrast für ACC ohne Regularisierung ($a_r = 0$) an. Für diesen theoretischen Fall werden extrem hohe Kontrastwerte über $100dB$ unterhalb der Aliasingfrequenz

$$f_{alias} = \frac{c}{2\Delta x} = \frac{343}{0.1} = 3430Hz \quad (3.9)$$

erreicht. Die Aliasingfrequenz wird durch die diskrete Abtastung des Schallfeldes am Mikrophonarrays hervorgerufen und durch den Abstand der Abtastpunkte/der Mikrophone bestimmt. Über der Aliasingfrequenz ist die Leistungsfähigkeit und Richtigkeit der Methoden nicht mehr gewährleistet. Die Berechnung der Steuervektoren ohne Regularisierung ist für reale Anwendungen nicht möglich. In Abb.3.2b sind die Konditionszahlen für unterschiedliche Regularisierungsparameter a_r dargestellt⁵. Mit stärkerer Regularisierung bzw. Skalierung der Hauptdiagonale der zu invertierenden Matrix sinkt zwar der erreichbare Kontrast zwischen heller und dunkler Zone, aber auch die Konditionszahl κ . Somit wird das Verfahren robuster gegenüber Eingangsfehlern und Ungenauigkeiten. In Abb.3.2a erkennt man, dass die Vergrößerung des Regularisierungsparameters a_r um eine Dekade ($a_r = 0.01$ auf $a_r = 0.1$) in etwa eine Verringerung des Kontrastes um $10dB$ für ACC hervorruft.

⁴ 2^n mit $n = [0, \dots, 9]$

⁵Die Konditionszahl κ für $a_r = 0$ erreicht sehr hohe Werte im Bereich von 10^{18} und wurde daher nicht dargestellt.

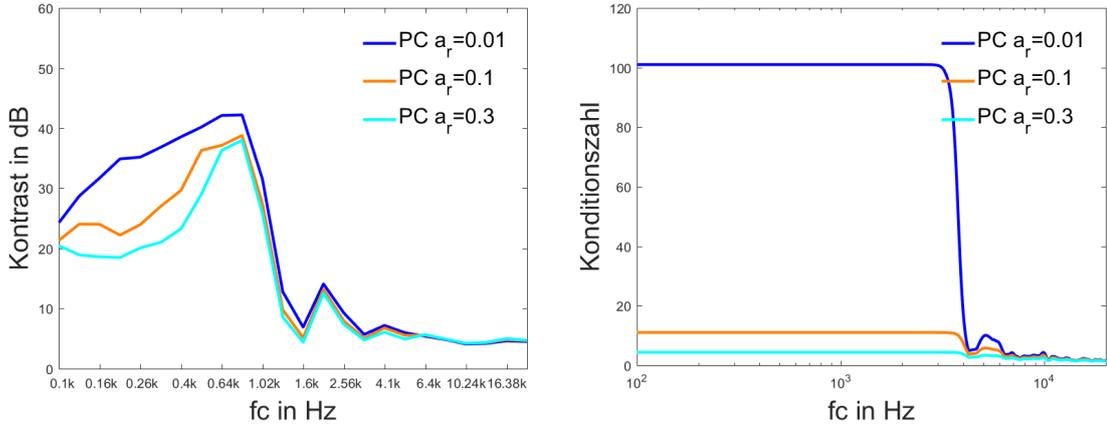


(a) Kontrast zwischen heller und dunkler Zone von ACC für unterschiedliche Regularisierungen der zu invertierenden Matrix \mathbf{R}_d über \mathbf{R}_d für ACC und PC ohne Mittelung. Terzbänder gemittelt. (b) Konditionszahl für unterschiedliche Regularisierung der zu invertierenden Matrix \mathbf{R}_d für ACC und PC ohne Mittelung. Terzbänder gemittelt.

Abbildung 3.2: Kontrast mit Regularisierungsparametern $a_r \in A_r = \{0, 0.01, 0.1, 0.3\}$ und Konditionszahl mit Regularisierungsparametern $a_r \in A_r = \{0.01, 0.1, 0.3\}$ für ACC.

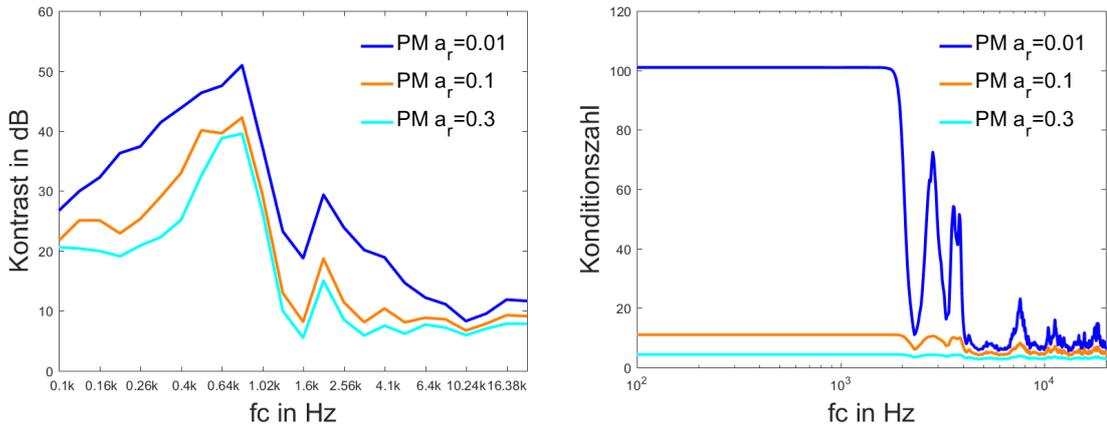
Die Verringerung des Kontrasts bei sinkender Konditionszahl ist auch für PC und PM in Abb.3.3a und Abb.3.4a für unterschiedliche Werte des Regularisierungsparameters a_r ersichtlich.

Für die weiteren Untersuchungen wurde der Regularisierungsparameter von $a_r = 0.1$ aufgrund der Konditionszahl von $\kappa = 11$ für ACC, PC und PM ausgewählt. Die Unterschiede in den Kontrastwerten für PC und PM bei unterschiedlichen Regularisierungsparametern sind nicht so stark ausgeprägt wie bei ACC. Die zu invertierende Matrix für PC ist bei der indirekten Formulierung aus Glg.2.63 dieselbe wie für ACC, wodurch in Abb.3.2b die Konditionszahl für PC und ACC dargestellt ist. In Abb.3.3b ist die Konditionszahl der invertierten Korrelationsmatrix Φ des Beamformers dargestellt.



(a) Kontrast zwischen heller und dunkler Zone für $\text{PC}_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ für unterschiedliche Werte des Regularisierungsparameters a_r . (b) Konditionszahl κ der Korrelationsmatrix Φ des superdirektiven Beamformers für $\text{PC}_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ ohne Mittelung.

Abbildung 3.3: Kontrast und Konditionszahl für $\text{PC}_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ mit Regularisierungsparametern $a_r \in A_r = \{0, 0.01, 0.1, 0.3\}$.



(a) Kontrast zwischen heller und dunkler Zone für $\text{PM}_{\varphi=90^\circ}$ für unterschiedlichen Werte des Regularisierungsparameters a_r der zu invertierenden Matrix $(\mathbf{H}_d^H \mathbf{H}_d + \mathbf{H}_b^H \mathbf{H}_b + \alpha I)$ für $\text{PM}_{\varphi=90^\circ}$ ohne Mittelung. (b) Konditionszahl κ für unterschiedliche Regularisierung der zu invertierenden Matrix $(\mathbf{H}_d^H \mathbf{H}_d + \mathbf{H}_b^H \mathbf{H}_b + \alpha I)$ für $\text{PM}_{\varphi=90^\circ}$ ohne Mittelung.

Abbildung 3.4: Kontrast und Konditionszahl für $\text{PM}_{\varphi=90^\circ}$ mit Regularisierungsparametern $a_r \in A_r = \{0, 0.01, 0.1, 0.3\}$.

3.1.3 Entzerrungsfilter

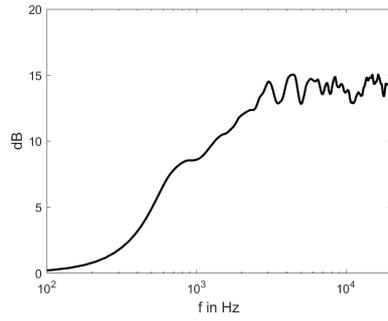
Die einzelnen Methoden bringen aufgrund der unterschiedlichen Implementierungen und Eigenschaften der Algorithmen eine Klangfärbung des Audiomaterials mit sich. Um diese Färbungen abzuschwächen, wurden Filter in die Übertragungskette eingefügt, die den Inversen der gemittelten Systemantwort entsprechen. Dieser Ausgleich

der Klangfärbungen ist speziell für die in Kap.3.3 beschriebenen Hörversuche wichtig. Die Entzerrungsfiler werden direkt am wiederzugebenden Audiosignal angewendet.

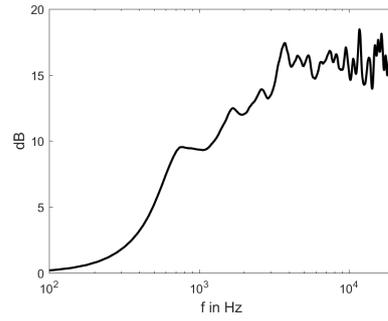
Der Schalldruck für alle 64 Abtastpunkte in der hellen Zone wird durch Faltung der simulierten Raumimpulsantworten mit den Steuervektoren \mathbf{q} für jede Methode separat ermittelt. Der Betrag des Schalldrucks $|p(\mathbf{x}_A^{(m)})|$ wird für jeden Frequenzbin über die 64 Mikrofonpositionen in der hellen Zone gemittelt $\tilde{p}_b^{(f)} = \frac{\sum_{m=1}^M |p(\mathbf{x}_A^{(m)})|}{M}$. Die Dynamik des gemittelten Schalldruckvektors wird zwischen $0dB$ (maximaler gemittelter Schalldruck der Methode) und $-20dB$ festgelegt⁶. Mit den Inversen der Frequenzgewichte $\tilde{p}_{b-1}^{(f)} = 1/\tilde{p}_b^{(f)}$ wird anschließend ein minimalphasiger Inversfilter berechnet. Dieser Ansatz wurde gewählt, da ein minimalphasiger Inversfilter nur aus dem Betrag des gemittelten Schalldrucks ermittelt werden kann, ohne Berücksichtigung der Phase. Dadurch ist die Inverse minimalphasig und kausal. Dazu wird $\tilde{p}_{b-1}^{(f)}$ in die Cepstraldomäne gebracht $C = FT^{-1} \left\{ \log(|\tilde{p}_{b-1}^{(f)}|) \right\}$, wo der akausale Anteil zu Null gesetzt wird. Die Rücktransformation in den Frequenzbereich liefert den minimalphasigen Entzerrungsfiler für die ausgewählte Methode [NA79].

Die Entzerrungsfiler wurden für die Methoden TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$, $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$, $PM_{\varphi=90^\circ}$ und $PM_{\varphi=45^\circ}$ berechnet. Die Filterkennlinien sind in Abb.3.5 dargestellt. Die Filterung bewirkt für den gemittelten Frequenzgang einen kompletten Ausgleich der Färbungen. Für nur einen oder mehrere Punkte lässt sich keine komplette Linearisierung mit diesem Filter herstellen. Da die Filterung des Wiedergabesignals nur eine allgemeine Entzerrung darstellt, muss ein Kompromiss für die gesamte Zone gefunden werden. Während der Vorbereitung für die Hörversuche (Kap.3.3) wurden die Methoden mit und ohne Filterung verglichen. Der Fall mit Filterung weist eine deutlich bessere subjektive Klangqualität auf.

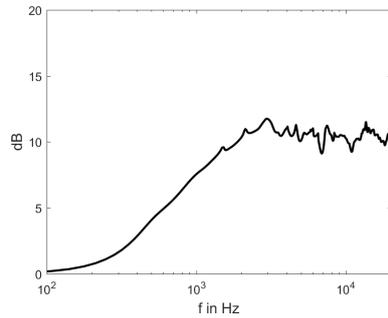
⁶Dieser Dynamikbereich ist für die Anwendung in diesem Szenario ausreichend und wird nicht überschritten, ist aber trotzdem eingefügt um sicherzugehen, dass keine Verstärkung über $+20dB$ auftreten kann.



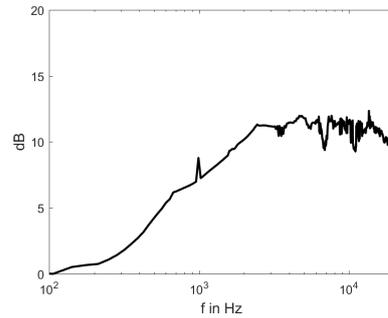
(a) Frequenzgang des minimalphasigen Inversfilters für TRM



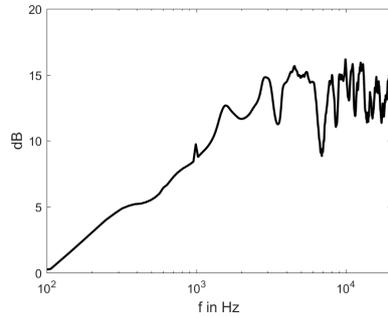
(b) Frequenzgang des minimalphasigen Inversfilters für DS



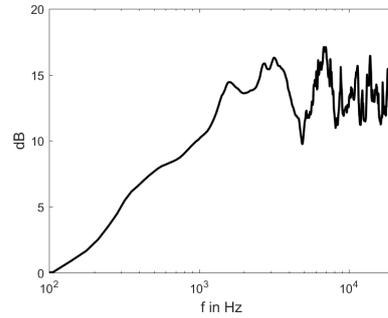
(c) Frequenzgang des minimalphasigen Inversfilters für BC



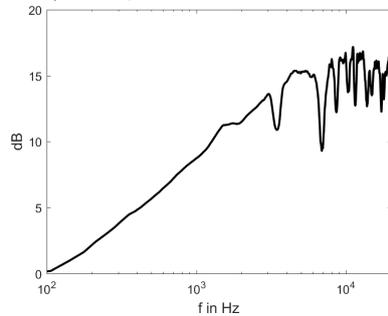
(d) Frequenzgang des minimalphasigen Inversfilters für ACC



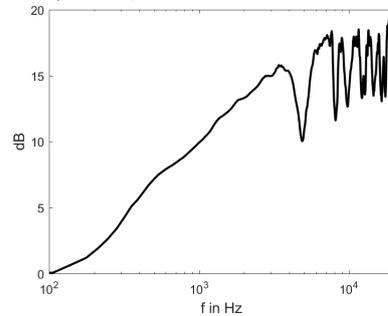
(e) Frequenzgang des minimalphasigen Inversfilters für $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$



(f) Frequenzgang des minimalphasigen Inversfilters für $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$



(g) Frequenzgang des minimalphasigen Inversfilters für $PM_{\varphi=90^\circ}$



(h) Frequenzgang des minimalphasigen Inversfilters für $PM_{\varphi=45^\circ}$

Abbildung 3.5: Frequenzgang der minimalphasigen Filter für die Methoden TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$, $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$, $PM_{\varphi=90^\circ}$ und $PM_{\varphi=45^\circ}$

3.2 Evaluierung der umgesetzten Methoden mittels physikalischer Größen in einem reflexionsarmen Raum

Dieses Unterkapitel beinhaltet die Evaluierung der Methoden mit den in Kap.3.1 beschriebenen Parametereinstellungen. Im folgenden Abschnitt werden die Daten der messtechnischen Größen für die simulierten Steuervektoren \mathbf{q} präsentiert und gegenübergestellt. Die Auswertung erfolgt ebenfalls aus Simulationsdaten. In Kap.3.2.4 werden die Ergebnisse aufgrund von sechs im Raum gemessenen Übertragungsfunktionen für die Auswertung der simulierten Steuervektoren vorgestellt.

3.2.1 Energieverteilung, Kontrast und Planarität für die simulierten Steuervektoren

Die Grundidee der Erzeugung von individualisierten Hörzonen ist eine optimale Aufteilung von Schallenergie mit einer hohen Energiedichte in der hellen Zone bei einer gleichzeitigen geringen Energiedichte in der dunklen Zone. In Abb.3.7 ist die Energieverteilung in der hellen Zone A (links) sowie der dunklen Zone B (rechts) für die unterschiedlichen Methoden dargestellt. Die Abbildung zeigt die gemittelte Energie über ein Terzband mit der Mittenfrequenz von $f_c = 640Hz$. Die Raumkoordinaten sind in Meter angegeben und mit x bzw. y bezeichnet. Der Dynamikbereich umfasst $50dB$ und ist farbig codiert. Dabei entspricht $0dB$ dem maximalen Energiewert in der hellen Zone der jeweiligen Methode für das ausgewählte Frequenzband. Die normierten Energiewerte in dB erhält man über

$$E_b^{(m_b, f_c)} = 10 * \log \left(\frac{e_b^{(m_b, f_c)}}{e_{max}^{(f_c)}} \right), \quad E_d^{(m_d, f_c)} = 10 * \log \left(\frac{e_d^{(m_d, f_c)}}{e_{max}^{(f_c)}} \right) \quad (3.10)$$

wobei $e_{max}^{(f_c)} = \max_{m_b} e^{(m_b, f_c)}$ ist.

Abb.3.7a zeigt die Energieverteilung für TRM. Der Fokussierungspunkt entspricht der Position des Mikrophons mit dem Index $m_b = 36$. Durch das Raster des Mikrophonarrays ergibt sich die exzentrische Fokussierung. Der Kontrast vom Maximum der hellen Zone zur dunklen Zone beträgt ca. $18dB$. Abb.3.7b stellt die Energieverteilung für DS dar. Die Verzögerung der Lautsprechersignale ist für das exakte Zentrum der hellen Zone berechnet. Im Vergleich zu TRM ist der Kontrast des Maximums der hellen Zone zur dunklen Zone mit ca. $14dB$ etwas geringer. BC optimiert die Energie in der hellen Zone, wodurch in Abb.3.7c die Energieverteilung in der hellen Zone

deutlich ausgeglichener ist als bei TRM und DS. Es ist kein Fokuspunkt, sondern eine Zone mit gleichförmig verteilter Energie zu erkennen. Der Kontrast zwischen dem Energiemaximum und der dunklen Zone beträgt ca. $12dB$. Abb.3.7d zeigt ACC, bei der die Optimierung des Kontrastes berechnet wird. Der Kontrast zwischen Zone A und Zone B beträgt $28dB$ für nahezu die gesamte Fläche der Zonen. AEDM in Abb.3.7e verhält sich sehr ähnlich wie ACC, mit einem etwas höherem Kontrast über die gesamte Zone. Die Einstrahlungsrichtung wurde für PC in Abb.3.7f und PM in Abb.3.7g aus $\varphi = 90^\circ$ eingestellt. PC weist für das Frequenzband $f_c = 640Hz$ den höchsten Kontrastwert von etwa $40dB$ auf.

Der erreichbare Kontrast zwischen heller und dunkler Zone ist die wichtigste der grundlegenden Eigenschaften der Methoden. Nur durch einen hohen Kontrast kann eine Separation der Schallereignisse in den Zonen ermöglicht werden. Abb.3.6 zeigt den Kontrast zwischen heller und dunkler Zone für unterschiedliche Methoden als Mittelwert der gesamten Zone (Glg.3.7).

Die Kontrast-Werte von TRM (dunkelblau), DS (orange) und BC (hellblau) in Abb.3.6 liegen im gesamten Frequenzbereich deutlich tiefer als für die restlichen Algorithmen. Ab $1kHz$ wird der Kontrast bei TRM und DS noch einmal geringer. Diese Reduktion des Kontrastes ist auf die Verkleinerung der Wellenlänge, also die Verkleinerung der Weite des Fokuspunkts in der hellen Zone, zurückzuführen (vergl. Abb.3.8). Dadurch verringert sich auch die Energie in der hellen Zone und damit der Kontrast.

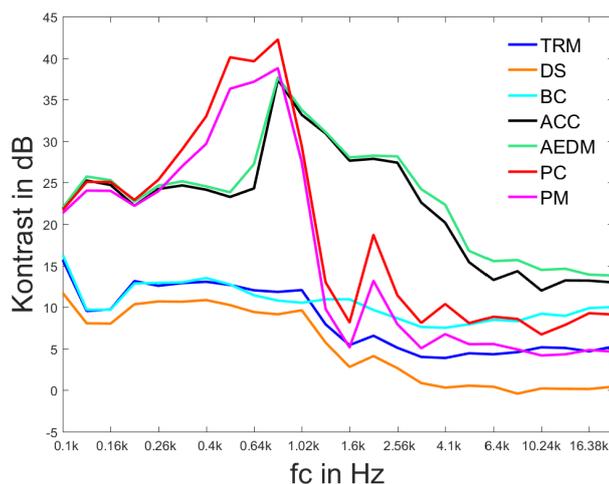


Abbildung 3.6: Kontrast zwischen heller und dunkler Zone in Terzbändern, gemittelt über alle Punkte der Zone für TRM, DS, BC, ACC, AEDM, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ und $PM_{\varphi=90^\circ}$.

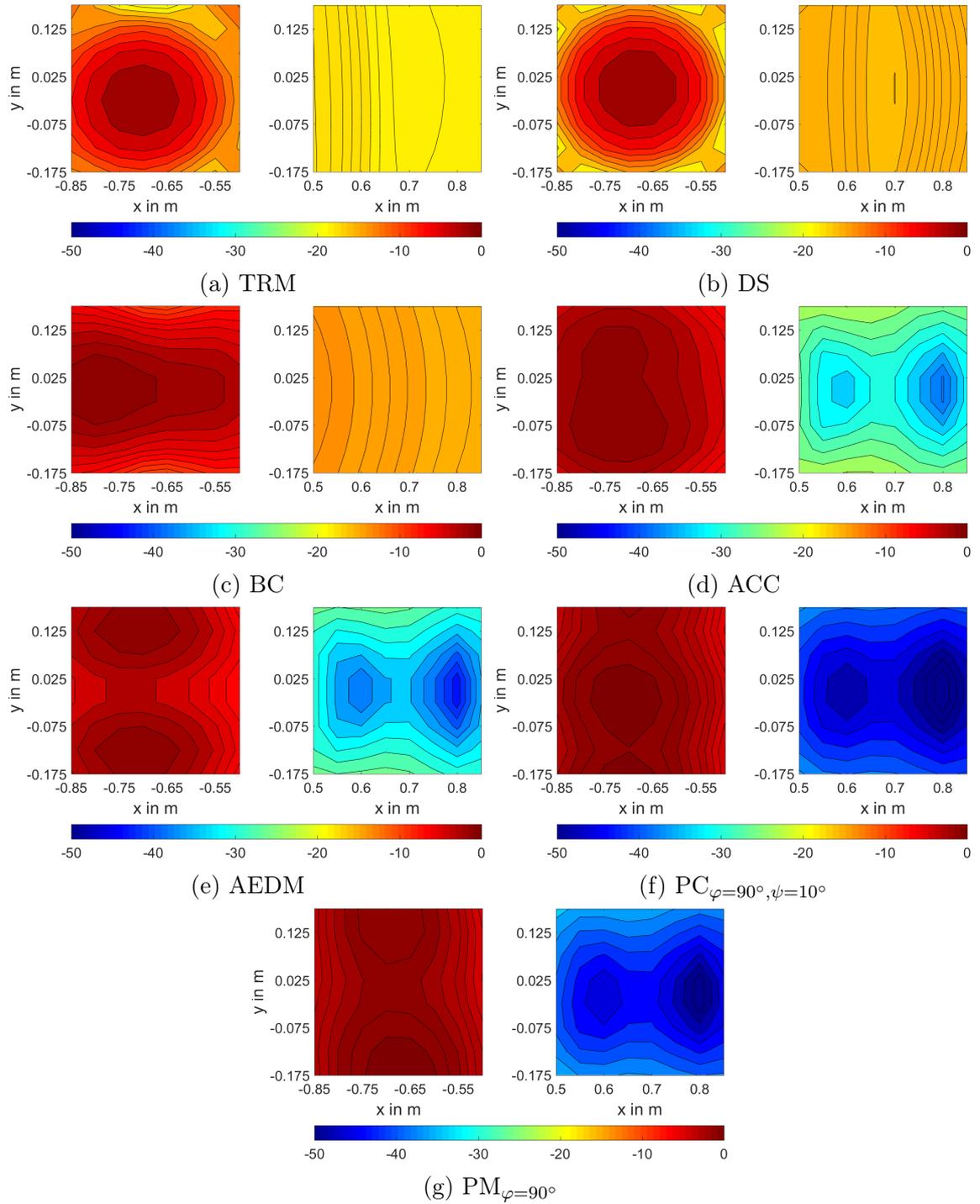


Abbildung 3.7: Energieverteilung $E_b^{(m_b, f_c)}$ und $E_d^{(m_d, f_c)}$ in dB für ein Terzband mit Mittenfrequenz $f_c = 640\text{Hz}$ in der hellen Zone A (links) und der dunklen Zone B (rechts) für TRM, DS, BC, ACC, AEDM, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ und $PM_{\varphi=90^\circ}$. Kreisförmiges LS-Array mit 32LS im Freifeld.

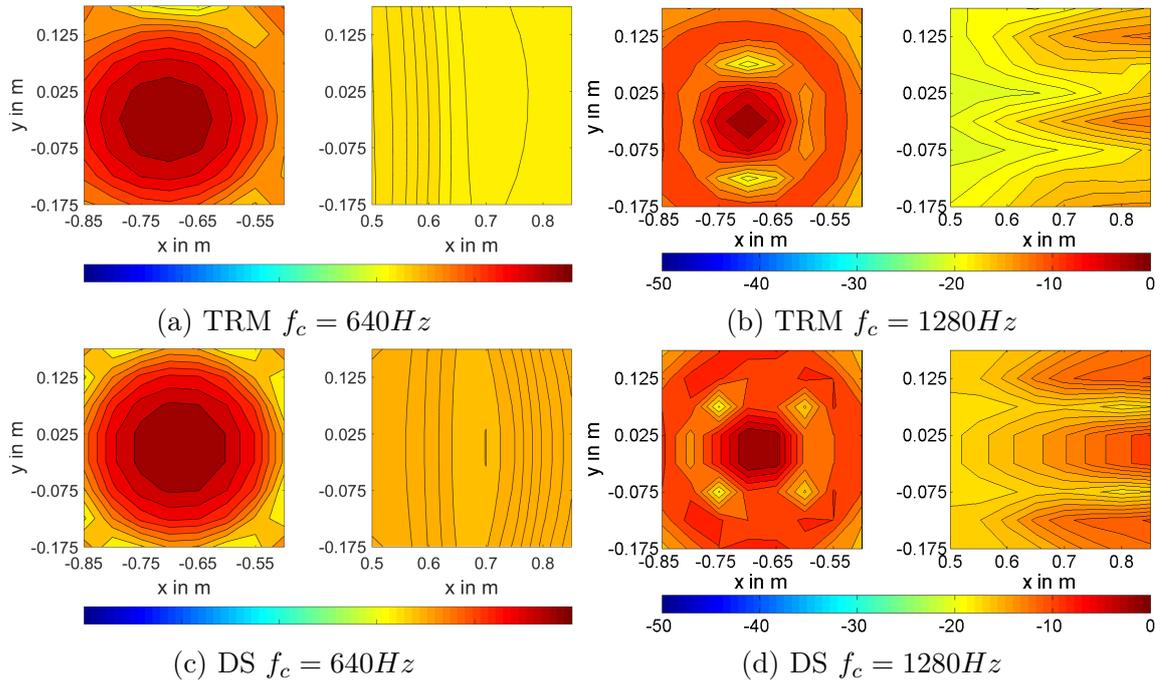


Abbildung 3.8: Energieverteilung $E_b^{(m_b, f_c)}$ und $E_d^{(m_d, f_c)}$ in dB in der hellen Zone A (links) und der dunklen Zone B (rechts) für TRM und DS, gemittelt bei unterschiedlichen Terzbändern mit Mittenfrequenzen f_c . Kreisförmiges LS-Array mit 32LS im Freifeld.

BC liefert einen relativ konstanten Kontrast bei etwa $12dB$ über dem gesamten Frequenzbereich. ACC (schwarz) und AEDM (grün) in Abb.3.6 weisen ein sehr ähnliches Verhalten auf. Für Frequenzen bis ca. $700Hz$ ergibt sich ein Kontrast von etwa $23dB$. Danach kommt es zu einem lokalen Maximum bei etwa $800Hz$. Über der Aliasingfrequenz $f_{alias} = 3.43kHz$ ergeben sich geringere Kontrastwerte. $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ (rot) weist den größten Kontrast der untersuchten Methoden im Frequenzbereich bis ca. $800Hz$ auf. Bis $300Hz$ verhält sich PC ähnlich wie ACC und AEDM, danach steigen die Kontrastwerte stark an. Die höheren Kontrastwerte im Vergleich zu ACC sind auf die Parameterwahl für PC zurückzuführen. Für die Einstrahlungsrichtung aus $\varphi = 90^\circ$ ist für dieses Setup ein hoher Kontrast zu erwarten, da es nur zu geringem Übersprechen in die dunkle Zone kommt. Der Kontrast von $PM_{\varphi=90^\circ}$ (pink) verhält sich ähnlich wie bei $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$. Es ist festzuhalten, dass nur für die Einstrahlungsrichtung von $\varphi = 90^\circ$ ein höherer Kontrast für PC und PM in diesem Setup erreichbar ist. Im Allgemeinen liefert ACC bzw. auch AEDM aufgrund der nicht vorgegebenen Einstrahlungsrichtung und daher durch weniger Nebenbedingungen einen höheren Kontrast über die gesamte Zone.

In Abb.3.9 ist die Energieverteilung von PC für die Richtungen $\varphi \in \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 180^\circ\}$ mit konstantem Öffnungswinkel von $\psi = 10^\circ$ dargestellt. Die 0° -Richtung stellt dabei den schlechtesten Fall der auswählbaren Einstrahlungsrichtung dar, da auf dem Weg zur hellen Zone die dunkle Zone durchschritten werden muss. Der Kontrast ist für unterschiedliche Einstrahlungsrichtungen in Abb.3.10a dargestellt. Dabei ist für $\varphi = 180^\circ$ der Kontrast besser als für die 0° -Richtung und der höchste Kontrast wird für $\varphi = 90^\circ$ erreicht.

In Abb.3.10b ist der Kontrast für PC für konstante Einstrahlungsrichtungen $\varphi = 45^\circ$ und variierende Öffnungswinkel $\psi \in \{10^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ, 90^\circ\}$ dargestellt. Mit steigendem Öffnungswinkel ψ wird eine größere Anzahl an Einstrahlungsrichtungen zugelassen. Das bedeutet, die Methode wird weniger eingeschränkt und es kommt zu höheren Kontrastwerten.

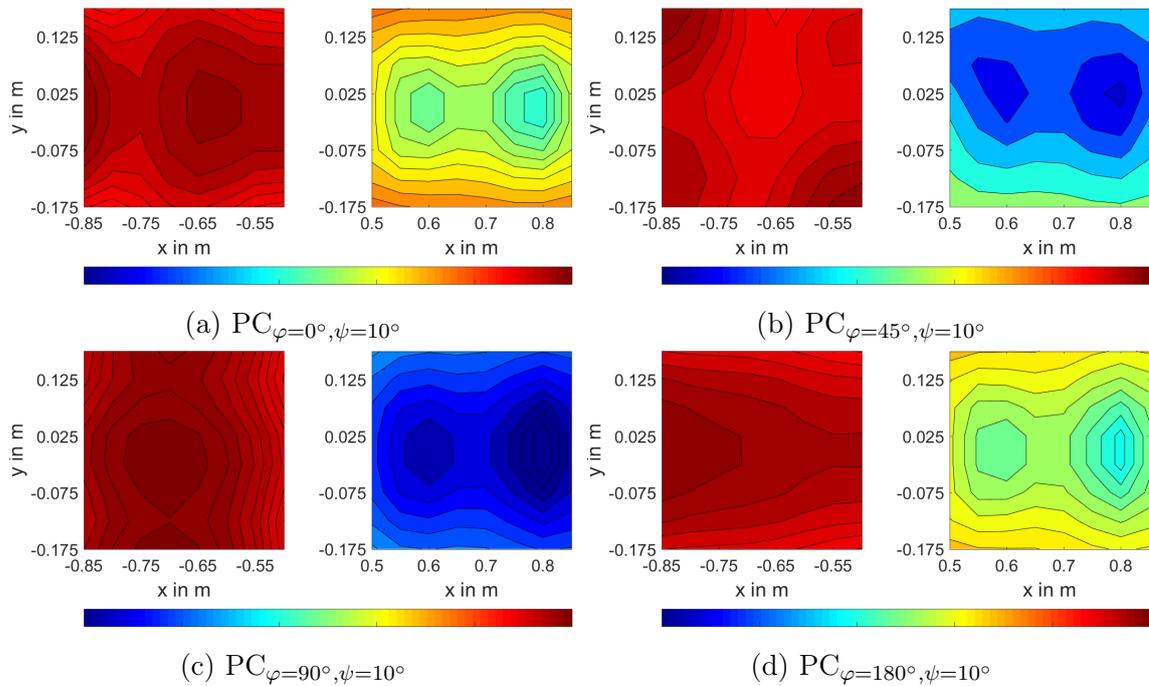
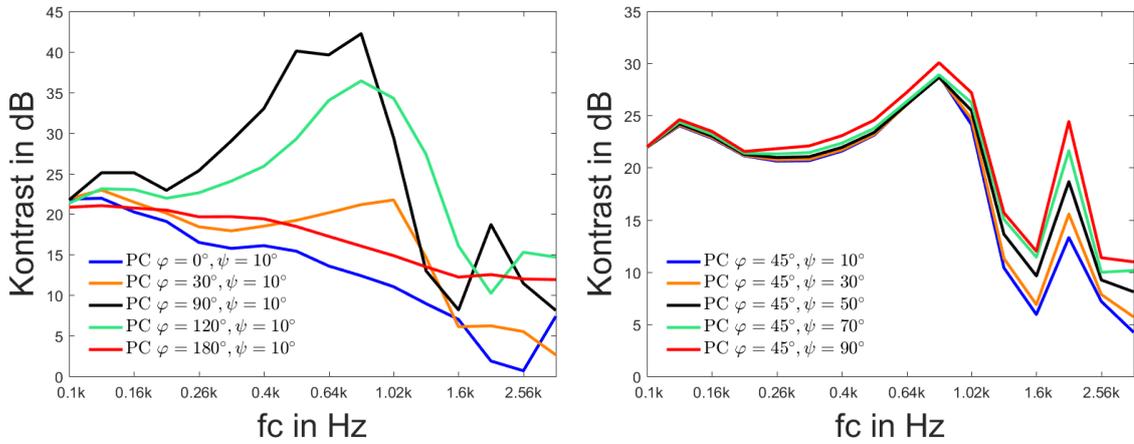


Abbildung 3.9: Energieverteilung $E_b^{(m_b, f_c)}$ und $E_d^{(m_d, f_c)}$ in der hellen Zone A (links) und der dunklen Zone B (rechts) für unterschiedliche Einstrahlungsrichtungen φ und Öffnungswinkel ψ der Schallquellenwahrnehmung für PC für ein Terzband mit Mittenfrequenz $f_c = 640\text{Hz}$. Kreisförmiges LS-Array mit 32LS im Freifeld.



(a) Kontrast zwischen heller und dunkler Zone für PC für unterschiedlichen Einstrahlungsrichtungen φ und Öffnungswinkel ψ . (b) Kontrast zwischen heller und dunkler Zone für PC für konstante Einstrahlungsrichtungen $\varphi = 45^\circ$ und unterschiedliche Öffnungswinkel $\psi \in \{10^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ, 90^\circ\}$.

Abbildung 3.10: Kontrast für unterschiedliche Einstellungen von PC.

In Abb.3.11 ist die Energieverteilung für PM für die Richtungen $\varphi \in \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 180^\circ\}$ dargestellt. In der hellen Zone ist der Energieverlauf für die variierenden Einstrahlungsrichtungen des gewünschten Schallfeldes einer ebenen Welle erkennbar. Der Kontrast für variierende Einstrahlungsrichtungen ist in Abb.3.12 dargestellt und verhält sich aufgrund der Geometrie des Setups ähnlich wie bei PC.

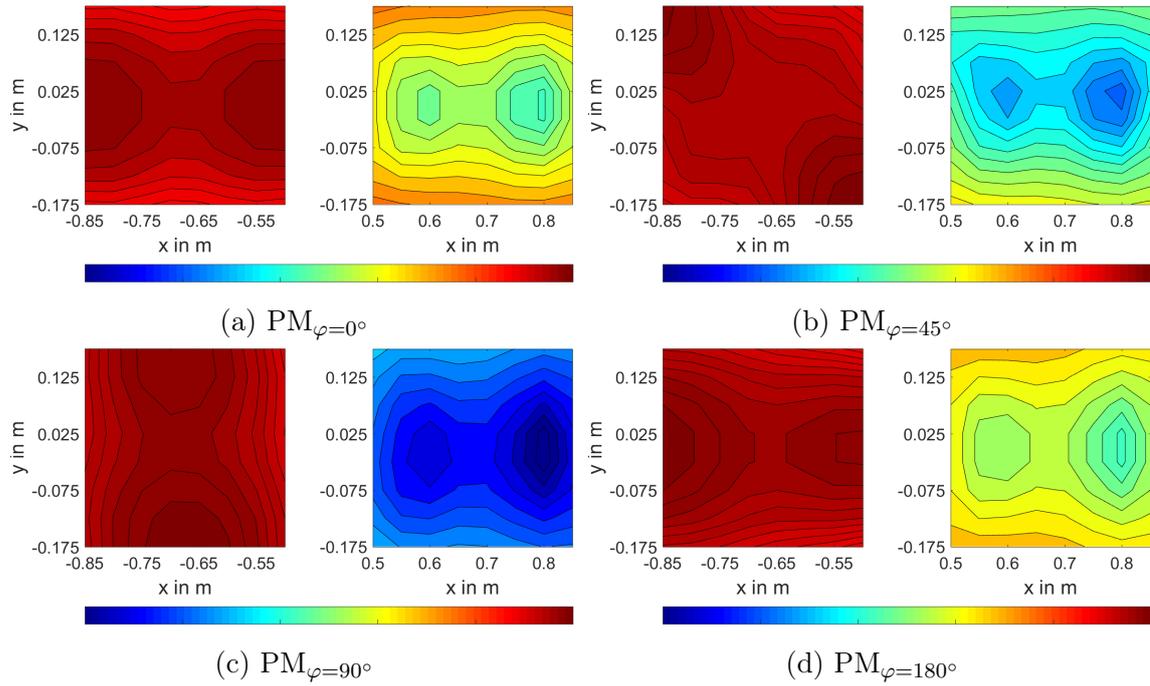


Abbildung 3.11: Energieverteilung $E_b^{(m_b, f_c)}$ und $E_d^{(m_d, f_c)}$ in der hellen Zone A (links) und der dunklen Zone B (rechts) für unterschiedliche Einstrahlungsrichtungen φ der Schallquellenwahrnehmung für PM bei einer Mittenfrequenz von $f_c = 640\text{Hz}$ des gemittelten Terzbandes. Kreisförmiges LS-Array mit 32LS im Freifeld.

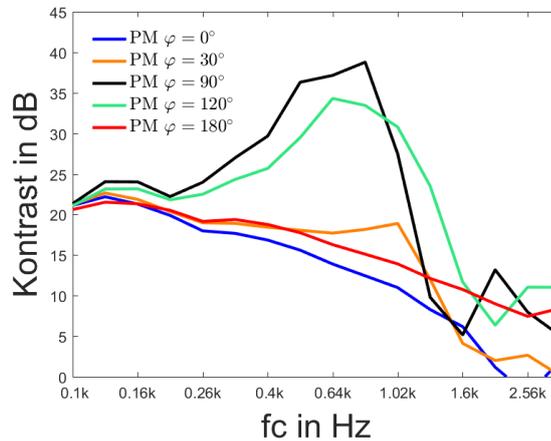


Abbildung 3.12: Kontrast zwischen heller und dunkler Zone für PM mit unterschiedlichen Einstrahlungsrichtungen φ .

Gewichtung der dunklen Zone für die Berechnung der Steuervektoren für PM \mathbf{q}_{PM} : In Kap.3.1.1 wird der Parameter β_d eingeführt. Die Auswirkungen dieses Parameters auf den Kontrast zwischen heller und dunkler Zone ist in Abb.3.13 dargestellt. Es wird die Korrelationsmatrix \mathbf{R}_d anhand von β_d gewichtet, die Inverse

inkludiert aber noch zwei weitere Terme. Eine Erhöhung des Parameters β_d bewirkt eine Erhöhung des Kontrastes, wobei es zu einer Sättigung bzw. zu einer maximalen Kontrastkurve kommt, da für große Werte von β_d der Einfluss der Korrelationsmatrix der hellen Zone \mathbf{R}_b für die Regularisierung und Invertierung verschwindet.

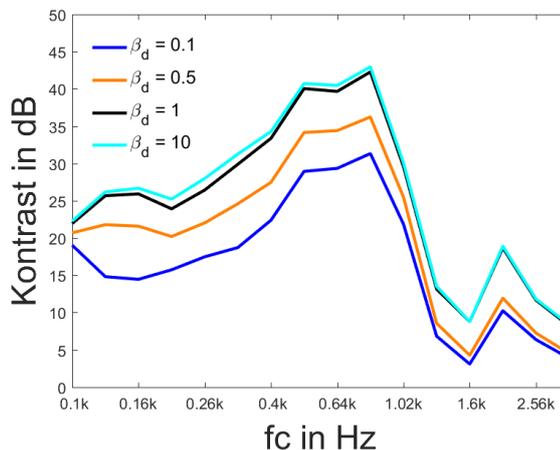


Abbildung 3.13: Gegenüberstellung des Kontrastes zwischen heller und dunkler Zone für $\text{PM}_{\varphi=90^\circ}$. bei variierender Parametereinstellung von β_d .

Planarität für die simulierten Steuervektoren: In Abb.3.14 ist die Planarität für verschiedene Methoden dargestellt. Bei DS werden die Signale der LS zeitlich verzögert, aber mit derselben Gewichtung wiedergegeben, wodurch es keine Vorzugsrichtung gibt und die Planarität daher $P = 0\%$ sein muss. Die Planarität von TRM ist ebenfalls mit Werten um $P = 40\%$ erwartungsgemäß sehr gering. BC erreicht eine sehr hohe und konstante Planarität. Im Vergleich dazu ist die Planarität von ACC geringer und nicht so konstant. Dieses Verhalten ist auf die Nebenbedingung, die eine geringe Energiedichte in der dunklen Zone verlangt, zurückzuführen. ACC bespielt im Vergleich zu BC eine größere Anzahl an LS mit hohen Gewichten. Dadurch wird weniger Übersprechen in die dunkle Zone erzeugt. Ein anschaulicher Vergleich ist in Kap.3.2.2 in Abb.3.18 dargestellt. In dieser Abbildung sind die LS-Gewichte farbig codiert aufgetragen. In Abb.3.14c ist die Planarität für PC mit unterschiedlichen Einstrahlungsrichtungen φ und Öffnungswinkeln $\psi = 10^\circ$ dargestellt. Die Planarität ist von der Einstrahlungsrichtung φ und vom Öffnungswinkel ψ abhängig. Man erkennt eine hohe Planarität für $\varphi = 90^\circ$ und $\varphi = 180^\circ$ im Vergleich zu $\varphi = 45^\circ$, was auf den Aufbau des Arrays und die Position der hellen und dunklen Zone zurückzuführen ist. Für größere Öffnungswinkel ψ wird die Planarität konstanter. Ein ähnliches Verhalten ergibt sich für PM.

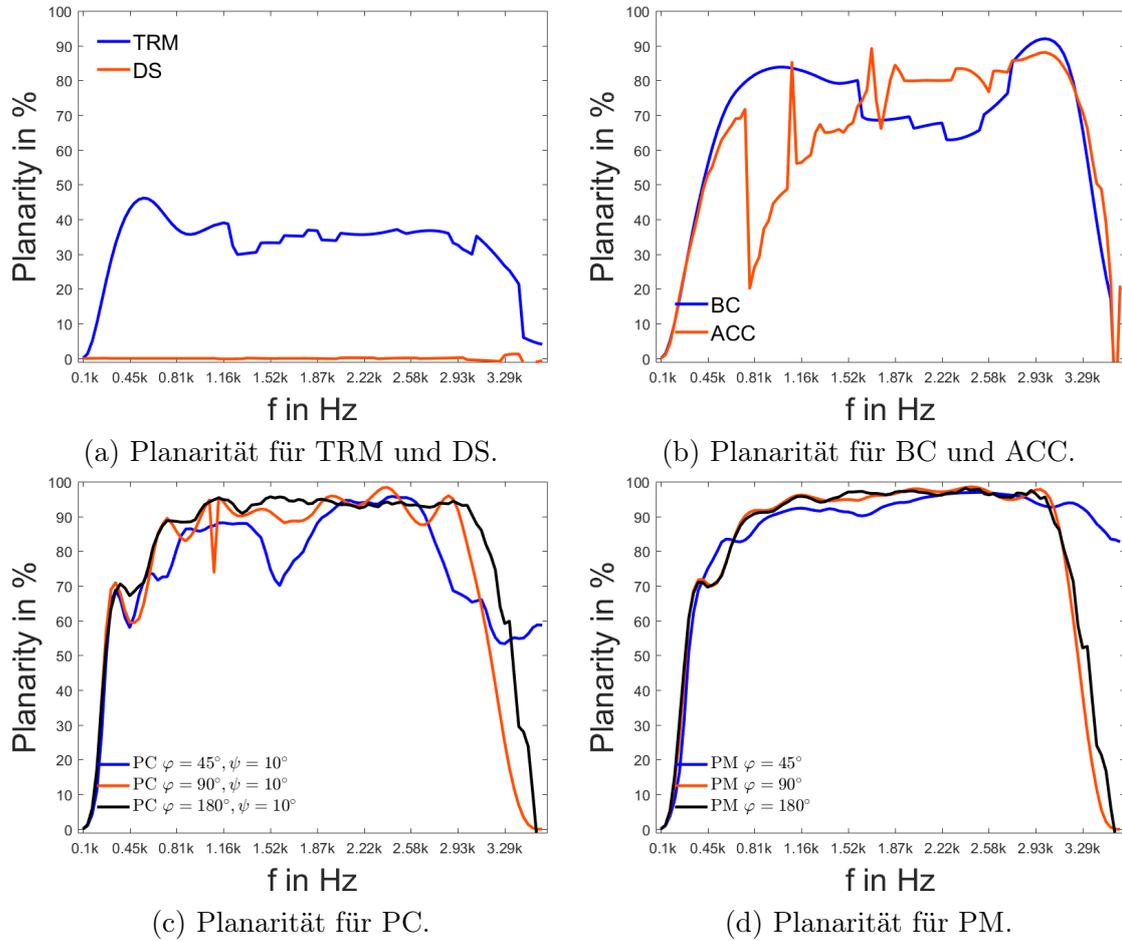


Abbildung 3.14: Planarität in Prozent für TRM, DS, BC, ACC, PC und PM für das kreisförmige LS-Array mit 32 LS.

3.2.2 LS-Gewichte und \mathbf{r}_E -Vektoren

In Kap.3.2.1 wurde auf die Messgrößen Kontrast und Planarität eingegangen. In diesem Abschnitt werden die Gewichte der Steuervektoren \mathbf{q} grafisch präsentiert und mit Hilfe von \mathbf{r}_E -Vektoren (Glg.2.13) die Richtung der entstehenden Phantomschallquelle sowie die Quellbreite \mathbf{v} (Glg.2.14) berechnet. Mit diesen Ergebnissen kann die wahrgenommene Richtung der Schalllokalisation technisch beschrieben und in weiterer Folge mit den Ergebnissen der Hörversuche (Kap.3.3) verglichen werden.

In den folgenden Teilabbildungen (a) und (b) sind die Gewichte der Steuervektoren \mathbf{q} für die Frequenzen $\mathbf{f} = [250Hz \ 500Hz \ 1000Hz]$ in konzentrischen Kreisen für die helle bzw. dunkle Zone dargestellt. Die Positionen der farbigen Punkte auf den konzentrischen Kreisen entsprechen den Positionen der LS im kreisförmigen Array, welches in der Draufsicht dargestellt ist. Die Gewichte der Steuervektoren sind farb-

codiert, wobei (rot-)braun das Maximum von $0dB$ und blau das gewählte Minimum von $-20dB$ darstellt. Der Normierungswert entspricht dem maximalen Gewicht der betrachteten Methode und wird mit $0dB$ festgelegt. Zusätzlich sind die Zone A (links) und die Zone B (rechts) als Quadrate dargestellt. Die graue Füllung der Quadrate bezeichnet die dunkle Zone.

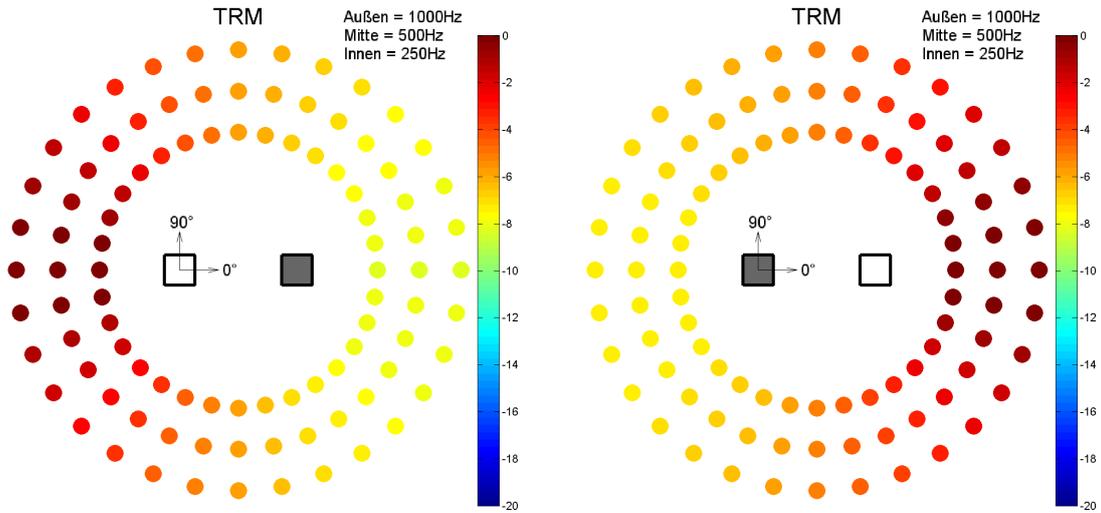
In den Teilabbildungen $(c), (d), (e)$ und $(f), (g), (h)$ sind die \mathbf{r}_E -Vektoren sowie die Quellbreite \mathbf{v} für die helle bzw. dunkle Zone abgebildet. Als Bezugspunkt zur Berechnung der \mathbf{r}_E -Vektoren wird die Abhörposition in der Mitte der linken Zone (siehe Ursprung Abb.3.1) definiert. Außerdem wird der Abstand vom Zentrum zur LS-Position durch den Faktor $\frac{1}{r}$ in den Steuervektor miteinbezogen. Die Länge des \mathbf{r}_E -Vektors beträgt 1, wenn nur ein LS bespielt wird. Ein sehr kurzer \mathbf{r}_E -Vektor weist darauf hin, dass es keine dominante Einstrahlungsrichtung für den gewählten Bezugspunkt (Abhörposition) gibt. Ein \mathbf{r}_E -Vektor mit der Länge 0 ist aufgrund des asymmetrischen Versuchsaufbaus nicht zu erwarten. Der \mathbf{r}_E -Vektor ist mit der durchgehenden Linie in der Abbildung gekennzeichnet. Die halbe Quellbreite wird in positiver und negativer Drehrichtung von der Richtung des \mathbf{r}_E -Vektors ausgehend symmetrisch aufgetragen und mit den punktierten Linien dargestellt.

Abb.3.15 zeigt die Gewichte von TRM für den Fokuspunkt in Zone A (Abb.3.15a) und den Fokuspunkt in Zone B (Abb.3.15b). Für einen absolut symmetrischen Aufbau werden die Gewichte für die beiden Varianten gespiegelt. Im vorliegenden Fall kommt es zu Abweichungen von der Spiegelung, da der Fokuspunkt methodenabhängig an eine ausgewählte Mikrofonposition gebunden ist und nicht im Zentrum der hellen Zone liegt. Es wurde für beide Zonen das Mikrofon im Abstand von $x = -0.025$ und $y = +0.025$ vom Zentrum der jeweiligen Zone verwendet. Die Unterschiede der \mathbf{r}_E -Vektoren bezüglich der Länge sind auf die unterschiedlichen Distanzen der LS zum Abhörpunkt zurückzuführen. Im Gegensatz dazu verändert sich bezüglich der beiden Varianten des Fokuspunktes bei DS aufgrund der gleichen Gewichte für alle LS der \mathbf{r}_E -Vektor nicht. Die zeitliche Verzögerung nimmt auf die Berechnung des \mathbf{r}_E -Vektors keinen Einfluss (Abb.3.16).

BC weist die größten LS-Gewichte aus der 180° -Richtung (helle Zone A) bzw. 0° -Richtung (helle Zone B) auf. Bei den zuvor beschriebenen Methoden TRM und DS ist die Quellbreite konstant für die Wahl der hellen Zone. BC weist eine Abhängigkeit der Quellbreite von der wiedergegebenen Frequenz auf, wobei sich bei steigender Frequenz, die Quellbreite verringert (Abb.3.17). ACC in Abb.3.18 weist bezüglich der Quellbreite, dasselbe Verhalten auf. Die LS-Gewichte sind allerdings auf einen größeren Bereich um die $0^\circ - 180^\circ$ -Achse aufgeteilt, um den Kontrast zwischen heller und

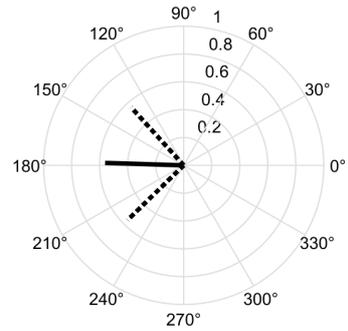
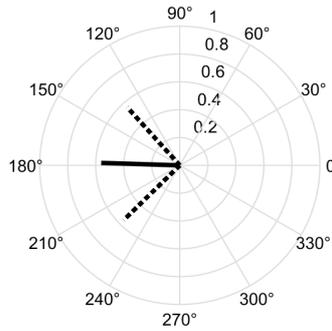
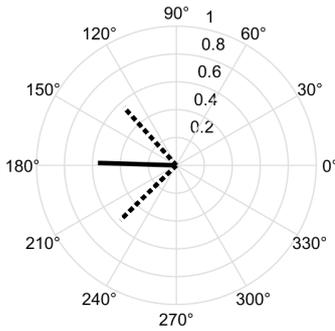
dunkler Zone zu erhöhen. Deutlich ist diese Auslagerung der größten Gewichte nach außen und eine Verringerung der Gewichte in der 0° bzw. 180° -Richtung bei hohen Frequenzen zu sehen.

Die Richtung des \mathbf{r}_E -Vektors weist für PC in Abb.3.20 eine deutliche Frequenzabhängigkeit auf. Mit steigender Frequenz neigt sich in der hellen Zone A der Vektor in Richtung der eingestellten Einstrahlungsrichtung. Die größten LS-Gewichte konzentrieren sich auf den Viertelkreis der entsprechend eingestellten Einstrahlungsrichtung. Durch die geringe Anzahl an LS mit hoher Gewichtung strebt die Länge des \mathbf{r}_E -Vektors gegen 1. Für die Variante der hellen Zone B dreht sich der \mathbf{r}_E -Vektor aus geometrischen Gründen für die Abhörposition für den Fall $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ auf einen flacheren Winkel von etwas 45° . Ein ähnliches Verhalten weist $PM_{\varphi=90^\circ}$ (Abb.3.21) auf.



(a) LS-Gewichte: TRM helle **Zone A**

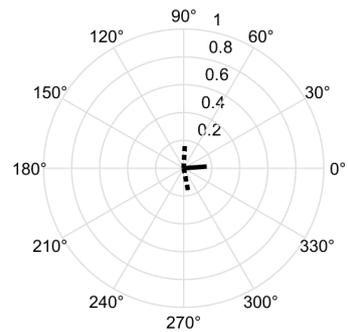
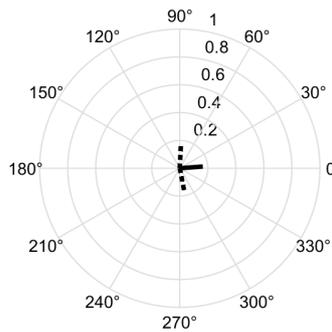
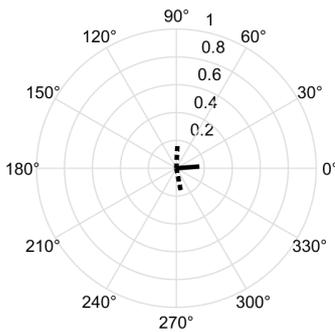
(b) LS-Gewichte: TRM helle **Zone B**



(c) r_E : TRM helle **Zone A**
 $f = 250Hz$

(d) r_E : TRM helle **Zone A**
 $f = 500Hz$

(e) r_E : TRM helle **Zone A**
 $f = 1000Hz$

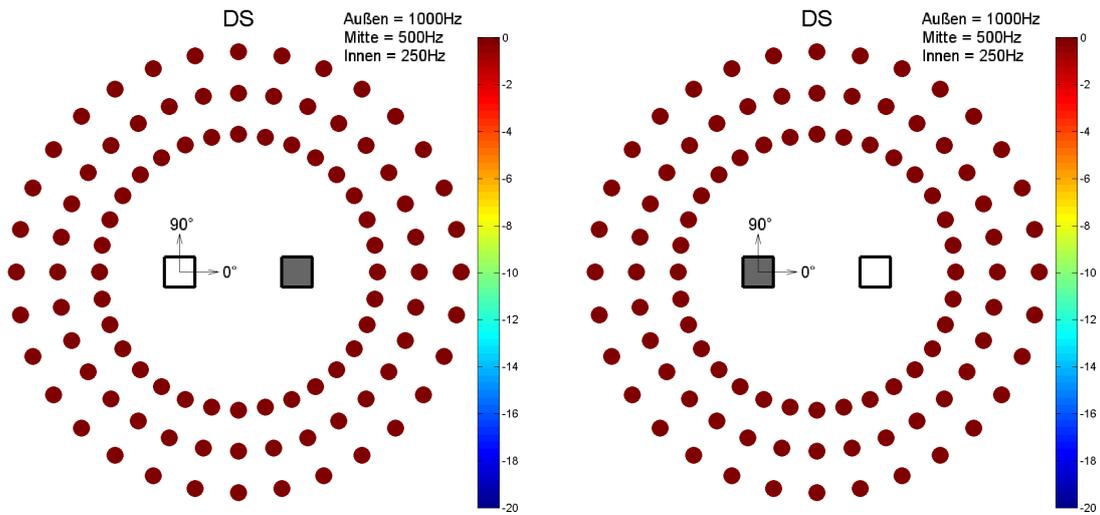


(f) r_E : TRM helle **Zone B**
 $f = 250Hz$

(g) r_E : TRM helle **Zone B**
 $f = 500Hz$

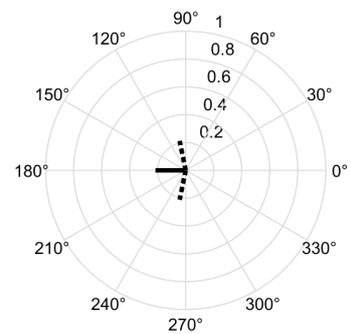
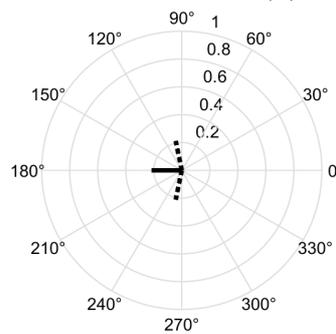
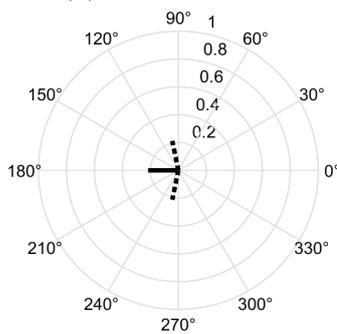
(h) r_E : TRM helle **Zone B**
 $f = 1000Hz$

Abbildung 3.15: Kreisförmiges LS-Array mit 32LS im Freifeld: (a),(b) Darstellung der Lautsprechergewichte des Steuervektors TRM an den Lautsprecherpositionen. Die Gewichte sind auf das Maximum normiert und farbcodiert. (c) bis (h) Darstellung der r_E -Vektoren.



(a) LS-Gewichte: DS helle **Zone A**

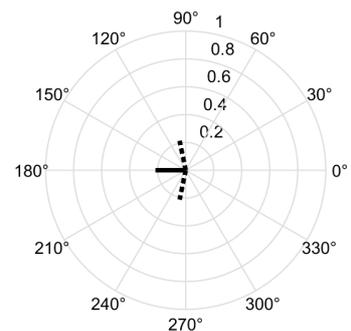
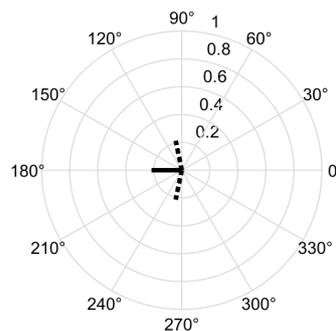
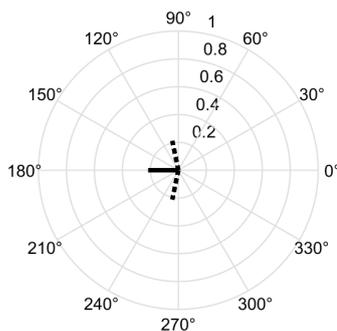
(b) LS-Gewichte: DS helle **Zone B**



(c) r_E : DS helle **Zone A** $f = 250Hz$

(d) r_E : DS helle **Zone A** $f = 500Hz$

(e) r_E : DS helle **Zone A** $f = 1000Hz$

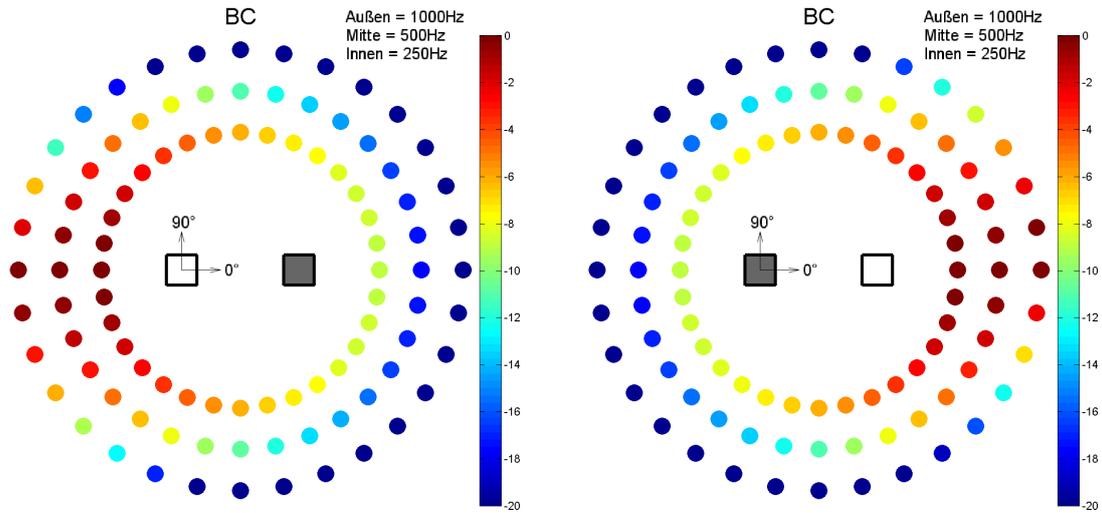


(f) r_E : DS helle **Zone B** $f = 250Hz$

(g) r_E : DS helle **Zone B** $f = 500Hz$

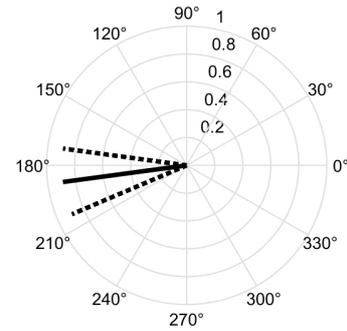
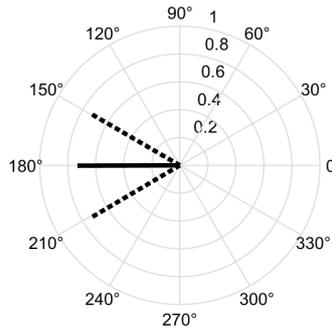
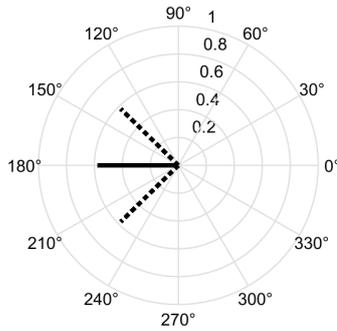
(h) r_E : DS helle **Zone B** $f = 1000Hz$

Abbildung 3.16: Kreisförmiges LS-Array mit 32LS im Freifeld: (a),(b) Darstellung der Lautsprechergewichte des Steuervektors DS an den Lautsprecherpositionen. Die Gewichte sind auf das Maximum normiert und farbcodiert. (c) bis (h) Darstellung der r_E -Vektoren.



(a) LS-Gewichte: BC helle **Zone A**

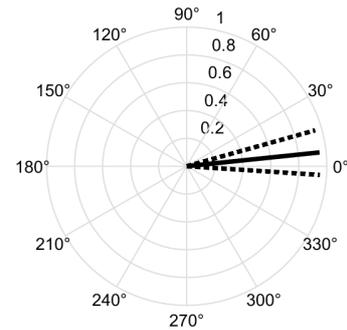
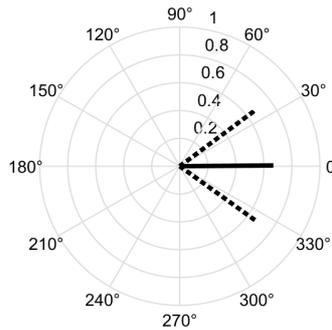
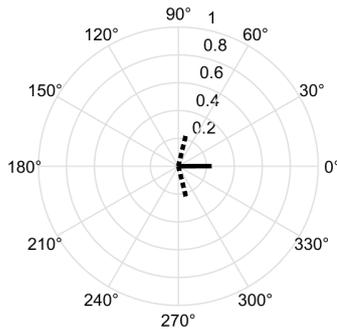
(b) LS-Gewichte: BC helle **Zone B**



(c) r_E : DS helle **Zone A** $f = 250Hz$

(d) r_E : DS helle **Zone A** $f = 500Hz$

(e) r_E : DS helle **Zone A** $f = 1000Hz$

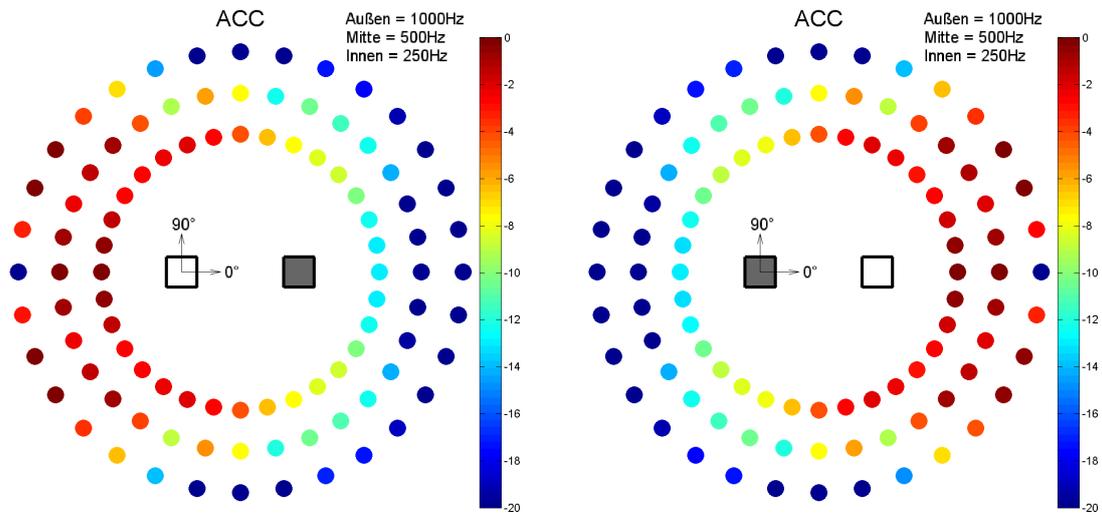


(f) r_E : DS helle **Zone B** $f = 250Hz$

(g) r_E : DS helle **Zone B** $f = 500Hz$

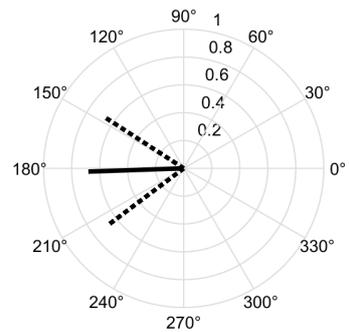
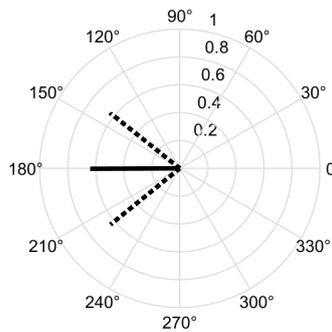
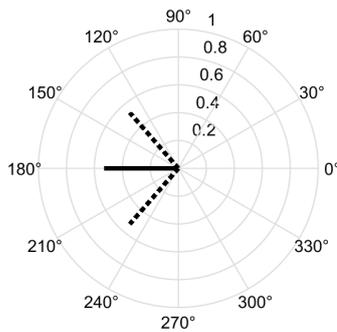
(h) r_E : DS helle **Zone B** $f = 1000Hz$

Abbildung 3.17: Kreisförmiges LS-Array mit 32LS im Freifeld: (a),(b) Darstellung der Lautsprechergewichte des Steuervektors BC an den Lautsprecherpositionen. Die Gewichte sind auf das Maximum normiert und farbcodiert. (c) bis (h) Darstellung der r_E -Vektoren.



(a) LS-Gewichte: ACC helle **Zone A**

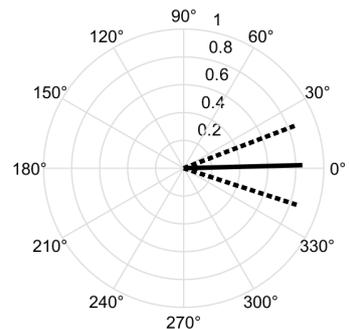
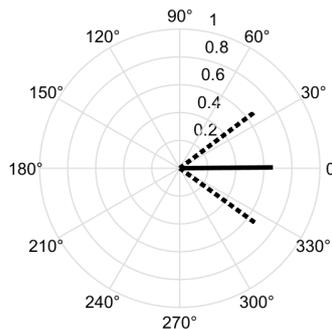
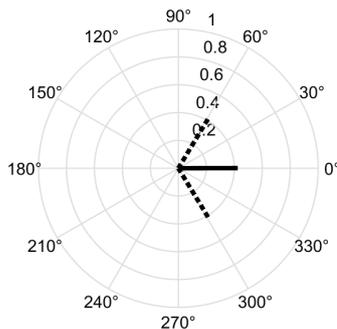
(b) LS-Gewichte: ACC helle **Zone B**



(c) r_E : ACC helle **Zone A**
 $f = 250Hz$

(d) r_E : ACC helle **Zone A**
 $f = 500Hz$

(e) r_E : ACC helle **Zone A**
 $f = 1000Hz$

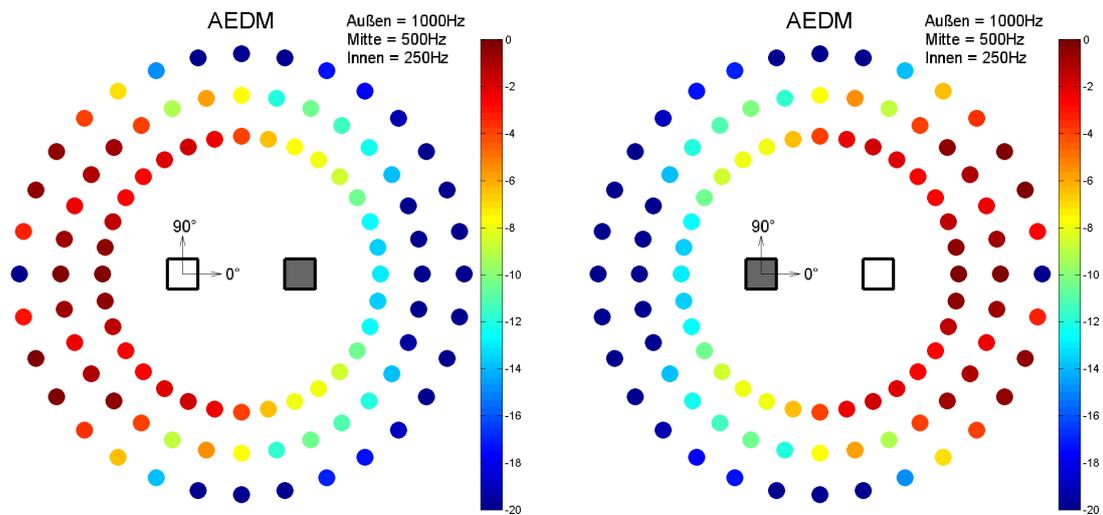


(f) r_E : ACC helle **Zone B**
 $f = 250Hz$

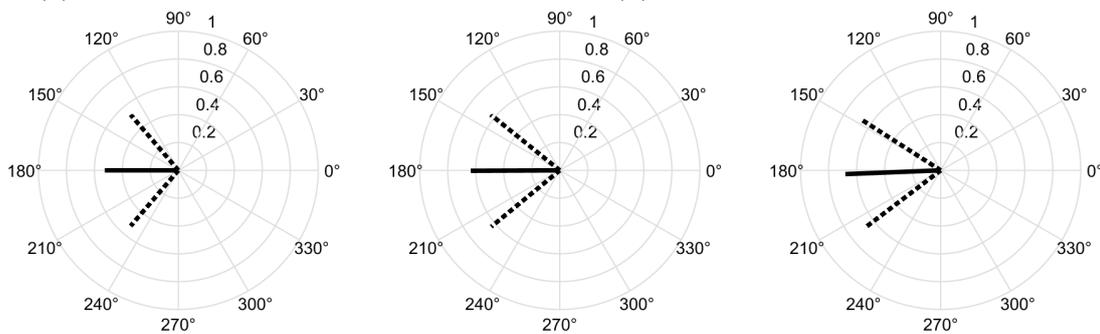
(g) r_E : ACC helle **Zone B**
 $f = 500Hz$

(h) r_E : ACC helle **Zone B**
 $f = 1000Hz$

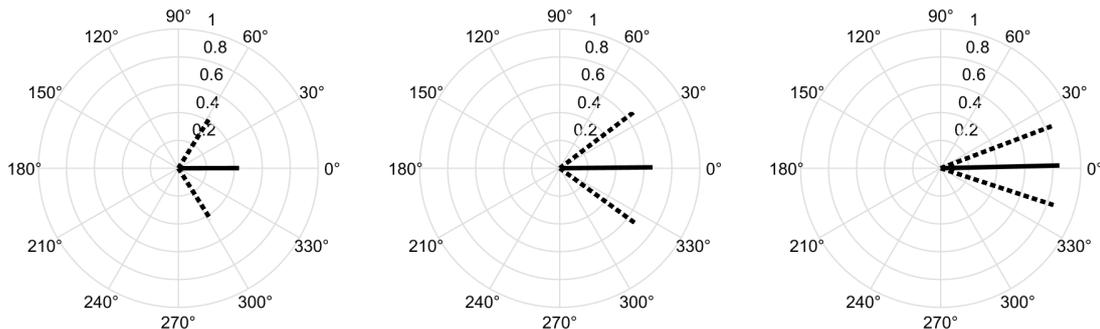
Abbildung 3.18: Kreisförmiges LS-Array mit 32LS im Freifeld: (a),(b) Darstellung der Lautsprechergewichte des Steuervektors ACC an den Lautsprecherpositionen. Die Gewichte sind auf das Maximum normiert und farbcodiert. (c) bis (h) Darstellung der r_E -Vektoren.



(a) LS-Gewichte: AEDM helle **Zone A** (b) LS-Gewichte: AEDM helle **Zone B**

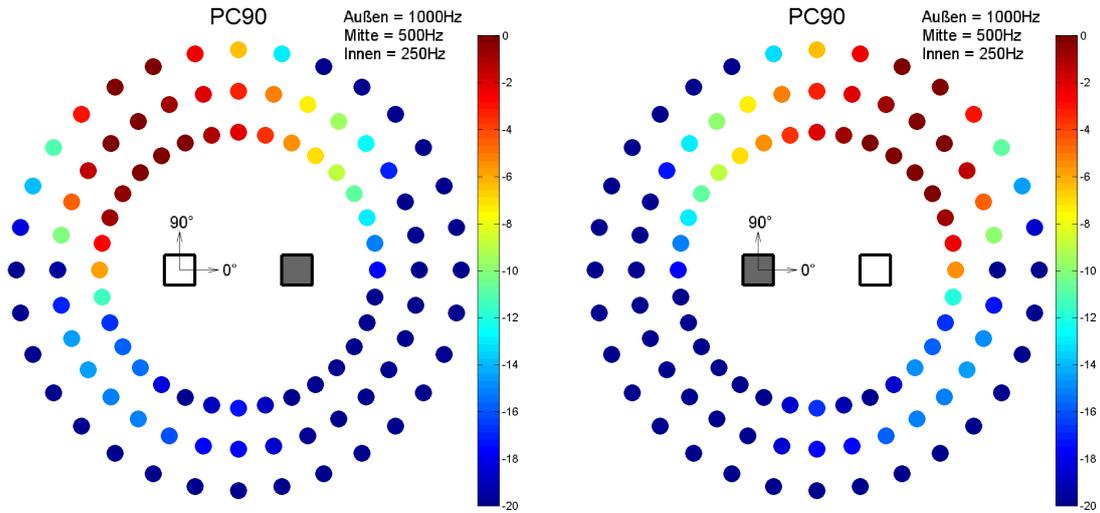


(c) r_E : AEDM helle **Zone A** $f = 250Hz$ (d) r_E : AEDM helle **Zone A** $f = 500Hz$ (e) r_E : AEDM helle **Zone A** $f = 1000Hz$

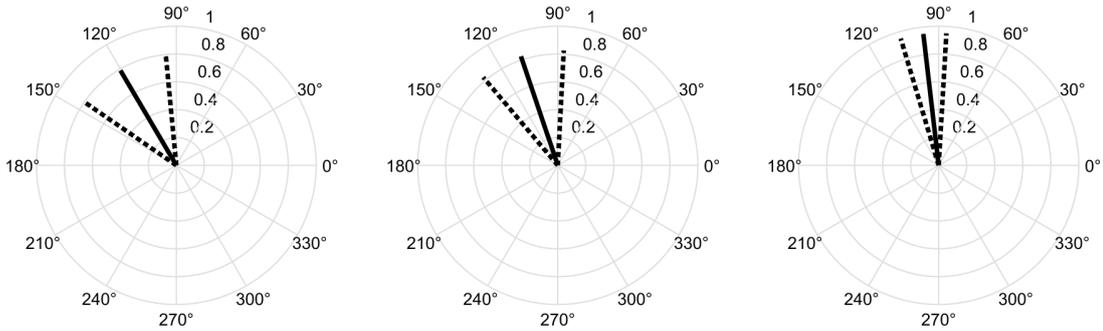


(f) r_E : AEDM helle **Zone B** $f = 250Hz$ (g) r_E : AEDM helle **Zone B** $f = 500Hz$ (h) r_E : AEDM helle **Zone B** $f = 1000Hz$

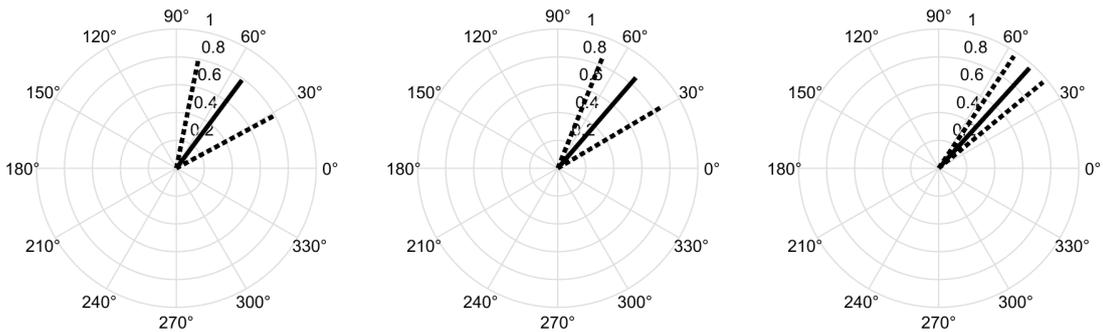
Abbildung 3.19: Kreisförmiges LS-Array mit 32LS im Freifeld: (a),(b) Darstellung der Lautsprechergewichte des Steuervektors AEDM an den Lautsprecherpositionen. Die Gewichte sind auf das Maximum normiert und farbcodiert. (c) bis (h) Darstellung der r_E -Vektoren.



(a) LS-Gew.: $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ helle **Zone A** (b) LS-Gew.: $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ helle **Zone B**

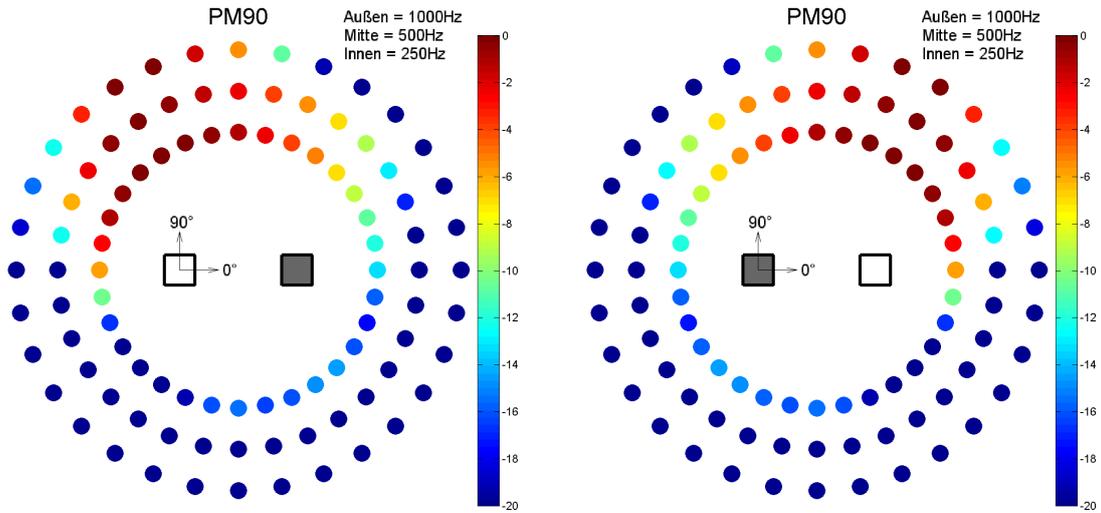


(c) r_E : $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ helle **Zone A** $f = 250Hz$ (d) r_E : $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ helle **Zone A** $f = 500Hz$ (e) r_E : $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ helle **Zone A** $f = 1000Hz$

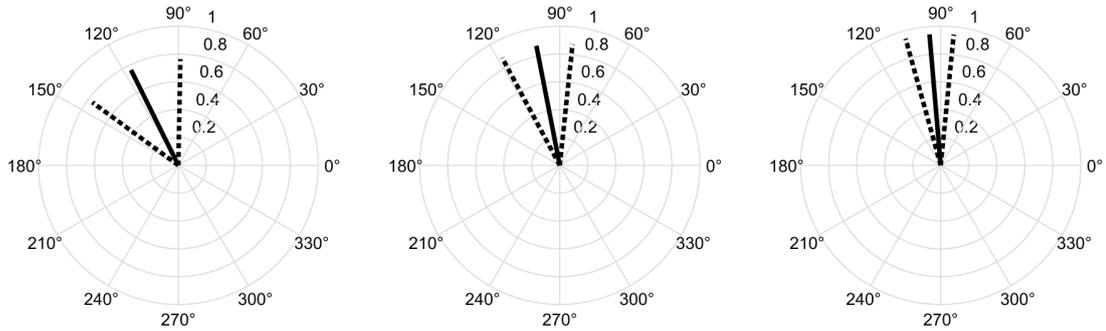


(f) r_E : $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ helle **Zone B** $f = 250Hz$ (g) r_E : $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ helle **Zone B** $f = 500Hz$ (h) r_E : $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ helle **Zone B** $f = 1000Hz$

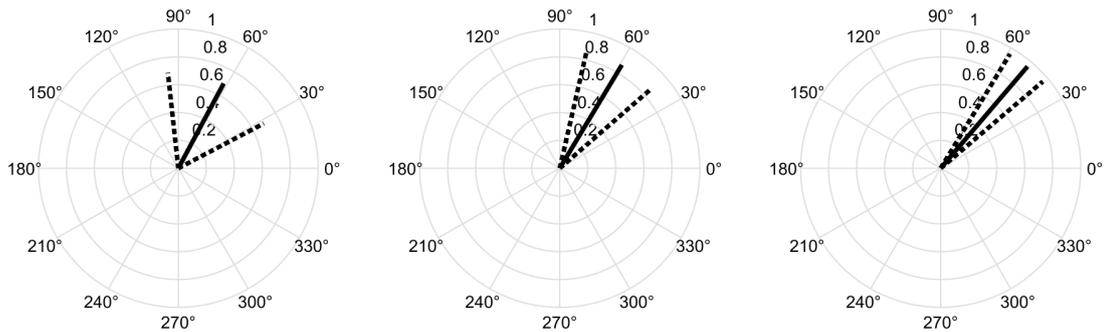
Abbildung 3.20: Kreisförmiges LS-Array mit 32LS im Freifeld: (a),(b) Darstellung der Lautsprechergewichte des Steuervektors PC mit Einstrahlungsrichtung $\varphi = 90^\circ$ und Öffnungswinkel $\psi = 10^\circ$ an den Lautsprecherpositionen. Die Gewichte sind auf das Maximum normiert und farbcodiert. (c) bis (h) Darstellung der r_E -Vektoren.



(a) LS-Gewichte: $PM_{\varphi=90^\circ}$ helle **Zone A** (b) LS-Gewichte: $PM_{\varphi=90^\circ}$ helle **Zone B**



(c) r_E : $PM_{\varphi=90^\circ}$ helle **Zone A** $f = 250Hz$ (d) r_E : $PM_{\varphi=90^\circ}$ helle **Zone A** $f = 500Hz$ (e) r_E : $PM_{\varphi=90^\circ}$ helle **Zone A** $f = 1000Hz$



(f) r_E : $PM_{\varphi=90^\circ}$ helle **Zone B** $f = 250Hz$ (g) r_E : $PM_{\varphi=90^\circ}$ helle **Zone B** $f = 500Hz$ (h) r_E : $PM_{\varphi=90^\circ}$ helle **Zone B** $f = 1000Hz$

Abbildung 3.21: Kreisförmiges LS-Array mit 32LS im Freifeld: (a),(b) Darstellung der Lautsprechergewichte des Steuervektors PM mit Einstrahlungsrichtung $\varphi = 90^\circ$ an den Lautsprecherpositionen. Die Gewichte sind auf das Maximum normiert und farbcodiert. (c) bis (h) Darstellung der r_E -Vektoren.

3.2.3 Stereo-Wiedergabe mit PC und PM

PC und PM ermöglichen durch die Vorgabe der Einstrahlungsrichtung eine virtuelle Stereo-Wiedergabe von Audiomaterial. Die linke Audiospur kann beispielsweise aus einer Richtung von $\varphi_1 = 60^\circ$ und die rechte Audiospur aus $\varphi_2 = 120^\circ$ wiedergegeben werden. Abb.3.22 zeigt die Energieverteilung für die Mono-Wiedergabe aus $\varphi_1 = 60^\circ$ sowie die Stereo-Wiedergabe für PC. In Abb.3.23 sieht man die Energieverteilung für PM. Der Kontrast bleibt in beiden Fällen auch für die Stereo-Wiedergabe sehr gut erhalten.

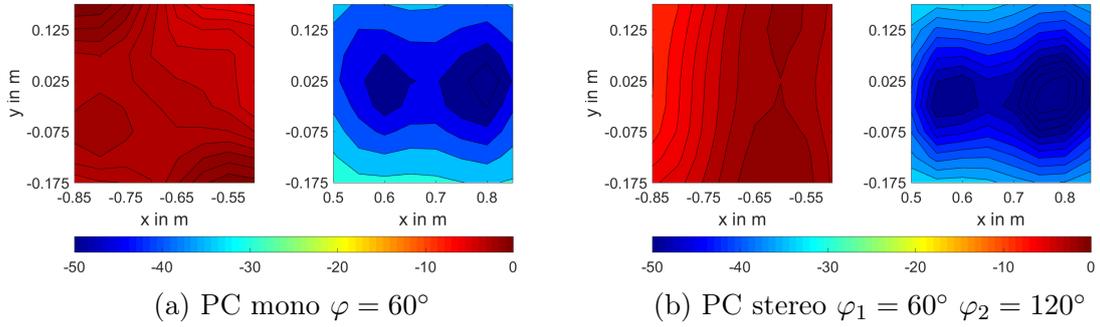


Abbildung 3.22: Energieverteilung $E_b^{(m_b, f_c)}$ und $E_d^{(m_d, f_c)}$ in der hellen Zone A (links) und der dunklen Zone B (rechts) für zwei Einstrahlungsrichtungen $\varphi_1 = 60^\circ$ und $\varphi_2 = 120^\circ$ und konstantem Öffnungswinkel $\psi = 30^\circ$ für PC. Kreisförmiges LS-Array mit 32LS im Freifeld.

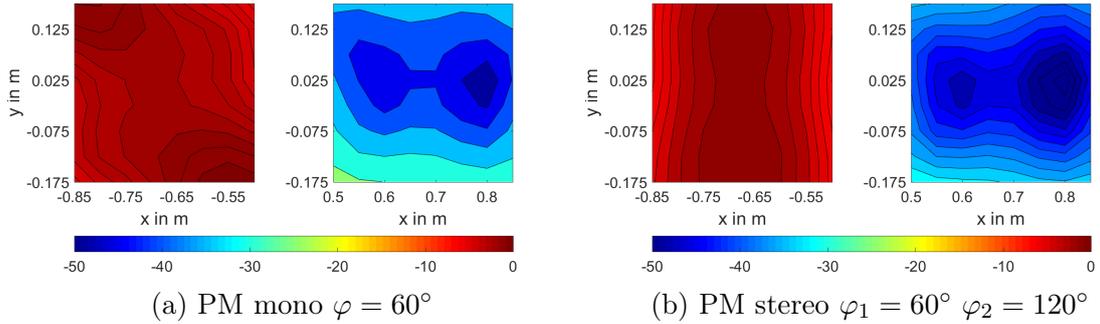


Abbildung 3.23: Energieverteilung $E_b^{(m_b, f_c)}$ und $E_d^{(m_d, f_c)}$ in der hellen Zone A (links) und der dunklen Zone B (rechts) für zwei Einstrahlungsrichtungen $\varphi_1 = 60^\circ$ und $\varphi_2 = 120^\circ$ für PM. Kreisförmiges LS-Array mit 32LS im Freifeld.

3.2.4 Messung kreisförmiges LS-Array

Zur Überprüfung der Simulationsdaten wurde eine Messung der Raumimpulsantwort in der hellen und dunklen Zone an jeweils 6 beliebigen Punkten pro Zone durchgeführt. Die zuvor berechneten Steuervektoren aus Simulationsdaten werden mit diesen

gemessenen Raumimpulsantworten im Frequenzbereich multipliziert und man erhält die Energie in den Zonen. In weiterer Folge kann der Kontrast berechnet werden. Damit ist eine Auswertung der simulierten Daten mit gemessenen Daten möglich.

Die Raumimpulsantworten wurden mit 6 Mikrofonen in beiden Zonen in einer Höhe von $1.35m$ gemessen. Die Position der Mikrophone beschreibt einen kreuzförmigen Aufbau mit einem Abstand von $0.06m$ bzw. $0.04m$ zueinander und ist in Abb.3.24 dargestellt. Das Zentrum des Arrays wurde im Zentrum der jeweiligen Zone angebracht. Die Mikrophone wurden für alle Kombinationen von LS zu den 6 Mikrofonpositionen mit Hilfe von *interleaved sweeps* [MBL07] gemessen. Sie bilden die Übertragungsfunktionsmatrix $\hat{\mathbf{H}}_b$ der hellen Zone und $\hat{\mathbf{H}}_d$ der dunklen Zone. Die Energie errechnet sich mit

$$\hat{e}_b^{(m_b, f_c)} = \mathbf{q}^H \hat{\mathbf{H}}_b^H \hat{\mathbf{H}}_b \mathbf{q} = \mathbf{q}^H \hat{\mathbf{R}}_b \mathbf{q}. \quad (3.11)$$

Der Kontrast berechnet sich analog zu Glg.3.7 mit

$$K(f_c) = 10 * \log \left(\frac{\sum_{m=1}^6 \hat{e}_b^{(m_b, f_c)}}{\sum_{m=1}^6 \hat{e}_d^{(m_b, f_c)}} \right). \quad (3.12)$$

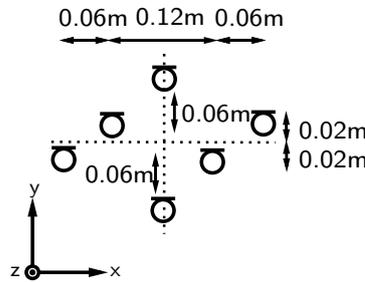


Abbildung 3.24: Positionen der Mikrophone im Mikrofonarray zur Messung der Raumimpulsantworten im reflexionsarmen Raum.

3.2.5 Vergleich Simulation zu Messung kreisförmiges LS-Array

Für die Berechnung der Steuervektoren \mathbf{q} wurden die simulierten Raumimpulsantworten verwendet. Diese bestehen nur aus einem Direktschallanteil berechnet über Green'sche Funktionen. In einem reflexionsarmen Raum bilden sich trotz der akustischen Maßnahmen erste Reflexionen aus. In Abb.3.25 sind die Raumimpulsantworten für den simulierten Direktschall sowie für die gemessene Raumimpulsantwort für den LS $n = 1$ und ein Mikrofon in der Zone A abgebildet.⁷ Die erste Reflexion bei etwa

⁷Die Position der Mikrophone stimmt trotz gleichem Index m_A nicht überein.

12ms in Abb.3.25b ist mit großer Wahrscheinlichkeit durch den Boden des Raumes verursacht.

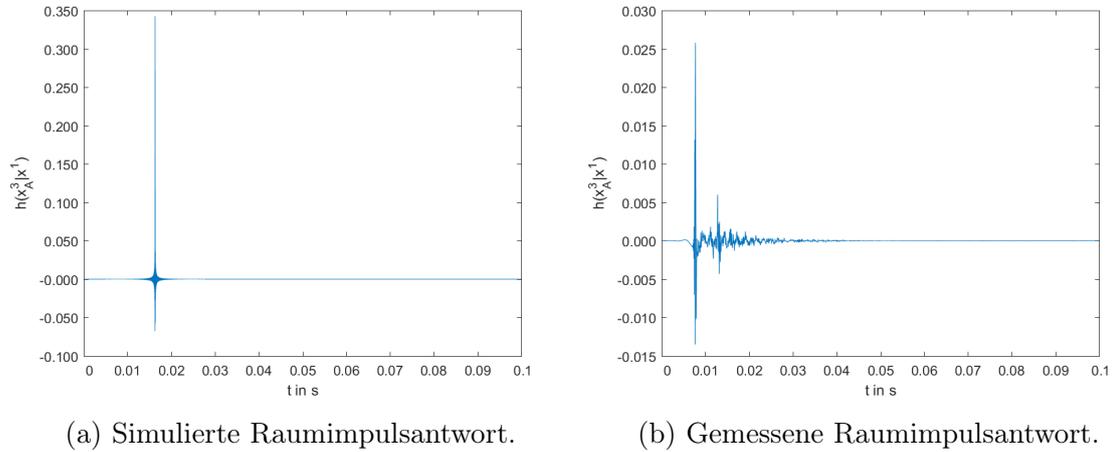
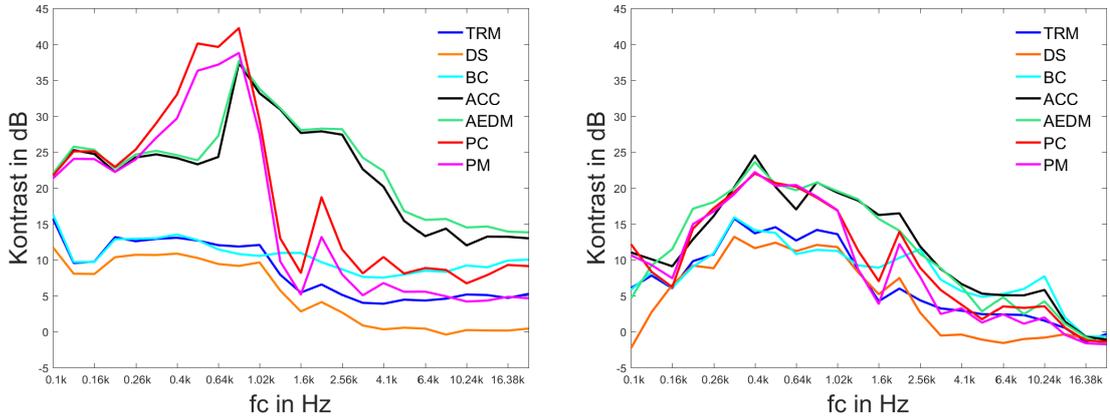


Abbildung 3.25: Simulierte und gemessene Raumimpulsantwort für LS $n = 1$ und ein Mikrofon $m_A = 3$ in Zone A

Die Simulation ist für ideale Annahmen, wie z.B. LS- und Mikrofoncharakteristik, Temperatur, Aufstellung im Freifeld, usw., berechnet. Die gemessenen Raumimpulsantworten erfüllen diese Annahmen nicht und unterscheiden sich dadurch von der Simulation. Aus diesem Grund entstehen Fehler, die sich auf die Performance der Methoden auswirken und die simulierten Kontrastwerte für die Messung werden nicht erreicht. Abb.3.26 zeigt eine Gegenüberstellung des ausgewerteten Kontrastes für die verwendeten Methoden.



(a) Kontrast der Methoden für das kreisförmiges LS-Array mit simulierten Impulsantworten für 64 Punkte pro Zone. (b) Kontrast der Methoden für das kreisförmiges LS-Array mit gemessenen Impulsantworten für 6 Punkte pro Zone.

Abbildung 3.26: Gegenüberstellung des Kontrastes zwischen heller und dunkler Zone für TRM, DS, BC, ACC, AEDM, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ und $PM_{\varphi=90^\circ}$ zwischen Simulation und Messung.

Die angegebenen Kontrastwerte in Tab.3.1 ergeben sich aus dem gemittelten Kontrast zwischen den beiden Zonen über alle Frequenzbänder f_c

$$\hat{K} = 10 * \log \left(\frac{\sum_{c=1}^{c_{max}} K(f_c)}{c_{max}} \right) \text{ mit } c \in \{1, 2, \dots, c_{max}\}. \quad (3.13)$$

Die Differenzen des Kontrastes zwischen Simulation und Messung sind in Abb.3.27 dargestellt. Die größten Differenzen weisen ACC und AEDM auf, deren Verlauf sehr ähnlich ist.

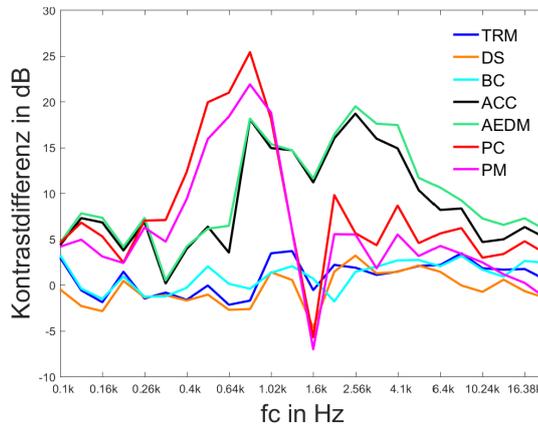


Abbildung 3.27: Differenz des Kontrastes $\Delta K = K_{Sim} - K_{Mess}$ für einen Steuervektoren mit Länge $200ms$, $RIR = 1s$ für die Auswertung.

	$\varphi / ^\circ$	$\psi / ^\circ$	\hat{K}_{Sim}/dB	\hat{K}_{Mes}/dB
TRM	-	-	10	9
DS	-	-	8	8
BC	-	-	11	10
ACC	-	-	26	16
AEDM	-	-	27	16
PC	0	10	13	7
	45	10	23	13
	60	30	21	13
	90	10	25	14
	180	10	17	12
PM	0	-	13	7
	45	-	20	12
	90	-	22	13
	180	-	16	11

Tabelle 3.1: Mittelwerte des Kontrastes zwischen heller und dunkler Zone, gebildet über die Terzbänder im Bereich $100\text{Hz} - 3.2\text{kHz}$ für alle Methoden.

3.3 Evaluierung der umgesetzten Methoden mittels Hörversuchen in einem reflexionsarmen Raum

Die Wiedergabequalität und Höreindrücke der einzelnen Methoden zur Schallfokussierung und Erzeugung von individualisierten Hörzonen wurden bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht näher untersucht. Mit Hilfe von geeigneten Hörversuchen sollen räumliche Aspekte der Wiedergabequalität bewertet werden. Untersucht werden folgende räumliche Aspekte [Wit07]:

- Lokalisation

ist das generelle Abbildungsgesetz zwischen der Position eines Hörereignisses und einer speziellen Eigenschaft der Schallquelle.

- Distanz

ist der Abstand zwischen ZuhörerIn und reproduzierter Schallquelle.

- Richtung

ist die Richtung aus der die reproduzierte Schallquelle wahrgenommen wird.

- Robustheit

ist der Grad der Änderung der wahrgenommenen Lokalisation der reproduzierten Schallquelle in Abhängigkeit von der Bewegung des Zuhörers/der ZuhörerIn.

Es wurden die in Kap.3.1.1 vorgestellten Methoden mit den selben Parametereinstellungen für den Hörversuch verwendet.

- Schallfokussierung
 - Delay and Sum Beamforming - DS
 - Zeitumkehrspiegel/Time-reversal mirroring - TRM

- Hörzonen
 - Brightness Control - BC
 - Acoustic Contrast Control - ACC
 - Planarity Control Optimization - PC
 - * $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$
 - * $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$
 - Pressure Matching - PM
 - * $PM_{\varphi=90^\circ}$
 - * $PM_{\varphi=45^\circ}$

Zusätzlich wurde die

- Wiedergabe über drei benachbarte LS (ONE) und

- Wiedergabe über alle LS (ALL)

im Hörversuch evaluiert. Dabei kann die gleichphasige Wiedergabe über drei benachbarte LS (ONE) als Referenz bezeichnet werden, da diese Wiedergabe eine gute Lokalisierbarkeit, Richtungswahrnehmung und Distanzwahrnehmung aufweist. Die Wiedergabe über alle LS (ALL) mit gleichen Gewichten aller LS ist äquivalent zu DS, berechnet für das Zentrum des Arrays. Für diese Position ist die Robustheit der Lokalisation, Richtung und Distanz sehr gering. Die Lautsprechergewichte und die berechneten \mathbf{r}_E -Vektoren für diese beiden Methoden sind im Appendix (Kap.6) dargestellt.

Der Hörversuch wird somit für 10 Methoden durchgeführt. Die Methoden werden hintereinander an nur einer Abhörposition sowohl für die helle und als auch für die dunkle Zone durchgeführt. Die Abhörposition befindet sich im Zentrum der linken Zone und wird als Koordinatenursprung definiert. An der Abhörposition wird mit Hilfe der zuvor berechneten Steuervektoren die helle bzw. die dunkle Zone für jede

Methode realisiert. Die ProbandInnen sitzen auf einem Barhocker, wobei die exakte Position und Höhe (in z -Richtung) an die VersuchsteilnehmerInnen angepasst werden muss. Die Blickrichtung ist entlang der y -Achse des Koordinatensystems (siehe Abb.3.1) und wird mit 90° definiert.

In einem den Hörversuchen vorangegangenen Erhebungsprozess mit Mitgliedern des *expert listening panels* [SPH09] wurde festgestellt, dass jene Methoden, die die Schallenergie in der hellen Zone an einem Punkt fokussieren (TRM, DS), zu einer *Im-Kopf*-Lokalisation führen. Verfahren, bei denen eine Vorzugsrichtung der Schallwiedergabe einstellbar ist (PC, PM), produzieren Quellen, die nahe an den physikalischen Quellen (LS) liegen und eine robuste Richtungswahrnehmung in der hellen Zone generieren. In der dunklen Zone ist das Übersprechen des für die hellen Zone optimierten Audiosignals wahrnehmbar.

Als Audiosignal für den ersten Teil des Hörversuchs wurde Musik mit einem möglichst breiten Spektrum (Schlagzeug, Kontrabass, Klavier) ausgewählt. Zu Beginn des Hörversuchs wird der/die VersuchsteilnehmerIn aufgefordert, die Lokalisation der wahrgenommenen Schallquelle zu beurteilen und mit *lokalisierbar* oder *nicht lokalisierbar* zu bewerten. Für den Fall *nicht lokalisierbar* ist eine neuerliche Entscheidung zwischen *plausibel - Diffusfeld* und *nicht plausibel - utopisch* zu treffen.

Für den Fall *lokalisierbar* ist die Distanz zur reproduzierten Schallquelle abzuschätzen. Die Skala reicht von *Im-Kopf*, *Am-Kopf*, *nahe - 1m* bis zu *fern - 10m*. Anschließend wird die Richtung, aus der die Schallquelle wahrgenommen wird, abgeschätzt. Die Bewertung erfolgt in der Azimut-Ebene und wird in Grad angegeben. Die Robustheit wird für die Parameter *Lokalisation*, *Richtung* und *Lautheit* auf einer Skala von 1 – 10 angegeben. Die Robustheit soll ebenfalls in Hinblick auf verschiedene Frequenzbereiche beurteilt werden und durch das Verhalten der einzelnen Instrumente des Wiedergabesignals mit Hilfe von bereitgestellten Kommentarfeldern beschrieben werden.

Das gleiche Verfahren wird für die dunkle Zone vorgenommen, wobei die Reihenfolge der Methodenblöcke *hell* und *dunkel* zufallsgeneriert ist. Die Reihenfolge der Methoden innerhalb der Methodenblöcke ist ebenfalls zufallsgeneriert.

Eine qualitative Beurteilung der Methoden wird im anschließenden Test durchgeführt. Die ProbandInnen werden aufgefordert, die Methoden bezüglich der Wiedergabequalität zu vergleichen und auf einer Skala von *sehr schlecht* bis *sehr gut* zu ordnen.

Der abschließende Test beinhaltet die Überprüfung der Kontrastwerte der Methoden. Dazu werden zwei Audiosignale über zwei unterschiedliche Steuervektoren

wiedergegeben. In der rechten Zone (ohne ProbandIn) wird rosa Rauschen und in der linken Zone (mit ProbandIn) wird Sprache optimiert wiedergegeben. Die VersuchsteilnehmerInnen werden aufgefordert, die Lautstärke der Sprachwiedergabe so einzustellen, dass sie wahrgenommen und die Sprachverständlichkeit gewährleistet ist, ohne vom Störer maskiert zu werden. Das rosa Rauschen wird in der linken Zone als Störsignal durch Übersprechen aus der rechten Zone wahrgenommen und die Sprache stellt das Nutzsinal in der linken Zone dar. Als Nutzsinal muss eine sich nicht wiederholende Sprachaufnahme gewählt werden, um den Lernprozess des/der ProbandIn und dadurch die leichtere Verständlichkeit der Sprache auszuschließen. In Abb.3.28 ist der Aufbau bzw. der Ablauf des Hörversuchs als Blockschaltbild dargestellt und in Abb.3.29 ist die grafische Oberfläche (GUI - *grafical user interface*) des Hörversuchs abgebildet.

Am Hörversuch nahmen 11 männliche Probanden im Alter zwischen 28 und 55 Jahren teil. Alle Teilnehmer sind erfahrene Probanden für Hörversuche und Mitglieder des *expert listenig panels - ELP* [SPH09]. Die Dauer des Versuchs betrug probandenabhängig ca. 35 bis 45 Minuten. Die drei oben beschriebenen Teile des Hörversuches

- 1.Teil: helle oder dunkle Zone (Lokalisation, Distanz, Richtung, Robustheit, Qualität)
- 2.Teil: helle oder dunkle Zone (Lokalisation, Distanz, Richtung, Robustheit, Qualität)
- 3.Teil: Einstellung der Sprachlautstärke bei gleichzeitiger Wiedergabe von einem Störsignal

wurden unmittelbar hintereinander durchgeführt. In Abschnitt 3.3 werden die Ergebnisse der Evaluierung der Daten präsentiert.

Im folgenden Abschnitt wird folgende Terminologie für die beiden Versuchsfälle verwendet:

- helle Zone: ProbandIn befindet sich in der hellen Zone A, Zone B ist dunkel.
- dunkle Zone: ProbandIn befindet sich in der dunklen Zone A, Zone B ist hell.

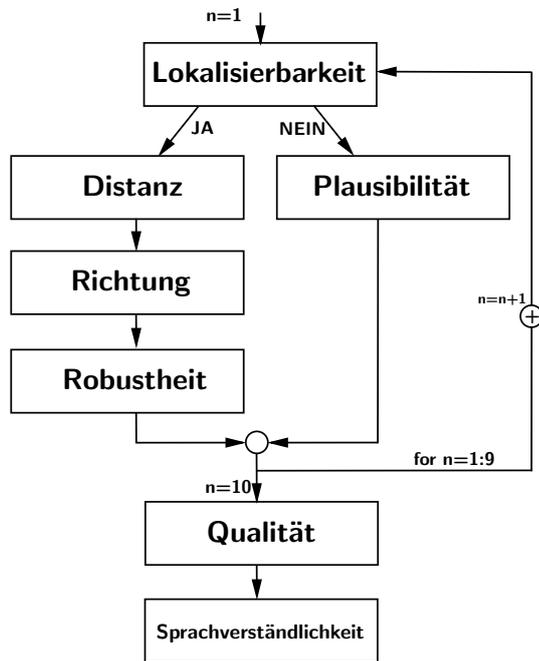


Abbildung 3.28: Überblick über den Aufbau/die Abfolge des Hörversuchs, dargestellt in einem Blockschaltbild. n bezeichnet in dieser Grafik den Methodenindex.

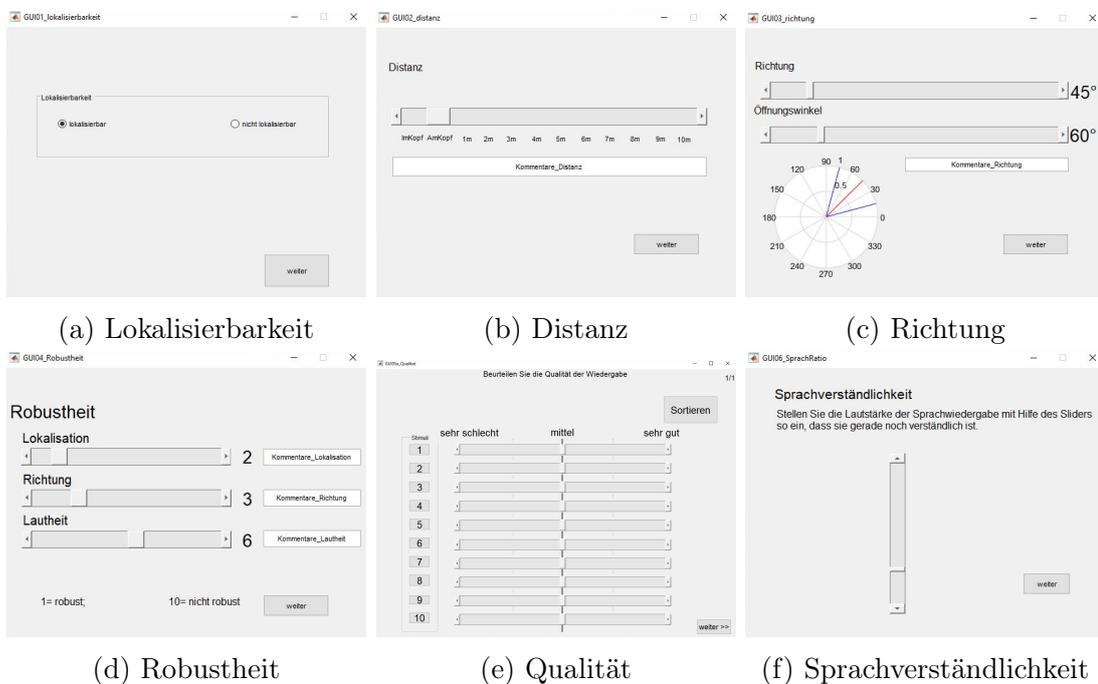
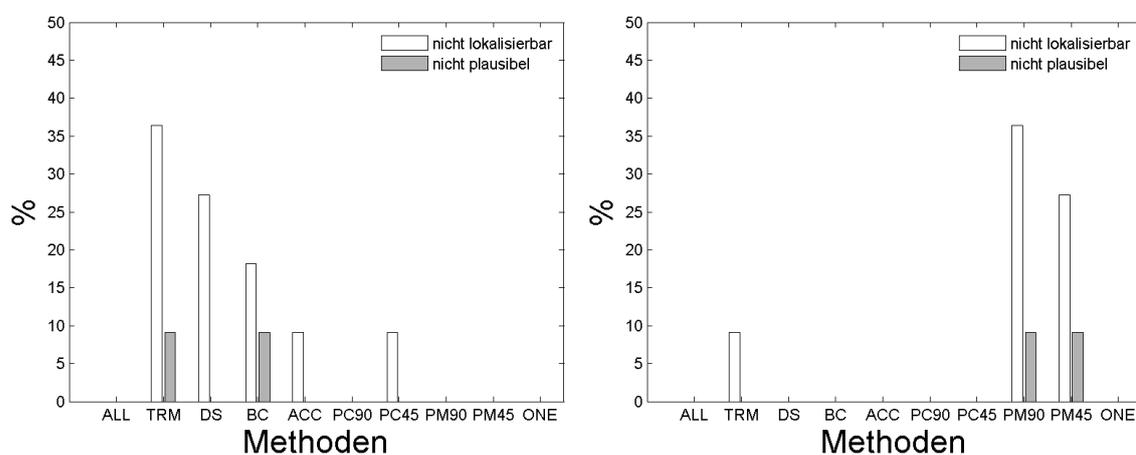


Abbildung 3.29: Grafische Oberflächen des Hörversuchs für die untersuchten räumlichen Aspekte, die Qualität und die Sprachverständlichkeit.

3.3.1 Lokalisation und Plausibilität

Die Lokalisation der wahrgenommenen Schallquelle wurde mit *lokalisierbar* oder *nicht lokalisierbar* bewertet. Für den Fall *nicht lokalisierbar* musste die Plausibilität des wahrgenommenen Hörereignisses mit *plausibel* und *nicht plausibel* bestimmt werden. Eine eindeutige Lokalisation wurde für alle Versuchsteilnehmer für die beiden Referenzmethoden ALL und ONE ausgewertet. Diese beiden Methoden unterscheiden sich in der hellen und dunklen Zone nicht voneinander. PC ist ebenfalls in der hellen und dunklen Zone eindeutig lokalisierbar. Alle anderen Methoden weisen Unterschiede bezüglich der Lokalisation in der hellen und dunklen Zone auf.

Abbildung 3.30a zeigt die Anteile der als *nicht lokalisierbar* und *nicht plausibel* bewerteten Testfälle in Prozent für alle Methoden in der hellen Zone. In Tab.3.2 sind die errechneten Werte in Prozent angegeben. Problematisch stellt sich die Lokalisation in der hellen Zone für die Methoden TRM und DS dar. Dies ist auf die Schallfokussierung auf nur einen Punkt und die damit verbundene Im-Kopf-Lokalisation zurückzuführen. TRM wird dabei zusätzlich in 9% der Fälle im Hörversuch als *nicht plausibel* wahrgenommen. In einer natürlichen Umgebung kommt die Zeitumkehr eines Signals nicht vor und wird daher als befremdlich oder utopisch wahrgenommen.



(a) Helle Zone: Prozentualer Anteil der nicht lokalisierbaren und nicht plausiblen Schallquellen für ALL, TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$, $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$, $PM_{\varphi=90^\circ}$, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$, $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$, $PM_{\varphi=90^\circ}$, $PM_{\varphi=45^\circ}$ und ONE. (b) Dunkle Zone: Prozentualer Anteil der nicht lokalisierbaren und nicht plausiblen Schallquellen für ALL, TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$, $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$, $PM_{\varphi=90^\circ}$, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$, $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$, $PM_{\varphi=90^\circ}$, $PM_{\varphi=45^\circ}$ und ONE.

Abbildung 3.30: Gegenüberstellung der Hörversuchsdaten zwischen heller und dunkler Zone der Lokalisation und der Plausibilität der wahrgenommenen Schallquelle.

In der dunklen Zone werden TRM und DS als absolut *lokalisierbar* bzw. mit ei-

	ALL	TRM	DS	BC	ACC	PC ₉₀	PC ₄₅	PM ₉₀	PM ₄₅	ONE
% nicht lokal.	0	36	27	18	9	0	9	0	0	0
% nicht plaus.	0	9	0	9	0	0	0	0	0	0

Tabelle 3.2: Helle Zone: Prozentualer Anteil der nicht lokalisierbaren sowie nicht plausiblen Methoden in Bezug auf alle getesteten Methoden und VersuchsteilnehmerInnen.

	ALL	TRM	DS	BC	ACC	PC ₉₀	PC ₄₅	PM ₉₀	PM ₄₅	ONE
% nicht lokal.	0	9	0	0	0	0	0	36	27	0
% nicht plaus.	0	0	0	0	0	0	0	9	9	0

Tabelle 3.3: Dunkle Zone: Prozentualer Anteil der nicht lokalisierbaren sowie nicht plausiblen Methoden in Bezug auf alle getesteten Methoden und VersuchsteilnehmerInnen.

nem geringeren Prozentsatz als *nicht lokalisierbar* wahrgenommen. Der Fokuspunkt, in dem es zur positiven Interferenz aller Lautsprecher signale für TRM und DS kommt, befindet sich in Zone B, etwa 1.35m von dem/der ProbandIn entfernt. Dadurch kommt es zu keiner Im-Kopf-Lokalisation. Wahrgenommen werden in der dunklen Zone Signalanteile von allen LS in Abhängigkeit von den Lautsprecher gewichten, wodurch sich eine Schallquelle aus einer bestimmten Richtung ergibt (vgl. Kap.3.3.3). Die nicht eindeutige Lokalisation von $PM_{\varphi=90^\circ}$ und $PM_{\varphi=45^\circ}$ in der dunklen Zone ist auf die hohen diffusen Schallanteile zurückzuführen. Die Auslöschungen durch die Energieminimierung in der dunklen Zone für PM werden bei der Berechnung der \mathbf{r}_E -Vektoren nicht berücksichtigt (vgl. Abb.3.21 und Abb.6.2).

3.3.2 Distanz

Die Distanz der lokalisierbaren Schallquelle konnte auf einer Skala von *Im-Kopf*, *Am-Kopf*, *1m*, ... , *10m* bewertet werden. In Abb.3.32 sind die Mittelwerte sowie die 95%-Konfidenzintervalle der Daten für jede Methode dargestellt. Die Konfidenzintervalle geben an, dass der wahre Wert zu 95% der Fälle von den Intervallgrenzen umschlossen wird. Die Mittelwerte sind durch die Kreise und die Konfidenzintervalle durch die Antennen in der Grafik gekennzeichnet. Auf der Abszisse sind die 10 Methoden und auf der von *Im-Kopf* bis *6m* beschränkten Ordinate ist die Distanz aufgetragen. Die gemittelten Distanzen können mit den Abständen von Abhörposition zu den am stärksten gewichteten Lautsprechern für jede Methode verglichen werden. In Abb.3.31 sind die errechneten Distanzen von der Abhörposition zu den am stärksten gewichteten Lautsprechern angegeben. Die Gewichte der Lautsprecher für jede Methode sowie die berechneten \mathbf{r}_E -Vektoren sind in Kap.3.2.2 grafisch dargestellt.

In der hellen Zone ergibt sich eine Im-Kopf-Lokalisation für TRM und DS (Abb.3.32a). Die geschätzte Distanz für BC liegt im Bereich um 1m, was dem berechneten \mathbf{r}_E -Vektor entspricht. Die evaluierten Distanzen für PC und PM entsprechen den berechneten Distanzen, wobei für die Methoden $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$ und $PM_{\varphi=45^\circ}$ die Distanzen größer beurteilt werden, als für die 90° -Richtung. Die geschätzte Distanz für ACC liegt über der errechneten Distanz. Ähnliches gilt für ALL, das als weiter entfernt als berechnet geschätzt wird.

In der dunklen Zone werden für ALL, DS und TRM die nächsten LS detektiert. Dies stimmt für ALL und DS mit den berechneten \mathbf{r}_E -Vektoren überein, TRM wird allerdings aus der um 180° gedrehten Richtung wahrgenommen. Alle anderen Methoden werden fernerer Distanzen zugeordnet, dies könnte auf die geringere Lautstärke der Wiedergabe in der dunklen Zone im Vergleich zur hellen Zone zurückzuführen sein. In der dunklen Zone werden mehr diffuse Anteile der Schallwiedergabe wahrgenommen. Dadurch ändert sich das Verhältnis zwischen direktem und diffusem Schallanteil und die Distanzen werden tendenziell größer bewertet.

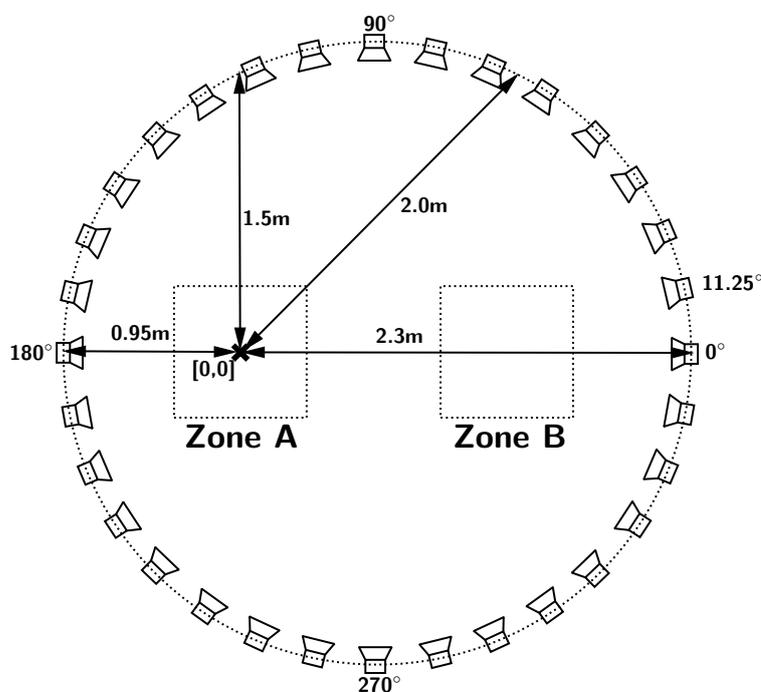
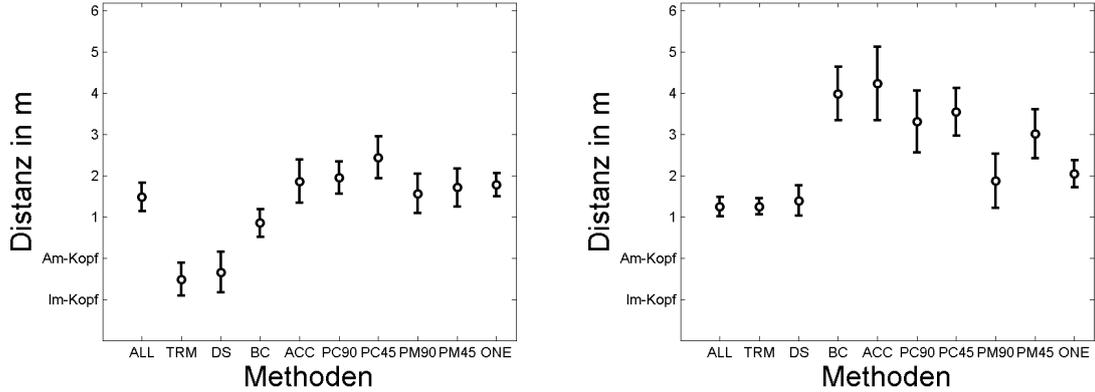


Abbildung 3.31: Aufbau kreisförmiges LS-Array



(a) Helle Zone: Distanz zur wahrgenommenen Schallquelle für ALL, TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$, $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$, $PM_{\varphi=90^\circ}$, $PM_{\varphi=45^\circ}$ und ONE. (b) Dunkle Zone: Distanz zur wahrgenommenen Schallquelle für ALL, TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$, $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$, $PM_{\varphi=90^\circ}$, $PM_{\varphi=45^\circ}$ und ONE.

Abbildung 3.32: Gegenüberstellung der Hörversuchsdaten zwischen heller und dunkler Zone der Distanz zur wahrgenommenen Schallquelle.

3.3.3 Richtung und Öffnungswinkel

Die Richtung der lokalisierten Schallquelle konnte in 1° -Schritten in einem Bereich von $0^\circ - 259^\circ$ eingestellt werden. Der Drehpunkt der Richtungsangabe ist die Abhörposition und die Blickrichtung des/der ProbandIn ist mit 90° definiert. Neben der Richtung musste zusätzlich die Quellbreite/der Öffnungswinkel ν abgeschätzt werden. Während des Hörversuchs wurden die eingestellte Richtung sowie der Öffnungswinkel in einem Polarplot dargestellt, um den TeilnehmerInnen ein visuelles Feedback der gegebenen Antworten zu bieten (vgl. Abb.3.29c). Aufgrund der zirkulären Daten kann die Berechnung der Mittelwerte und Konfidenzintervalle nicht mit üblichen statistischen Methoden durchgeführt werden, sondern muss mit Methoden der *directional statistics* durchgeführt werden [Ber09]. Dazu werden die ausgewerteten Richtungen in Einheitsvektoren \mathbf{r}_i in einer zweidimensionalen Ebene transformiert

$$\mathbf{r}_i = [\cos(\varphi_i), \sin(\varphi_i)]^T \quad (3.14)$$

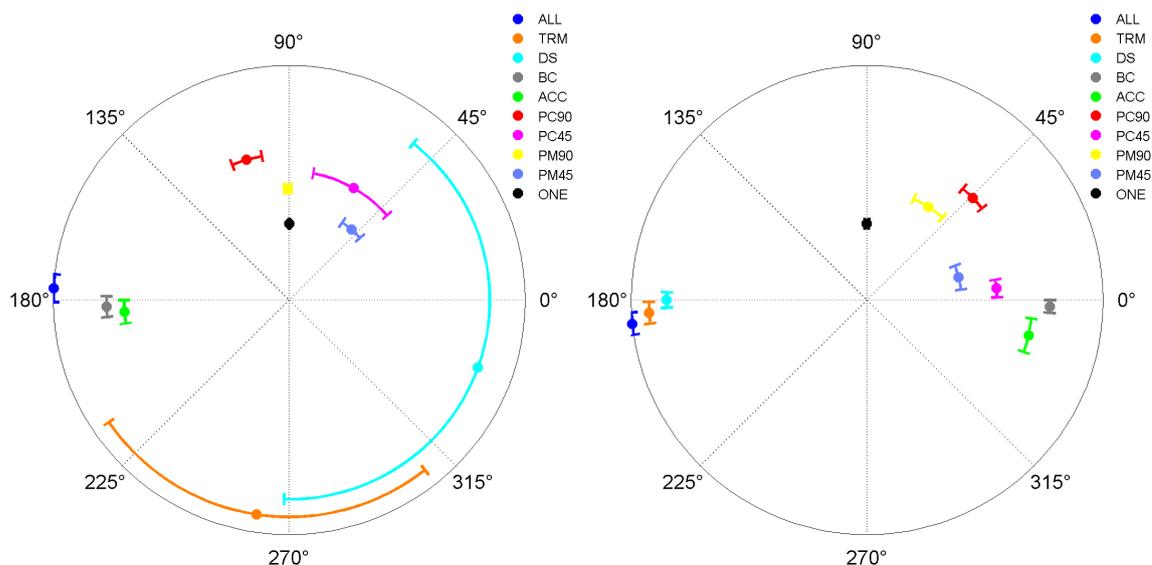
und der Einheitsvektor des Mittelwerts wird anschließend folgend berechnet

$$\hat{\mathbf{r}} = \frac{1}{I} \sum_i \mathbf{r}_i. \quad (3.15)$$

Für die Umsetzung in MATLAB wurde die Toolbox *CircStat* verwendet um Mittelwert und Konfidenzintervalle ⁸ zu berechnen. In Abb.3.33 sind die Mittelwerte der

⁸Vergleiche [Ber09] Kap.3.2

zirkulären Daten der Richtungen für jede Methode sowie die 95% Konfidenzintervalle zur besseren Übersicht ebenfalls in einem Polarplot dargestellt. Die unterschiedlichen Radien dienen neben der Farbcodierung zur Unterscheidung der Methoden in der Darstellung. Die Mittelwerte und Konfidenzintervalle der Öffnungswinkel sind in Abb.3.34 dargestellt.



(a) Helle Zone: Richtung zur wahrgenommenen Schallquelle für ALL, TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^{\circ},\psi=10^{\circ}}$, $PC_{\varphi=45^{\circ},\psi=10^{\circ}}$, $PM_{\varphi=90^{\circ}}$, $PM_{\varphi=45^{\circ}}$ und ONE. (b) Dunkle Zone: Richtung zur wahrgenommenen Schallquelle für ALL, TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^{\circ},\psi=10^{\circ}}$, $PC_{\varphi=45^{\circ},\psi=10^{\circ}}$, $PM_{\varphi=90^{\circ}}$, $PM_{\varphi=45^{\circ}}$ und ONE.

Abbildung 3.33: Gegenüberstellung der Hörversuchsdaten zwischen heller und dunkler Zone der Richtung, aus der die Schallquelle wahrgenommen wurde.

In der hellen Zonen wird für die Methoden ALL, BC und ACC eine Richtung von ca. 180° mit einer geringen Streuung angegeben. Da bei der Methode ALL alle LS mit den selben Gewichten bespielt werden, wird der LS mit der geringsten Distanz zur Abhörposition als Schallquelle wahrgenommen. Für die Methoden BC und ACC ist die Wahrnehmung aus der 180° -Richtung auf die größten LS-Gewichte aus dieser Richtung zurückzuführen. Für TRM und DS ist die Angabe der Richtung bei der Im-Kopf-Lokalisation nicht möglich. Allerdings ist die Im-Kopf-Lokalisation sehr stark von der Position des Probanden/der Probandin abhängig. Ist die Kopfposition nicht exakt im Fokussierungspunkt, kommt es zu einer Lokalisation aus einer Richtung, wodurch die große Streuung der Versuchsergebnisse für TRM und DS entsteht.

Aus den Kommentaren der Versuchsteilnehmer geht ebenfalls hervor, dass die Lokalisation einerseits frequenzabhängig (z.B.: Mitten von vorne, Höhen von hinten) und andererseits ortsabhängig ist. Die berechneten \mathbf{r}_E -Vektoren beziehen die Verzögerung bei DS und die Zeitumkehr bei TRM nicht mit ein, wodurch die unterschiedlichen Ergebnisse erklärbar sind.

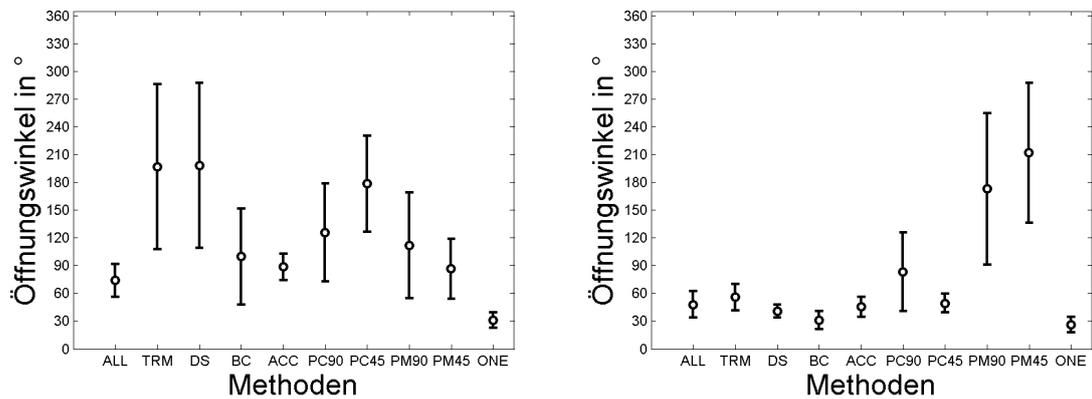
Ein sehr gutes Ergebnis der Richtungswahrnehmung liefert PM, sowohl für die 45° als auch für die 90° -Richtung. Die exakte Richtungswahrnehmung aus 45° bzw. 90° ist bei PC nicht gegeben. Die Auswertung ergibt in beiden Fällen eine Diskrepanz von etwa $+10^\circ$ (etwa 55° bzw. 100°). Ein Grund für diese Diskrepanz liegt im frequenzabhängigen Verhalten der Richtungswahrnehmung. Die ProbandInnen hatten die Möglichkeit Kommentare zu Distanz, Richtung und Robustheit abzugeben. Speziell für die Methode $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$ wurde mehrmals kommentiert, dass mittlere Frequenzen (Klavier) aus der vorgegebenen Richtung von z.B. 45° wahrgenommen wurden, hohe Frequenzen (Becken) aber aus einer völlig anderen Richtung, wodurch es zu einer Aufspreizung des Wiedergabesignals kommt. Die Referenzschallquelle ONE wurde eindeutig aus der 90° -Richtung wahrgenommen.

In der dunklen Zone wird für die Methoden ALL, TRM und DS eine Richtung von ca. 180° mit einer geringen Streuung angegeben. Dies weist wiederum auf die Wahrnehmung des nächsten LS hin. BC hat die größten LS-Gewichte bei 0° und wird auch aus dieser Richtung wahrgenommen. Die LS-Gewichte haben ihr Maximum nicht aus der 0° -Richtung, sondern frequenzabhängig an symmetrischen LS-Positionen bei z.B. $\pm 11^\circ$ oder $\pm 22^\circ$. Aufgrund der Symmetrie der LS-Gewichte entsteht theoretisch eine Phantomschallquelle aus der 0° -Richtung. Im Hörversuch wurde eine Verschiebung um ca. -10° wahrgenommen.

PC und PM wurden in der dunklen Zone aus 45° lokalisiert. Diese Verschiebung ist auf die Geometrie des Systemaufbaus zurückzuführen. Für die 90° -Einfallrichtung auf die dunkle Zone werden die Lautsprecher im rechten, oberen Kreissegment am stärksten gewichtet. Aus der Abhörposition gesehen befinden sich diese LS in der etwa 45° -Richtung. Dieselbe Tendenz zeigen $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$ und $PM_{\varphi=45^\circ}$, die nicht aus 45° , sondern aus einem flacheren Winkel wahrgenommen werden. Die Richtungslokalisierung ist bei PM stark frequenzabhängig, so wird die Basswiedergabe in der dunklen Zone laut Kommentaren der ProbandInnen aus allen Richtungen wahrgenommen, hingegen die höheren Frequenzanteile aus den eingestellten Richtungen.

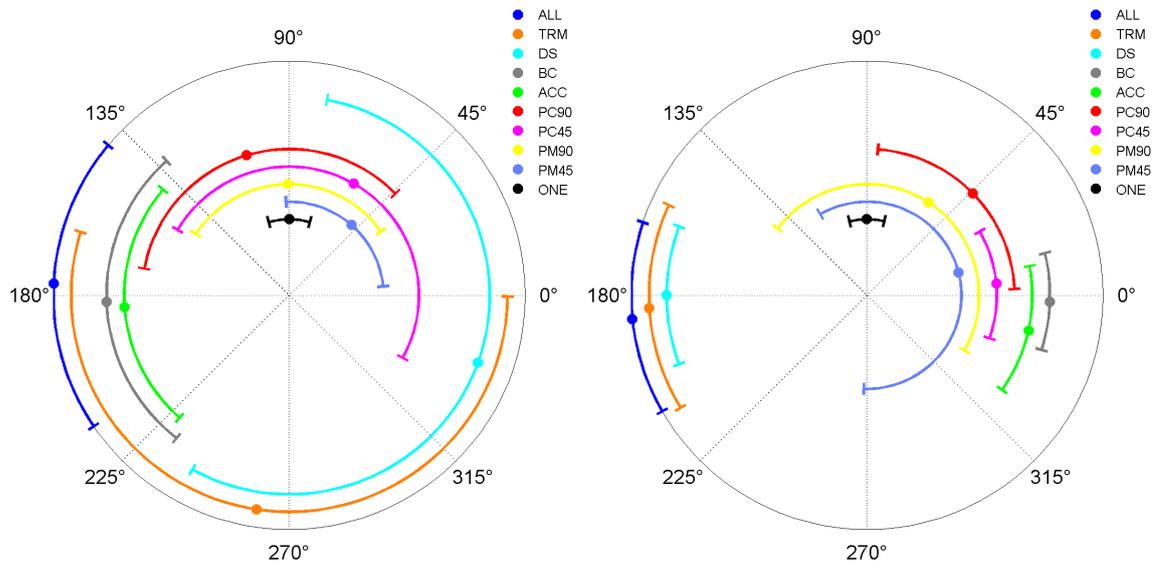
In der hellen Zone unterscheiden sich die mittleren Öffnungswinkel oder Quellbreiten ν der Methoden deutlich voneinander. Die Referenzen ALL und ONE werden als sehr schmal wahrgenommen, wohingegen TRM und DS als sehr breit beurteilt werden.

In der dunklen Zone werden alle Methoden mit einer sehr schmalen Quellbreite beurteilt. Ausnahme bilden hier nur $PM_{\varphi=90^\circ}$ und $PM_{\varphi=45^\circ}$. In Abb.3.35 sind zur besseren Übersicht die Mittelwerte der Richtungen und die Mittelwerte der Öffnungswinkel in einer Grafik dargestellt.



(a) Helle Zone: Öffnungswinkel zur wahrgenommenen Schallquelle für ALL, TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$, $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$, $PM_{\varphi=90^\circ}$, $PM_{\varphi=45^\circ}$ und ONE. (b) Dunkle Zone: Öffnungswinkel zur wahrgenommenen Schallquelle für ALL, TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$, $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$, $PM_{\varphi=90^\circ}$, $PM_{\varphi=45^\circ}$ und ONE.

Abbildung 3.34: Gegenüberstellung der Hörversuchsdaten zwischen heller und dunkler Zone des Öffnungswinkels zur wahrgenommenen Schallquelle.

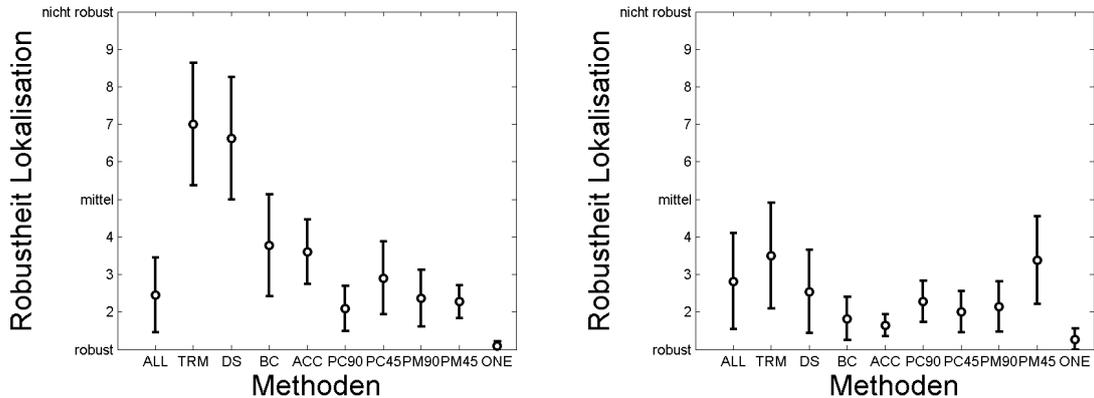


(a) Helle Zone: mittlere Richtung und mittlerer Öffnungswinkel zur wahrgenommenen Schallquelle für ALL, TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^{\circ}, \psi=10^{\circ}}$, $PC_{\varphi=45^{\circ}, \psi=10^{\circ}}$, $PM_{\varphi=90^{\circ}}$, $PM_{\varphi=45^{\circ}}$ und ONE. (b) Dunkle Zone: mittlere Richtung und mittlerer Öffnungswinkel zur wahrgenommenen Schallquelle für ALL, TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^{\circ}, \psi=10^{\circ}}$, $PC_{\varphi=45^{\circ}, \psi=10^{\circ}}$, $PM_{\varphi=90^{\circ}}$, $PM_{\varphi=45^{\circ}}$ und ONE.

Abbildung 3.35: Gegenüberstellung der Hörversuchsdaten zwischen heller und dunkler Zone der mittleren Richtung und des mittleren Öffnungswinkels der wahrgenommenen Schallquelle.

3.3.4 Robustheit der Lokalisation, Richtung und Lautheit

Neben den abzuschätzenden Absolutwerten der räumlichen Aspekte, wurde die Robustheit der Lokalisation, Richtung und Lautheit der einzelnen Methoden gegenüber einer Bewegung des/der ProbandIn innerhalb der Zone evaluiert. Die Beurteilungsskala reicht von 1 (*robust*), 5 (*mittel*) bis 10 (*nicht robust*).



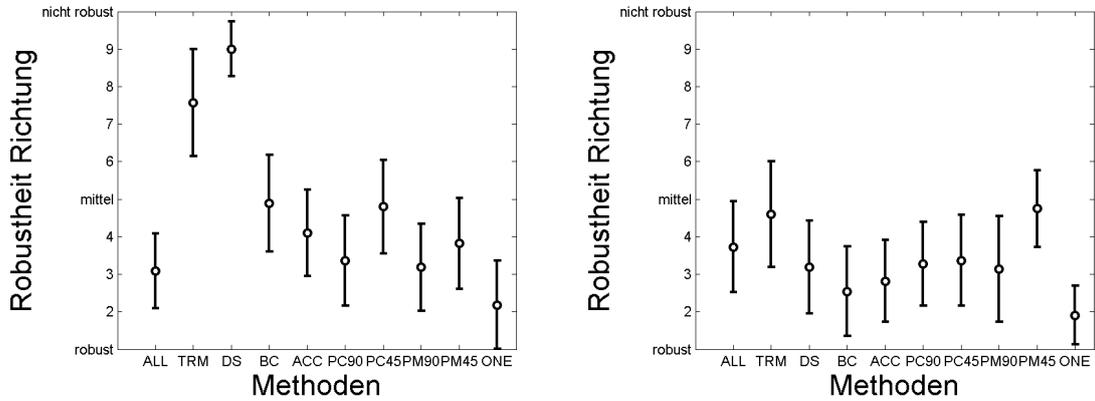
(a) Helle Zone: Robustheit der Lokalisation der wahrgenommenen Schallquelle für ALL, TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$, $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$, $PM_{\varphi=90^\circ}$, $PM_{\varphi=45^\circ}$ und ONE.
 (b) Dunkle Zone: Robustheit der Lokalisation der wahrgenommenen Schallquelle für ALL, TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$, $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$, $PM_{\varphi=90^\circ}$, $PM_{\varphi=45^\circ}$ und ONE.

Abbildung 3.36: Gegenüberstellung der Hörversuchsdaten zwischen heller und dunkler Zone der Robustheit der Lokalisation der wahrgenommenen Schallquelle.

Die Mittelwerte sowie die 95%-Konfidenzintervalle der Robustheit der Lokalisation sind in Abb.3.36 dargestellt. Die Referenz ONE wird als robust lokalisierbar in beiden Zonen wahrgenommen. Die zweite Referenz ALL wird aufgrund der sich ändernden Phasenüberlagerung und den damit verbundenen Kammfiltereffekten als weniger robust als ONE beurteilt. In der hellen Zone wird TRM und DS als *mittel* bis *nicht robust* beurteilt. Dies lässt sich auf die Fokussierung auf nur einen Punkt in der hellen Zone zurückführen. BC und ACC sind deutlich robuster lokalisierbar, mit Werten zwischen etwa 2.5 und 5, wobei ACC etwas robuster lokalisierbar ist. Die robustesten Ergebnisse liefern $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$, $PM_{\varphi=90^\circ}$ und $PM_{\varphi=45^\circ}$. Die etwas schlechteren Werte von $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$ spiegeln sich auch in den Kommentaren der VersuchsteilnehmerInnen wieder. Hier werden die hohen Frequenzanteile als nicht eindeutig aus einer Richtung lokalisierbar bezeichnet. Ähnliche Kommentare wurden für $PM_{\varphi=45^\circ}$ gegeben, allerdings mit besserer Bewertung. In der dunklen Zone ist allgemein eine robustere Lokalisation für alle Methoden festzustellen. Eine Ausnahme bildet $PM_{\varphi=45^\circ}$, welches in der dunklen Zone nicht robuster lokalisierbar ist. $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$ wird von den Versuchsteilnehmern als nicht robust in den hohen Frequenzanteilen beschrieben.

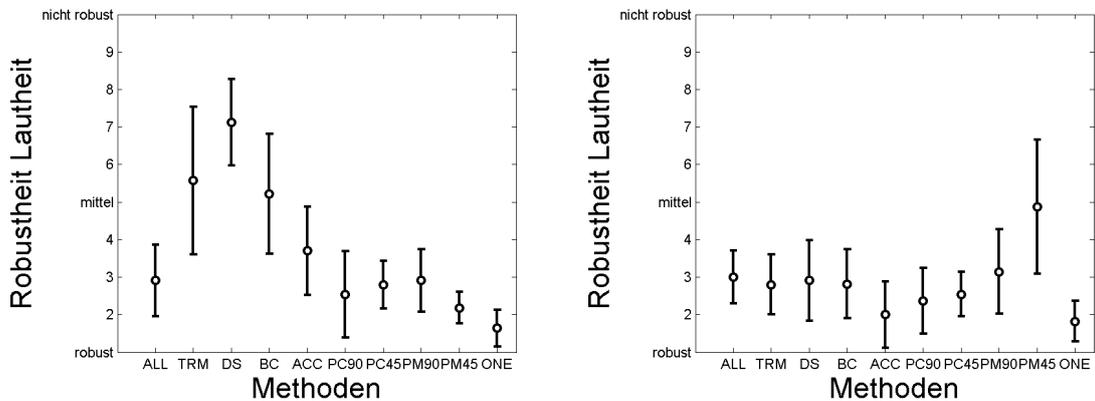
Die Robustheit der wahrgenommenen Richtung weist ein äquivalentes Verhalten auf wie die Robustheit der Lokalisation für die einzelnen Methoden (Abb.3.37). Allerdings wird die Richtung im Allgemeinen als weniger robust beurteilt und die Konfidenzintervalle sind etwas größer. Die Richtungswahrnehmung von DS wird als am

wenigsten robust beurteilt, obwohl es robuster lokalisiert wird als TRM.



(a) Helle Zone: Robustheit der Richtung der wahrgenommenen Schallquelle für ALL, TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$, $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$, $PM_{\varphi=90^\circ}$, $PM_{\varphi=45^\circ}$ und ONE.
 (b) Dunkle Zone: Robustheit der Richtung der wahrgenommenen Schallquelle für ALL, TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$, $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$, $PM_{\varphi=90^\circ}$, $PM_{\varphi=45^\circ}$ und ONE.

Abbildung 3.37: Gegenüberstellung der Hörversuchsdaten zwischen heller und dunkler Zone der Robustheit der Richtung der wahrgenommenen Schallquelle.



(a) Helle Zone: Robustheit der Lautheit der wahrgenommenen Schallquelle für ALL, TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$, $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$, $PM_{\varphi=90^\circ}$, $PM_{\varphi=45^\circ}$ und ONE.
 (b) Dunkle Zone: Robustheit der Lautheit der wahrgenommenen Schallquelle für ALL, TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$, $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$, $PM_{\varphi=90^\circ}$, $PM_{\varphi=45^\circ}$ und ONE.

Abbildung 3.38: Gegenüberstellung der Hörversuchsdaten zwischen heller und dunkler Zone der Robustheit der Lautheit der wahrgenommenen Schallquelle.

In Abb.3.38 sind die Mittelwerte und Konfidenzintervalle für die Robustheit der Lautheit dargestellt. In der hellen Zone werden DS und TRM als nicht robust wahr-

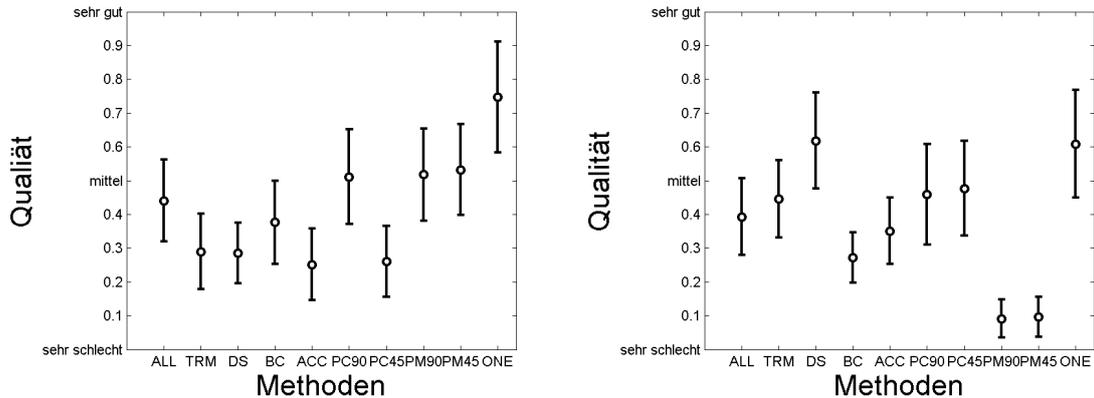
genommen, wohingegen die robustesten Ergebnisse für $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$, $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$, $PM_{\varphi=90^\circ}$, $PM_{\varphi=45^\circ}$ und für ONE vorliegen.

Allgemein zeigt sich für alle drei Kategorien der Robustheit ein ähnliches Bild. TRM und DS werden als nicht robust beurteilt, BC und ACC erreichen bessere Werte, liegen aber im Mittelfeld der Skala (wobei ACC etwas robuster als BC beurteilt wird) und die robustesten Ergebnisse sind für die PC- und PM-Methoden zu verzeichnen.

3.3.5 Qualität der Wiedergabe

Die Qualität der Wiedergabe wurde mit Hilfe eines Präferenztests evaluiert. Die ProbandInnen konnten die verschiedenen Methoden beliebig oft anhören und miteinander vergleichen. Die Aufgabe bestand darin, die Qualität auf einer Skala von 0 (*sehr schlecht*) bis 1 (*sehr gut*) zu beurteilen und die Methoden nach ihrer Qualität zu reihen. In Abb.3.39 sind die Ergebnisse ersichtlich. Die Qualität der Referenz ONE wird am besten bewertet. $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$, $PM_{\varphi=90^\circ}$ und $PM_{\varphi=45^\circ}$ werden in der hellen Zone mit Werten leicht über *mittlerer* Qualität bewertet. Die Mittelwerte der Qualität für ACC und $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$ sind mit ca. 0.25 am schlechtesten bewertet, wohingegen TRM und DS geringfügig bevorzugt werden und BC mit dem Mittelwert um 0.4 noch unter den sehr guten Werten von $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$, $PM_{\varphi=90^\circ}$ und $PM_{\varphi=45^\circ}$ liegt.

In der dunklen Zone wird DS sehr ähnlich zu ONE bewertet. Eine mögliche Erklärung ist die höhere Lautstärke in der dunklen Zone bei DS im Vergleich zu anderen Methoden, die das Übersprechen anhand von Randbedingungen minimieren. $PM_{\varphi=90^\circ}$ und $PM_{\varphi=45^\circ}$ werden am schlechtesten beurteilt.



(a) Helle Zone: Qualität der wahrgenommenen Schallquelle für ALL, TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$, $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$, $PM_{\varphi=90^\circ}$, $PM_{\varphi=45^\circ}$ und ONE. (b) Dunkle Zone: Qualität der wahrgenommenen Schallquelle für ALL, TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$, $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$, $PM_{\varphi=90^\circ}$, $PM_{\varphi=45^\circ}$ und ONE.

Abbildung 3.39: Gegenüberstellung der Hörversuchsdaten zwischen heller und dunkler Zone der Qualität des wiedergegebenen Audiosignals.

3.3.6 Sprach- und Rauschwiedergabe in unterschiedlichen Zonen

Im dritten Teil des Hörversuchs musste die Lautstärke der Sprachwiedergabe in der hellen Zone so eingestellt werden, dass die Sprache trotz der gleichzeitigen, optimierten Wiedergabe von weißem Rauschen in der Zone B verständlich ist. In Abb.3.40 ist das Verhältnis der eingestellten Wiedergabelautstärke zur Wiedergabelautstärke des weißen Rauschens in dB dargestellt. Dementsprechend bezeichnet 0dB die gleiche Wiedergabelautstärke⁹ der beiden Signale. Negative Werte bedeuten eine geringere Wiedergabelautstärke des Sprachsignals gegenüber dem Rauschen.

Für die beiden Referenzschallquellen muss die Lautstärke des Sprachsignals einen gleich hohen Wert wie für das Rauschen annehmen. Dies ist dadurch zu erklären, dass es keine Optimierung der Zonen für diese Methoden gibt. DS weist ebenfalls einen SNR-Wert von etwa 0dB auf, was auf die geringen Kontrastwerte zwischen heller und dunkler Zone für DS zurückzuführen ist (vgl. Kap.3.2.1). $PM_{\varphi=90^\circ}$ und $PM_{\varphi=45^\circ}$ erreichen im Vergleich zu allen anderen Methoden die niedrigsten mittleren SNR-Werte von etwa $-7dB$ bis $-8dB$. Trotz sehr guter Kontrastwerte (vgl. Kap.3.2.1) erreichen $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ und $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$ nur geringe mittlere SNR-Werte um $-3dB$. Bessere Ergebnisse liefern BC und ACC mit mittleren SNR-Werten um $-6dB$.

⁹Die Wiedergabelautstärke wurde in diesem Fall in der Software auf den selben Pegelwert gesetzt. Die Lautheit des Signals wird nicht miteinbezogen.

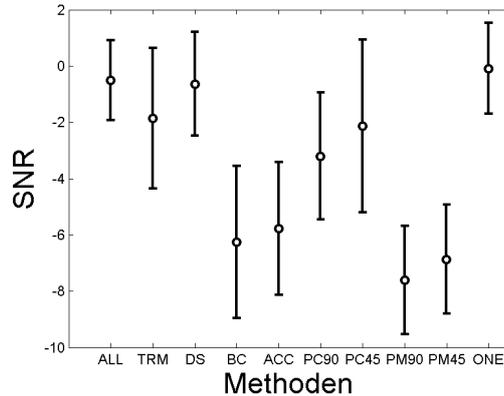


Abbildung 3.40: Verhältnis der Wiedergabelautstärke von Sprache in Zone A und weißem Rauschen in Zone B in dB für ALL, TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$, $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$, $PM_{\varphi=90^\circ}$, $PM_{\varphi=45^\circ}$ und ONE.

3.3.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die evaluierten Hörversuchsdaten aus Kap.3.3 ermöglichen eine qualitative Beschreibung und einen Vergleich zwischen den getesteten Methoden. Die Referenzmethoden dienten zur Kontrolle der aufgenommenen Daten und weisen ein erwartungsgemäßes Verhalten hinsichtlich aller getesteten räumlichen Aspekte, der Qualität und der SNR-Werte der Sprach- bzw. Rauschwiedergabe auf.

Die Methoden DS und TRM, welche Schall an einem Punkt in der hellen Zone fokussieren, ohne Nebenbedingung für die dunkle Zone, werden aufgrund der *Im-Kopf*-Lokalisation als am wenigsten *robust* wahrgenommen. Außerdem ist die *Im-Kopf*-Lokalisation positionsabhängig und wurde nicht von allen VersuchsteilnehmerInnen als solche wahrgenommen (DS:27% bzw. TRM:36% nicht lokalisierbar).

Da ACC eine Weiterentwicklung von BC ist, ähnelt sich das Verhalten der beiden Methoden sehr stark. Insgesamt sind die beiden Methoden aufgrund ihrer technischen als auch qualitativen Merkmale TRM und DS eindeutig vorzuziehen. Allgemein gesprochen weist ACC eine höhere Robustheit als BC auf und wird auch mit einer besseren Qualität bewertet. Der höhere SNR-Wert der Sprachwiedergabe für ACC als bei BC widerspricht der Theorie, da ACC bessere Kontrastwerte generieren kann.

Die Verfahren PC und PM erlauben die Einstellung der Einstrahlungsrichtung, aus der der Schall wiedergegeben werden soll. Die Richtungswahrnehmung funktioniert für PM sehr gut, bei PC sind Diskrepanzen detektierbar. Die Robustheit von PC und PM ist im Allgemeinen höher als die Robustheit aller anderen Methoden. $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$ ist dabei durchwegs als nicht so robust wie $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ bewertet, die Qualität wird

aber für $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$ als besser beurteilt. Im Vergleich PC zu PM ist es schwer, eine zu bevorzugende Methode zu bestimmen, da es wenig Unterschiede hinsichtlich Robustheit und Qualität zu verzeichnen gibt. Der SNR-Wert der Sprachwiedergabe ist für PM deutlich geringer als für PC.

Kapitel 4

Schallfokussierung und Erzeugung von Hörzonen in reflektiver Umgebung

In Kap.3 wurden die Methoden in einem reflexionsarmen Raum für simulierte Raumimpulsantworten berechnet und mit Hilfe von physikalischen Größen sowie eines formellen Hörversuchs evaluiert. In Kap.4 werden die Methoden für eine reflektive Umgebung (IEM CUBE) berechnet und mittels der vorgestellten physikalischen Messgrößen evaluiert. Im CUBE ist ein LS-Array mit 24 LS fix installiert (Kap.4.2). Als zweites LS-Array wurde der mobile Ikosaeder-LS mit 20 LS verwendet (Kap.4.3).

4.1 Messaufbau für den akustisch nicht bearbeiteten Raum

Der CUBE hat eine Grundfläche von ca. $120m^2$ und eine Raumhöhe von ca. $4.20m$. Um stehende Wellen bzw. Flatterechos zu vermeiden sind die Wände sowie die Decke und der Fußboden nicht parallel zueinander. Das LS-Array besteht aus drei Ringen, die übereinander im CUBE angeordnet sind [ZSR03]. Der erste Ring besteht aus 12 LS, die in einer Höhe von etwa $1.30m - 1.40m$ angebracht sind. Der zweite Ring besteht aus 8 LS in einer Höhe von $3.8m - 4.2m$ und der dritte Ring aus 4 LS in einer Höhe von $4.15m - 4.45m$. Die genauen Koordinaten können in Tab.6.1 nachgeschlagen werden.

Es wurden zwei quadratische Zonen in der Größe von $0.7 \times 0.7m$ definiert. Die Position der linken Zone A wurde vom Zentrum der LS-Kuppel/des Raumgrundrisses in einem Abstand von $-0.8m$ in x- sowie y-Richtung fixiert. Die rechte Zone B ist in einem Abstand von $1m$ in x-Richtung vom rechten Rand der Zone A angeordnet

Anregungssignal	exp. sweep	interl.=2s	duration=5s
LS CUBE	Tannoy	24 Stk.	
LS IKO		20 Stk.	
Preamp	D.O.TEC Andiamo	32 Ch.	
Messmikrophone	NTi M2230	64 Stk.	
Mikrophone-Array	0.7m x 0.7m	8 x 8	$\Delta x = 0.1m$
Kalibrator	Brüel & Kjaer	94dB	1kHz

Tabelle 4.1: Verwendetes Equipments und technische Daten der Messung.

und die Höhe der Zonen in z -Richtung wurde auf $1.31m$ eingestellt (Abb.4.1). Die Höhe ergibt sich aus der angenommenen Ohrhöhe einer sitzenden Person. Es wurden 64 Messmikrophone als Empfänger in einem horizontal angeordneten Array und einem äquidistanten Abstand $\Delta x = \Delta y = 0.1m$ verwendet. Dadurch ergeben sich $N_{cube} \times M_{cube} = 24 \times 64$ gemessene Raumimpulsantworten für die Übertragungsfunktionsmatrix \mathbf{H}_b bzw. \mathbf{H}_d . Aufgrund der größeren Abstände zwischen den Mikrofonen ergibt sich die Aliasingfrequenz des Mikrophonarrays zu $f_{alias} = \frac{c}{2\Delta x} = \frac{343}{0.2} = 1715Hz$.

Zwischen den Zonen, aber in einem Abstand von $3.8m$ in y -Richtung, wurde der Ikosaeder-LS platziert (vgl. Abb.4.1). Die Übertragungsfunktionsmatrizen für dieses LS-Array haben eine Größe von $N_{iko} \times M_{iko} = 20 \times 64$.

Der CUBE war während der Messungen nicht bestuhlt und die Vorhänge waren nicht vorgezogen, wodurch mehr Raumreflexionen zu erwarten sind. Zusätzlich waren zwischen den Lautsprechern 01-02, 02-03, 11-12, 12-01 Reflektoren aufgebaut (vgl. Abb.4.2 und Tab.6.1). In Tab.4.1 sind die technischen Daten der Messung bzw. des verwendeten Equipments aufgelistet und in Abb.4.1 ist der Messaufbau dargestellt.

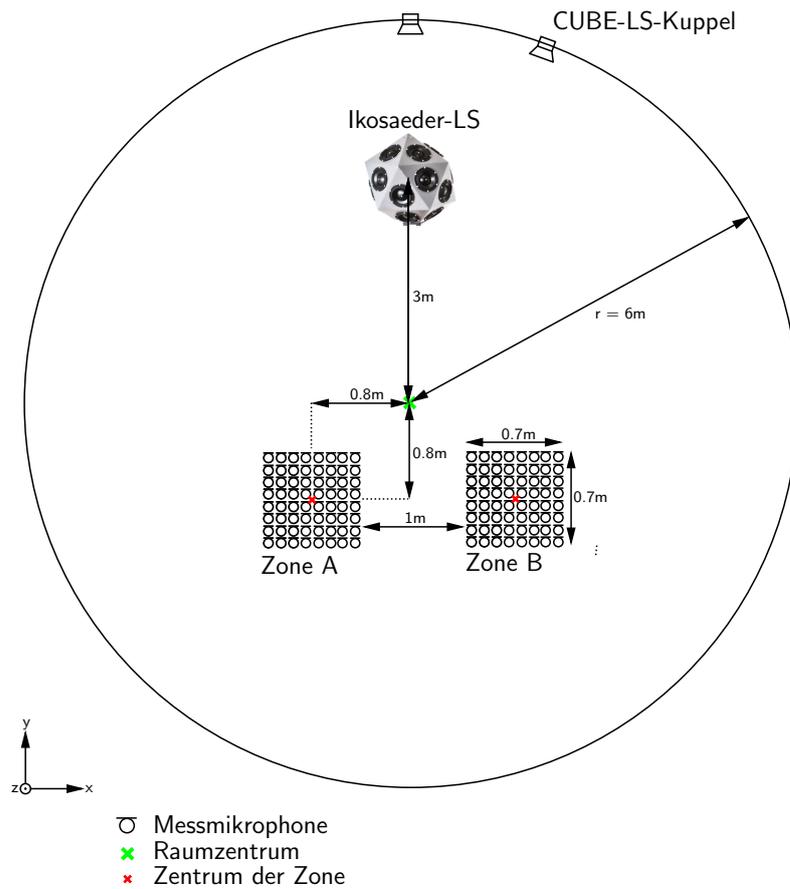


Abbildung 4.1: Setup CUBE: Position der Zonen A und B. Bemaßungen beziehen sich auf das Zentrum der Zonen ausgehend vom Raumzentrum. LS-Positionen für CUBE Kuppel idealisiert und schematisch dargestellt. Icosaeder-LS Koordinaten: $[x, y, z] = [0, 3, 1]$ in m .



(a) Messaufbau Mikrophonarray

(b) Ikosaeder LS



(c) Setup in y-Richtung photographiert. LS-(LS01,02,11,12), Reflektor- und Ikosaeder -LS-Position

Abbildung 4.2: Messaufbau

4.2 CUBE-LS-Kuppel

Im Vergleich zum kreisförmigen LS-Array in Kap.3.2 ist die LS-Anordnung von einem zweidimensionalen Array auf eine dreidimensionale Kuppel erweitert. Die Anzahl der LS reduziert sich allerdings von 32 LS auf 24 LS. Außerdem sind der Raum sowie die Abstände zwischen den LS untereinander und den Abständen von LS zu den Zonen größer. Aufgrund der Erweiterung auf ein dreidimensionales LS-Array ergibt sich die Möglichkeit, die Einstrahlungsrichtung mit Hilfe des Polarwinkels θ aus der

horizontalen Ebene nach oben zu bewegen. Für PC wurde die Auswahl der Einstrahlungsrichtungen mit einem Azimutwinkel von $\varphi = 90^\circ$ und dem gesamten Bereich der oberen Halbkugel mit dem Polarwinkel $\theta = [0^\circ, \dots, 90^\circ]^T$ definiert. Bei PM wurde die Einstrahlungsrichtung der ebenen Welle mit $\varphi = 90^\circ$ und $\theta = 90^\circ$ festgelegt.

Die gemessenen Raumimpulsantworten wurden im Zeitbereich auf eine Länge von $1s$ geschnitten und werden als die vollständigen Raumimpulsantworten bezeichnet. Sie beinhalten den Direktschall, erste Reflexionen und den diffusen Anteil der Raumimpulsantwort. Für die Berechnung der Steuervektoren \mathbf{q} werden die vollständigen Raumimpulsantworten gekürzt und in drei Versionen $10ms$, $50ms$ und $200ms$ gespeichert. Zur Ermittlung der Position des Schnittes wird jene Raumimpulsantwort aus allen Kombinationen von LS zu Mikrophon gesucht, deren Maximum zeitlich am spätesten auftritt. Von der Position des Maximums werden $10ms$, $50ms$ und $200ms$ addiert und ergeben den jeweiligen Schnittpunkt der gekürzten Signale. Anschließend werden die Signale an den Enden gefenstert (*fade out*) und mit Nullen auf die ursprüngliche Länge von $1s$ aufgefüllt (*zeropadding*).

Wie in Kap.3.1.1 beschrieben, wurden die Steuervektoren mit einem Regularisierungsparameter $a_r = 0.1$ berechnet, wodurch sich eine Konditionszahl von maximal $\kappa = 11$ für ACC, PC¹ und PM ergibt. In Abb.4.3 ist zusätzlich die Konditionszahl der Korrelationsmatrix des superdirektiven Beamformers für PC dargestellt.

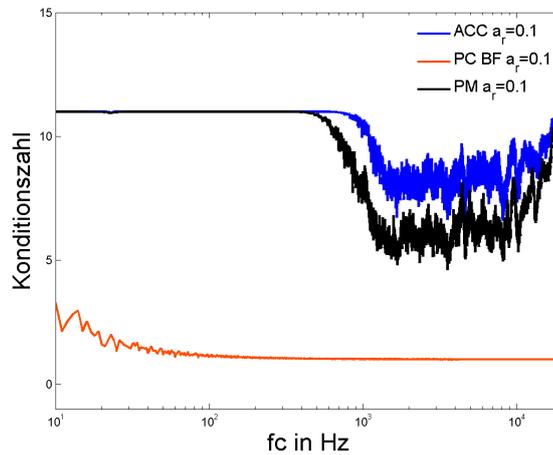


Abbildung 4.3: CUBE LS-Kuppel: Konditionszahl κ für die zu invertierende Matrix für ACC \mathbf{R}_d und PM $(\mathbf{H}_d^H \mathbf{H}_d + \mathbf{H}_b^H \mathbf{H}_b + \alpha I)$, sowie die zu invertierende Korrelationsmatrix Φ des superdirektiven Beamformers für PC $_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$. Der Regularisierungsparameter ist mit $a_r = 0.1$ ausgewählt. Die Länge der Raumimpulsantwort beträgt $200ms$.

¹ κ ist ident für ACC und PC

Für die Auswertung des Kontrastes werden die Steuervektoren \mathbf{q} mit den vollständigen Raumimpulsantworten im Frequenzbereich multipliziert. In Abb.4.4 sind die Kontraste für alle Methoden mit den unterschiedlichen Längen der Raumimpulsantwort zur Berechnung der Steuervektoren \mathbf{q} dargestellt. Hohe Kontrastwerte werden nur unter der Aliasfrequenz von $f_{alias} = 1715Hz$ erreicht. Außerdem ist beim Vergleich der Grafiken zu erkennen, dass eine längere Raumimpulsantwort bessere Kontrastwerte für die Methoden ACC, AEDM, PC und PM liefert. Für diese Methoden werden die Raumreflexionen für die Optimierung der Schallenergie genutzt. TRM und BC liefern mit längeren Raumimpulsantworten ebenfalls geringfügig bessere Ergebnisse. Im Vergleich dazu zeigt DS ein statisches Verhalten, da für diese Methode keine gemessenen Raumimpulsantworten, sondern die berechneten Green'schen Funktionen verwendet werden. Die Kontrastwerte von ACC und AEDM sind sehr ähnlich zueinander und liefern die höchsten Werte. PC und PM liegen aufgrund der Einschränkung bezüglich der Einstrahlungsrichtung bei geringeren Kontrastwerten als ACC und AEDM. In diesem Punkt unterscheidet sich die Auswertung der Methoden zwischen der CUBE-LS-Kuppel und dem kreisförmigen Array.

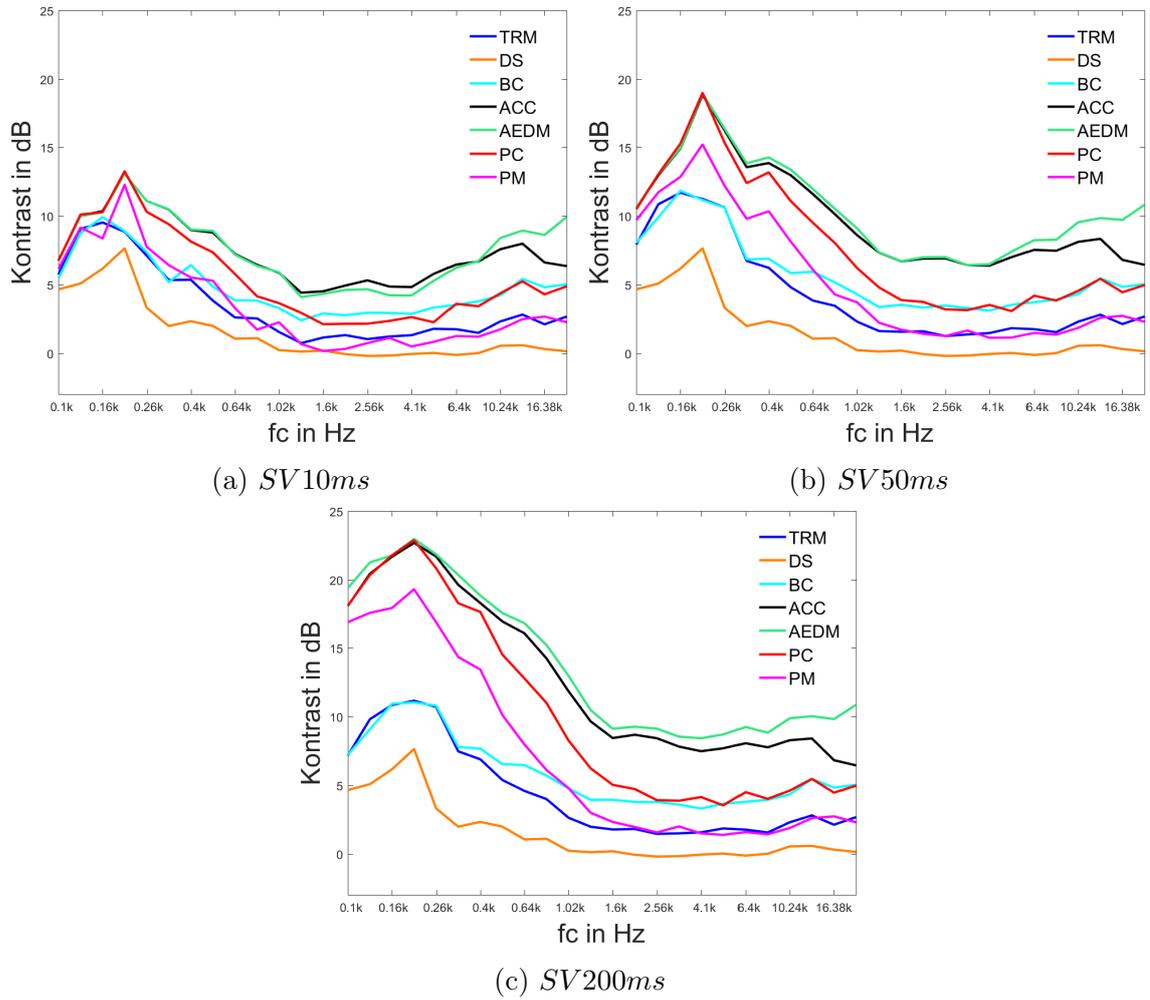
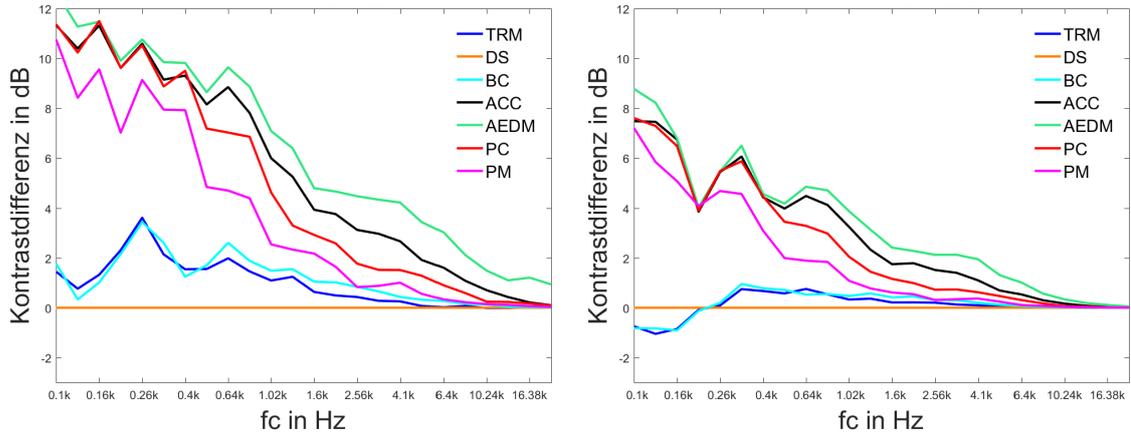


Abbildung 4.4: Kontrast der Methoden TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=0^\circ}$ und $PM_{\varphi=90^\circ}$ der CUBE-LS-Kuppel für unterschiedliche Längen der Raumimpulsantwort zur Berechnung von \mathbf{q} $SV10ms$, $SV50ms$, $SV200ms$.

Die Differenz der Kontrastwerte ΔK für die Steuervektoren von $SV200ms$ zu $SV10ms$ und $SV200ms$ zu $SV50ms$ ist in Abb.4.5 dargestellt. Hier ist ersichtlich, dass der Steuervektor $SV200ms$ die höchsten Kontrastwerte im Vergleich zu Steuervektoren mit kürzeren Raumimpulsantworten für die Berechnung liefert. Speziell für die Methoden ACC, AEDM und PC entstehen größere Differenzen. Weniger große Differenzen entstehen für PC, wohingegen TRM und BC kleine Werte liefert, bzw. in Abb.4.5b der Steuervektor $SV50ms$ sogar bessere Kontrastwerte für tiefe Frequenzen erreicht.



(a) Differenz des Kontrastes $\Delta K = K_{SV200ms} - K_{SV10ms}$. (b) Differenz des Kontrastes $\Delta K = K_{SV200ms} - K_{SV50ms}$.

Abbildung 4.5: Differenz des Kontrastes für verschiedene Längen der berechneten Steuervektoren. Auswertung mit Hilfe der vollständigen Raumimpulsantwort RIR=1s.

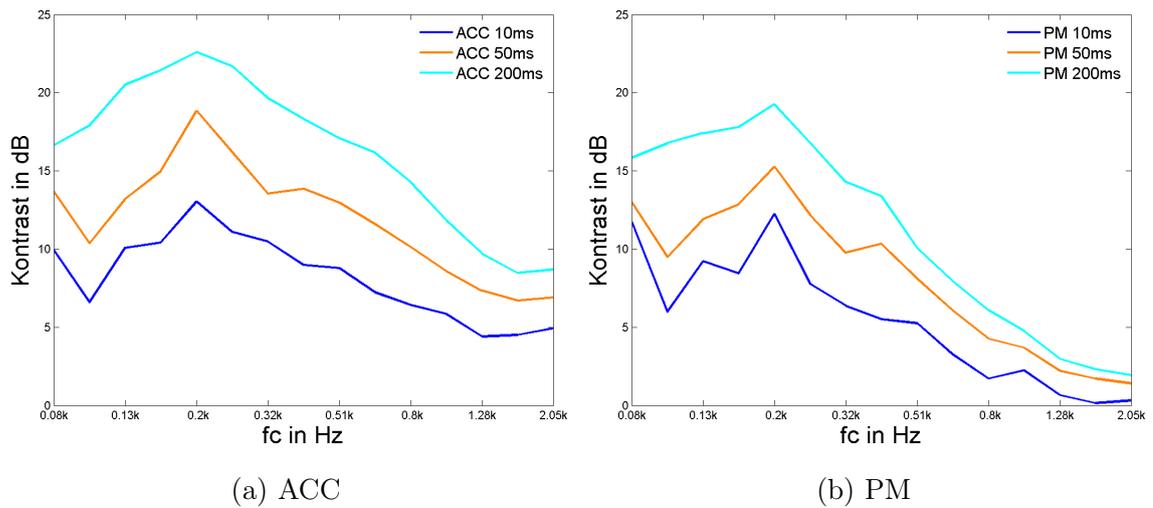


Abbildung 4.6: Kontrast unterhalb der Aliasfrequenz ($f_{alias} = 1715Hz$) der CUBELS-Kuppel für unterschiedliche Längen der Raumimpulsantwort zur Berechnung von \mathbf{q} . Links sind die Längen der Raumimpulsantwort für die Methode ACC variiert und rechts für PM.

In Abb.4.6 sind exemplarisch die Kontrastwerte für die Methoden ACC und PM für die unterschiedlichen Längen der Raumimpulsantworten dargestellt. Hier wird die Steigerung des Kontrastes mit Erhöhung der Länge der Raumimpulsantwort verdeutlicht. In Abb.4.7 ist der Kontrast für PC und PM bei variierender Einstrahlungsrichtung φ für die Methoden PM und PC dargestellt. Die Polarwinkel wurden mit $\theta = [0^\circ, \dots, 90^\circ]^T$ für PC und $\theta = 90^\circ$ für PM beibehalten.

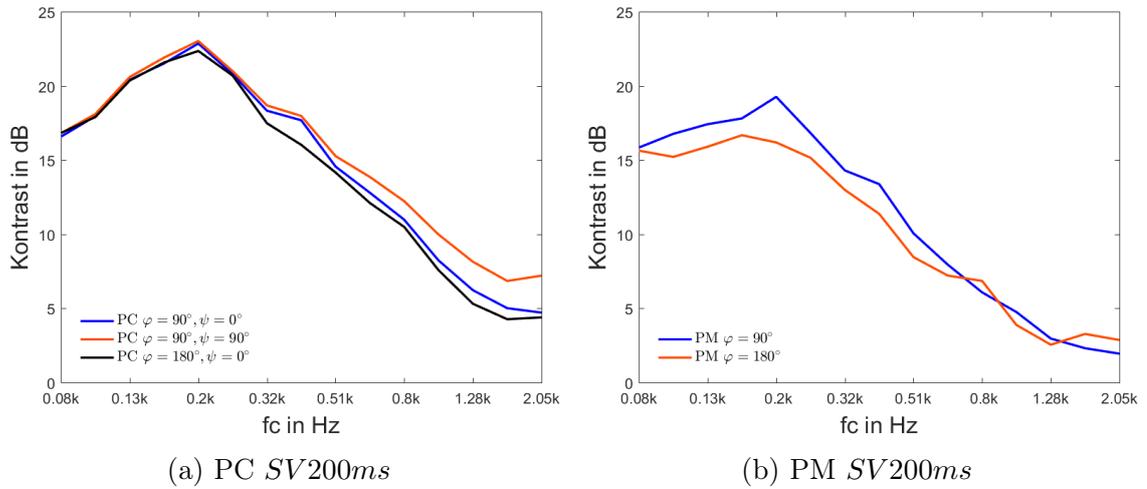


Abbildung 4.7: Kontrast unterhalb der Aliasfrequenz ($f_{alias} = 1715Hz$) der CUBE-LS-Kuppel für unterschiedliche Einstrahlungsrichtungen zur Berechnung von \mathbf{q} .

Um die Vergleichbarkeit der LS-Arrays untereinander zu gewährleisten, wird in Abb.4.8 die gemittelte Energieverteilung in der hellen und dunklen Zone für das Terzband von $f_c = 640Hz$ dargestellt, obwohl der Kontrast bei tieferen Frequenzen für dieses LS-Array höher ist. Im Vergleich zum kreisförmigen LS-Array erkennt man allgemein einen geringeren Kontrast über den gesamten Frequenzbereich. Außerdem ist die Energieverteilung in der hellen Zone weniger homogen als beim kreisförmigen LS-Array. Dies ist auf die größeren Abstände zwischen den LS zurückzuführen.

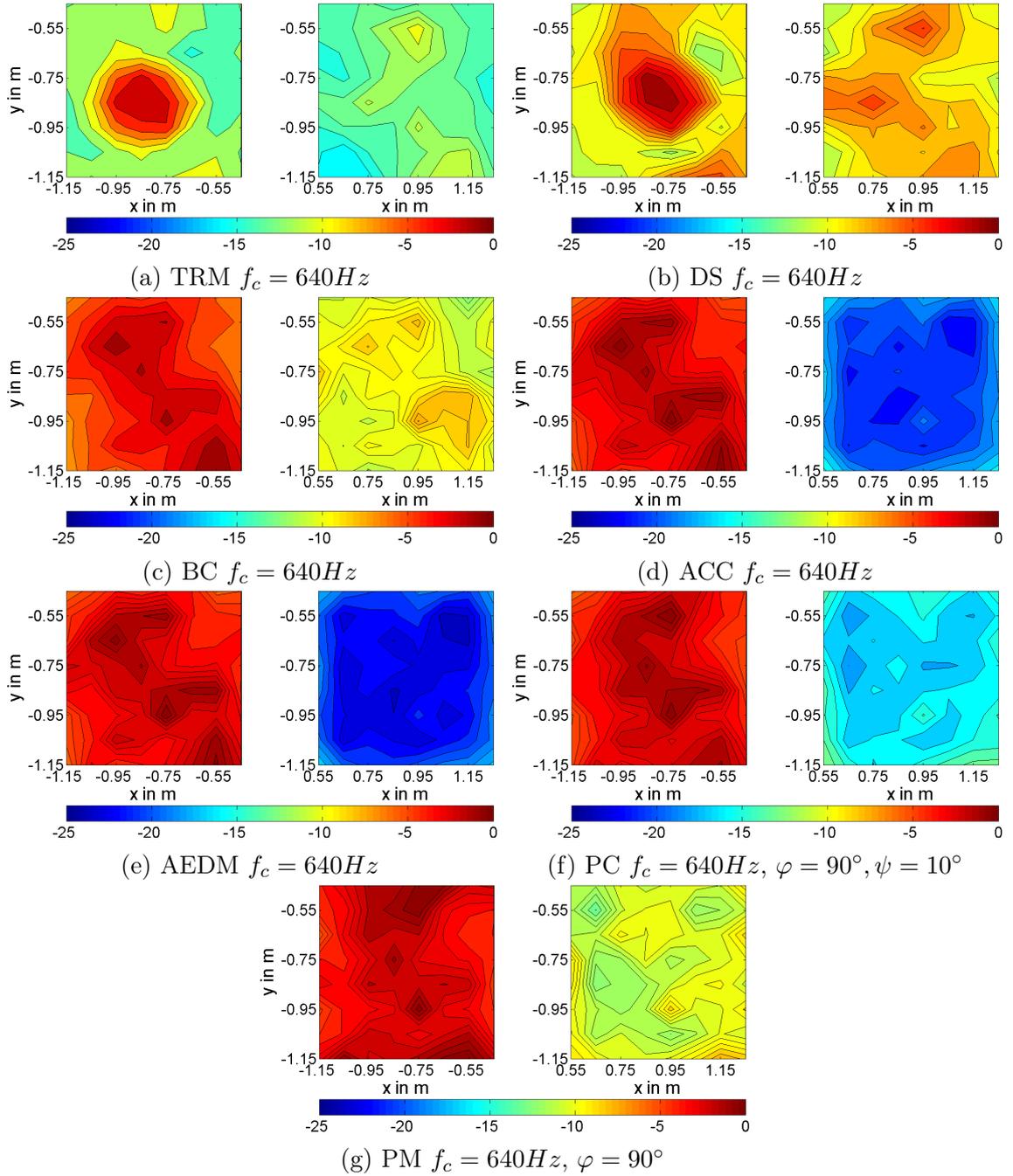


Abbildung 4.8: Energieverteilung $E_b^{(mb,f_c)}$ und $E_d^{(md,f_c)}$ für ein Terzband mit Mittenfrequenz $f_c = 640\text{Hz}$ in der hellen Zone A (links) und der dunklen Zone B (rechts) für die gemessenen Übertragungsfunktionen mit der CUBE-LS-Kuppel für die Anwendung der Methoden TRM, DS, BC, ACC, AEDM, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ und $PM_{\varphi=90^\circ}$. $SV200\text{ms}$, $RIR\ 1\text{s}$

Die Richtungen der \mathbf{r}_E -Vektoren zeigen die starke Frequenzabhängigkeit der erwarteten Richtungen. Es bilden sich Phantomschallquellen zwischen den LS-Positionen.

In Tab.4.2a sind die \mathbf{r}_E -Vektoren und in Tab.4.2b sind die Kugelkoordinaten der LS-Positionen angegeben. Beide Tabellen beziehen sich auf den Koordinatenursprung im Mittelpunkt der hellen Zone A.

Die Frequenzabhängigkeit spiegelt sich auch in der Planarität für alle Methoden wieder. Die Berechnung der Planarität für ein LS-Array, welches die Zone bzw. das planare Mikrofonarray umgibt, ist von der Anzahl der untersuchten Richtungen abhängig. Wird die exakte Einstrahlungsrichtung von der Richtungsabtastung des Beamformers zur Berechnung der Planarität nicht getroffen, wird die Energie auf die benachbarten Richtungen aufgeteilt. Das bedeutet, obwohl die Planarität für eine Einstrahlung aus nur einer Richtung 100% ergeben müsste, wird bei Aufteilung auf andere Richtungen ein geringerer Prozentsatz erreicht. Die in Abb.4.9 dargestellte Planarität für die Methoden wurde für 250 Richtungen, die eine Halbkugel² beschreiben, und mit Hilfe eines gleitenden Mittelwertes \hat{P} im Frequenzbereich über 64 Frequenzbins gemittelt

$$\hat{P} = \frac{1}{64} \sum_{n=64}^{64} P(f_n). \quad (4.1)$$

Wie für das kreisförmige Array in Kap.3.2.1 erreichen die Methoden PC und PM die höchste und gleichmäßigste Planarität. Die Methoden BC, ACC und AEDM ergeben ebenfalls eine hohe Planarität. DS liefert die geringsten Werte, da für diese Methode aus allen LS-Richtungen dieselbe Schallenergie abgestrahlt wird.

²Die Richtungen werden durch Punkte auf der nördlichen Halbkugel definiert.

	f/Hz	$\ \mathbf{r}_E\ _2$	$\varphi/^\circ$	$\theta/^\circ$
TRM	250	0.71	292	8
	500	0.40	301	26
	1000	0.44	131	18
DS	250	0.42	51	6
	500	0.42	51	6
	1000	0.42	51	6
BC	250	0.80	275	8
	500	0.68	40	50
	1000	0.71	170	79
ACC	250	0.78	151	10
	500	0.60	49	37
	1000	0.88	142	77
AEDM	250	0.78	148	10
	500	0.59	55	35
	1000	0.86	141	76
PC	250	0.78	115	24
	500	0.76	89	65
	1000	0.90	100	79
PM	250	0.80	97	45
	500	0.79	88	72
	1000	0.90	93	87

(a) \mathbf{r}_E -Vektoren in Kugelkoordinaten für die CUBE-LS-Kuppel

LS	r/m	$\varphi/^\circ$	$\theta/^\circ$
1	5.49	82	90
2	6.09	62	89
3	7.30	42	89
4	6.29	22	89
5	6.37	356	89
6	5.88	323	90
7	3.92	282	89
8	4.67	229	89
9	4.74	183	89
10	4.90	148	89
11	6.42	125	89
12	5.61	101	89
13	6.18	63	66
14	6.42	26	66
15	6.50	346	64
16	4.23	309	59
17	3.64	255	53
18	5.06	197	56
19	5.05	141	60
20	5.68	101	64
21	4.41	44	45
22	3.58	348	37
23	2.92	221	14
24	3.82	103	36

(b) Kugelkoordinaten für die CUBE-LS-Kuppel vom Mittelpunkt der hellen Zone als Koordinatenursprung.

Tabelle 4.2: \mathbf{r}_E -Vektoren für die CUBE-LS-Kuppel und die LS-Positionen.

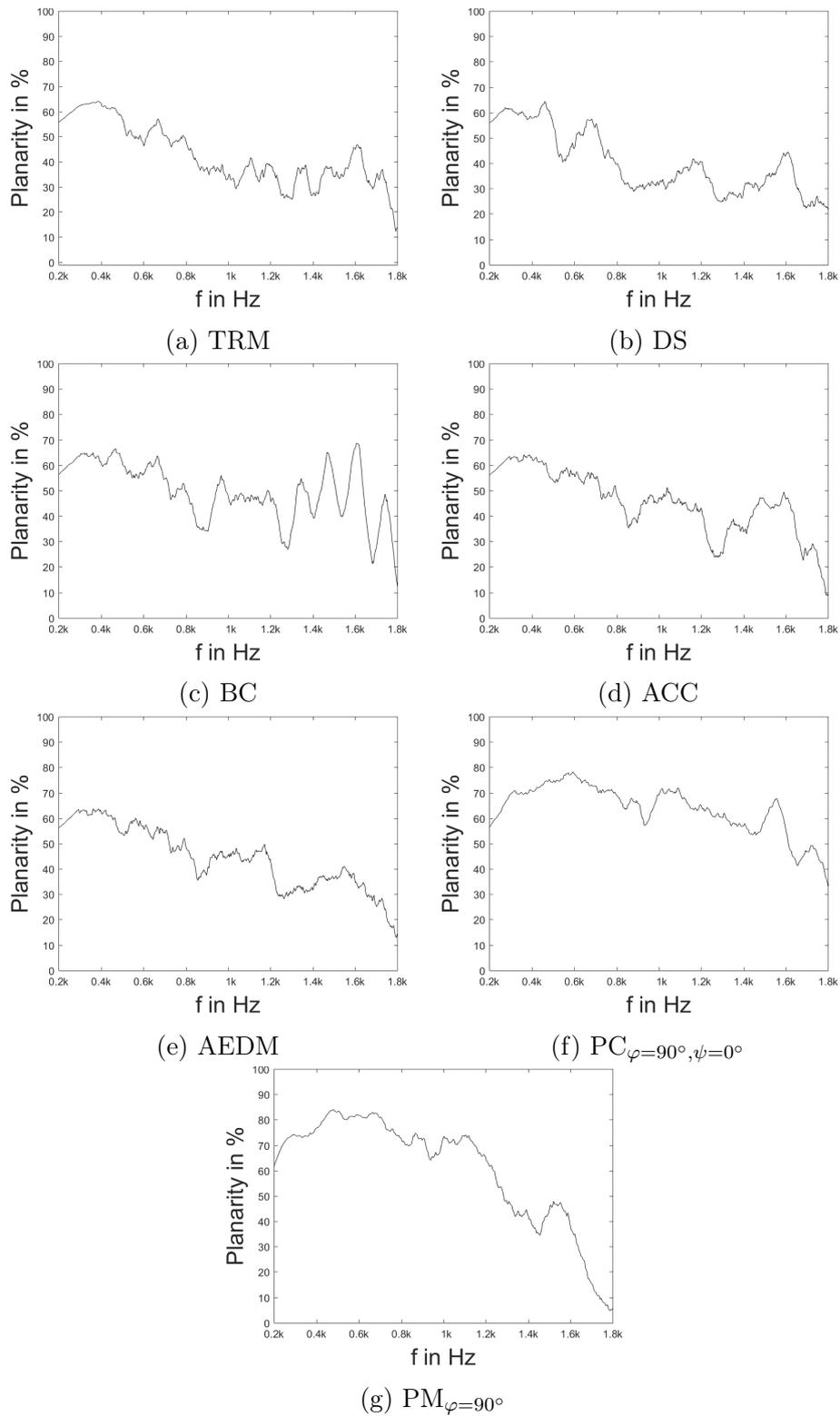
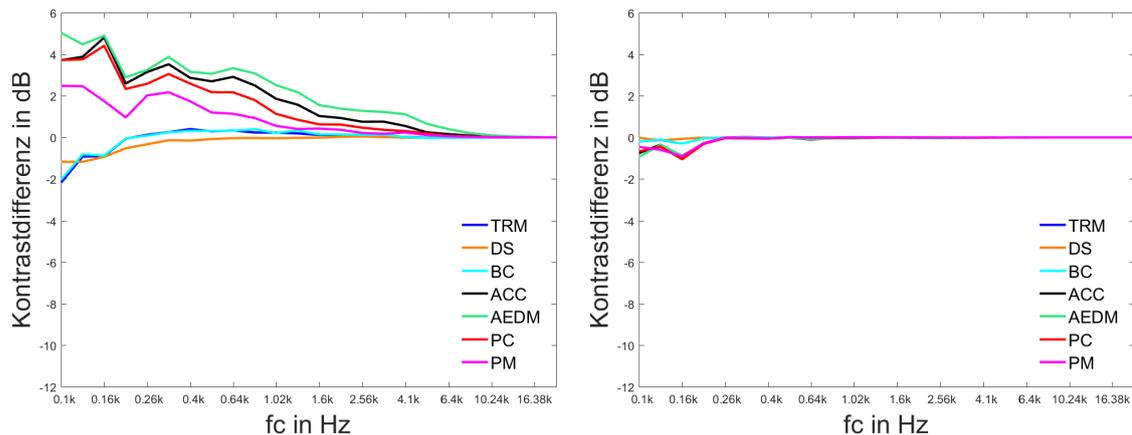


Abbildung 4.9: Planarität CUBE-LS-Kuppel SV200ms, RIR1s

4.2.1 Auswirkungen auf die Funktionalität der Methoden bei Variation der Länge der Raumimpulsantworten für die Auswertung

In den zuvor gezeigten Auswertungen der Methoden wurden die Steuervektoren mit der vollständigen Raumimpulsantwort der Länge von $RIR = 1s$ für die Berechnungen der physikalischen Messgrößen verwendet. In diesem Unterkapitel wird die Länge der Raumimpulsantwort für die Auswertung variiert. Dazu werden die Raumimpulsantworten wie für die Berechnung der Steuervektoren auf eine Länge von $100ms$ und $200ms$ geschnitten und mit Nullen auf die ursprüngliche Länge der Raumimpulsantwort aufgefüllt (zeropadding).

In Abb.4.11 sind die Kontrastwerte für die Steuervektoren SV_{200ms} der Methoden und für drei Längen der Raumimpulsantwort für die Auswertung $RIR = [100ms, 200ms, 1s]$ dargestellt. In Abb.4.10 sind die Differenzen des Kontrastes ΔK zwischen der Auswertung mit der vollständigen RIR ($1s$) und einer gekürzten RIR-Länge ($100ms$ oder $200ms$) angegeben. Für eine RIR-Länge von $200ms$ sind höhere Kontrastwerte als für die vollständige Raumimpulsantwort erreichbar (Abb.4.10b), da in diesem Fall die RIR-Länge für die Berechnung der Steuervektoren mit der RIR-Länge für die Auswertung übereinstimmt. Mit geringerer RIR-Länge sinkt der Kontrast für ACC, AEDM, PC und PM und die Kontrastdifferenz wird deutlich größer (Abb.4.10a). Der Kontrast der Methoden TRM, DS und BC ändert sich nur geringfügig.



(a) Differenz des Kontrastes $\Delta K = K_{RIR1s} - K_{RIR100ms}$. (b) Differenz des Kontrastes $\Delta K = K_{RIR1s} - K_{RIR200ms}$.

Abbildung 4.10: Differenz des Kontrastes für einen Steuervektoren mit Länge SV_{200ms} und verschiedenen Längen der RIR für die Auswertung.

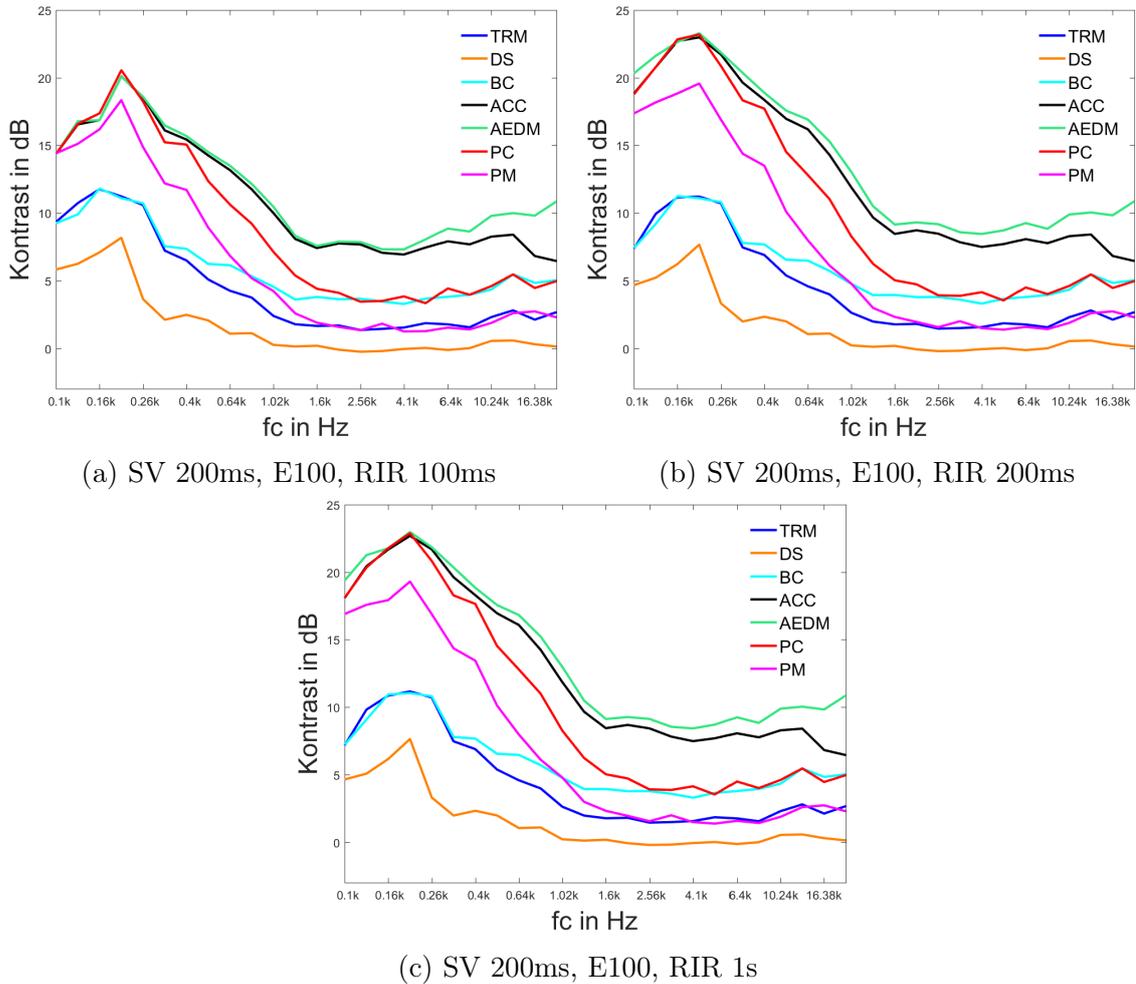


Abbildung 4.11: Kontrast der Methoden TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ und $PM_{\varphi=90^\circ}$ der CUBE-LS-Kuppel für unterschiedliche Längen der Raumimpulsantwort zur Berechnung von \mathbf{q} .

4.2.2 Auswirkungen auf die Funktionalität der Methoden bei Variation der Länge der Steuervektoren

In Kap.4.2.1 wurde auf die Variation der RIR-Länge für die Auswertung der Methoden eingegangen. Anknüpfend an diese Überlegungen werden die zuvor berechneten Steuervektoren im Zeitbereich gekürzt und die Auswirkungen auf den erreichbaren Kontrast ermittelt. Die Schnittgrenze wird für jede Methode separat festgelegt. Die Steuervektoren sollen an jener Stelle geschnitten werden, an der 90% ihrer gesamten Energie bereits vorhanden ist. Die Motivation für diese Vorgehensweise liegt in der Verringerung der entstehenden Vor- bzw. Nachechos bei Wiedergabe von Audiosignalen mit Hilfe der gekürzten Steuervektoren.

Es wird die Einhüllende e_{env} des Steuervektors \mathbf{q} im Zeitbereich mit Hilfe der

Hilberttransformation berechnet

$$e_{env}(t) = |\mathcal{H}\{\mathbf{q}(t)\}|. \quad (4.2)$$

Daraus wird die Schwerpunktszeit t_{sp} jedes Steuervektors [Wei09]

$$t_{sp} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} t \cdot e_{env}(t)^2 dt}{E^{(ges)}} \quad (4.3)$$

für den kontinuierlichen Fall berechnet. Für einen Steuervektor mit diskretem Zeitindex $l' = [1, 2 \dots L']$, vereinfacht sich Glg.4.3 zu

$$t_{sp} = \frac{\sum_{l'=1}^{L'} l' \cdot e_{env}(l')^2}{E^{(ges)}} \quad (4.4)$$

Die gesamte Energie berechnet sich über die Summe

$$E^{(ges)} = \sum_{l'=1}^{L'} e_{env}(l')^2. \quad (4.5)$$

Von der Schwerpunktszeit ausgehend werden nun äquivalent zu Glg.4.5 solange Amplitudenwerte mit steigendem Index ($\pm l'$) zu der Einhüllenden rechts und links von der Schwerpunktszeit addiert, bis der gewünschte Prozentsatz (z.B.: 90%) der absoluten Energie erreicht ist und der Schnittpunkt des Steuervektors für jeden LS separat gefunden wurde. Die Signale werden nicht hart geschnitten, sondern erhalten, wie zuvor beschrieben, ein kurzes Fade-In und Fade-Out. Anschließend werden die gekürzten Steuervektoren auf die ursprüngliche Länge von 1s mit Nullen aufgefüllt (*zeropadding*). In Abb.4.12 sind die nicht geschnittenen Steuervektoren dargestellt. Das rote Rechteck³ zeigt den mittleren Schnittbereich aller LS-Steuersignale eines Steuervektors. Die Länge des Schnittbereiches ist für die Methoden unterschiedlich und hängt von der zeitlichen Kompaktheit der Steuervektoren ab. Je mehr Energie nahe an der Schwerpunktszeit vorhanden ist, desto kleiner ist der Schnittbereich. Bei PM erkennt man die stärkste Verkürzung des Steuervektors.

³Die Amplitudenwerte innerhalb des Rechtecks wird durch das schneiden nicht verändert. Das Fenster wurde für die übersichtlichere Darstellung auf 50% des Maximalwertes der Amplitude des SV gesetzt.

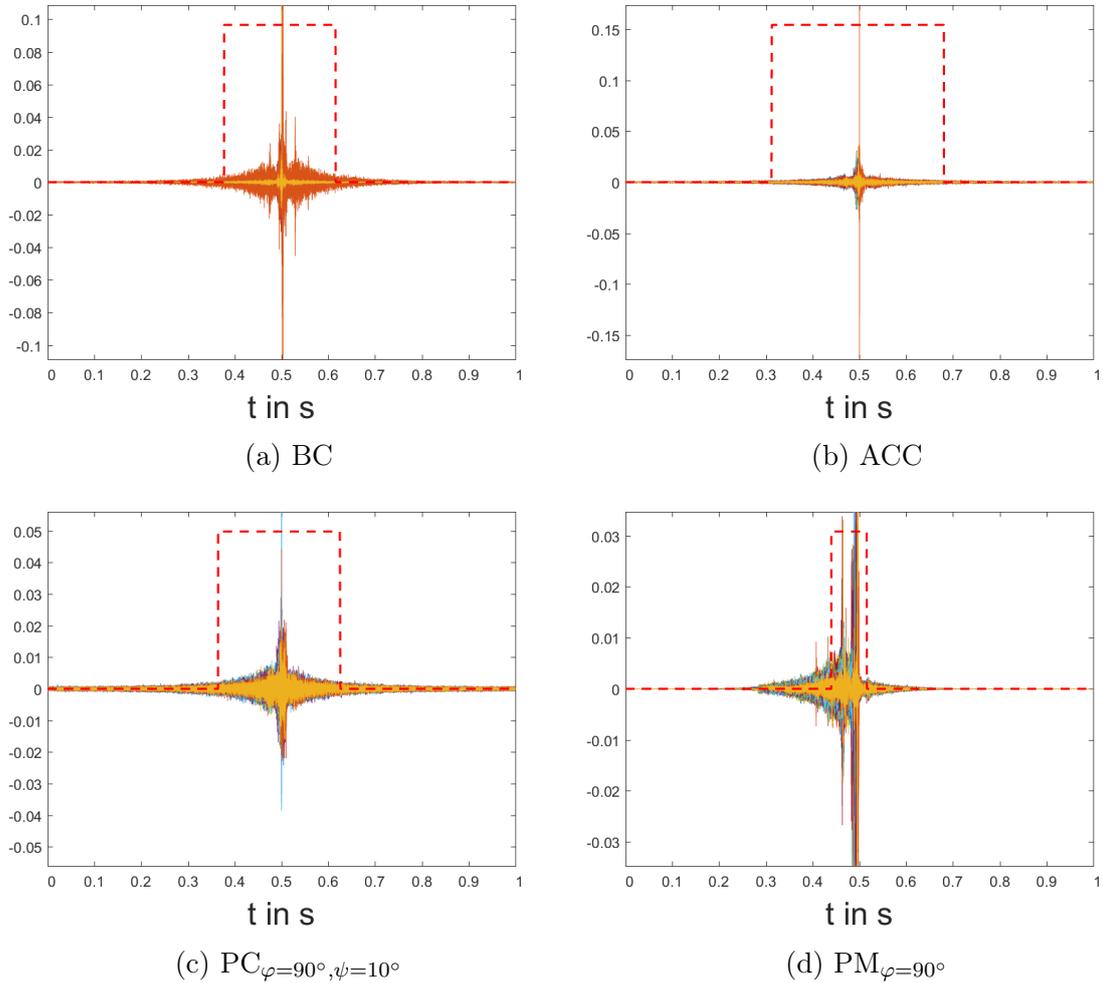


Abbildung 4.12: SV200ms für verschiedene Methoden (E100). Das rote Rechteck gibt den Schnittbereich für 90% der Energie (E90) an.

Abb.4.14 zeigt die Kontrastwerte für die Steuervektoren \mathbf{q} 10ms, 50ms, 200ms geschnitten bei 90% ihrer Gesamtenergie (E90) und für eine Auswertungslänge der Raumimpulsantwort von 1s. Die Kontrastwerte sind etwas geringer als jenen mit E100, also den gesamten Steuervektoren in Abb.4.4. In Abb.4.13 sind die Differenzen des Kontrasts $\Delta K = K_{E100} - K_{E90}$ dargestellt. Die Differenzen sind für BC und AEDM sehr gering ($< 1dB$). PC und ACC bewegen sich zwischen 2dB und 4dB Kontrastdifferenz und PM weist eine Kontrastdifferenz bis zu 6dB auf.

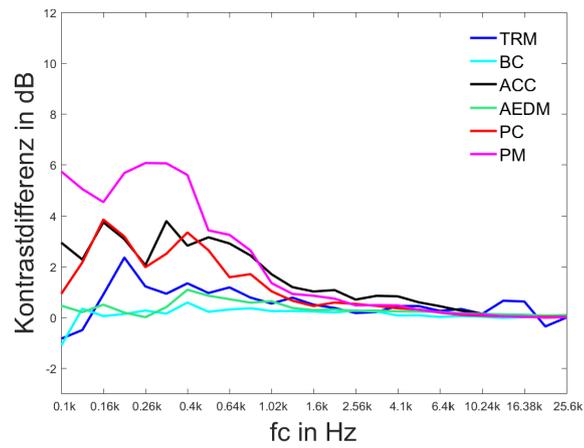


Abbildung 4.13: Differenz des Kontrastes $\Delta K = K_{E100} - K_{E90}$ für einen Steuervektoren mit Länge $200ms$, $RIR = 1s$ für die Auswertung.

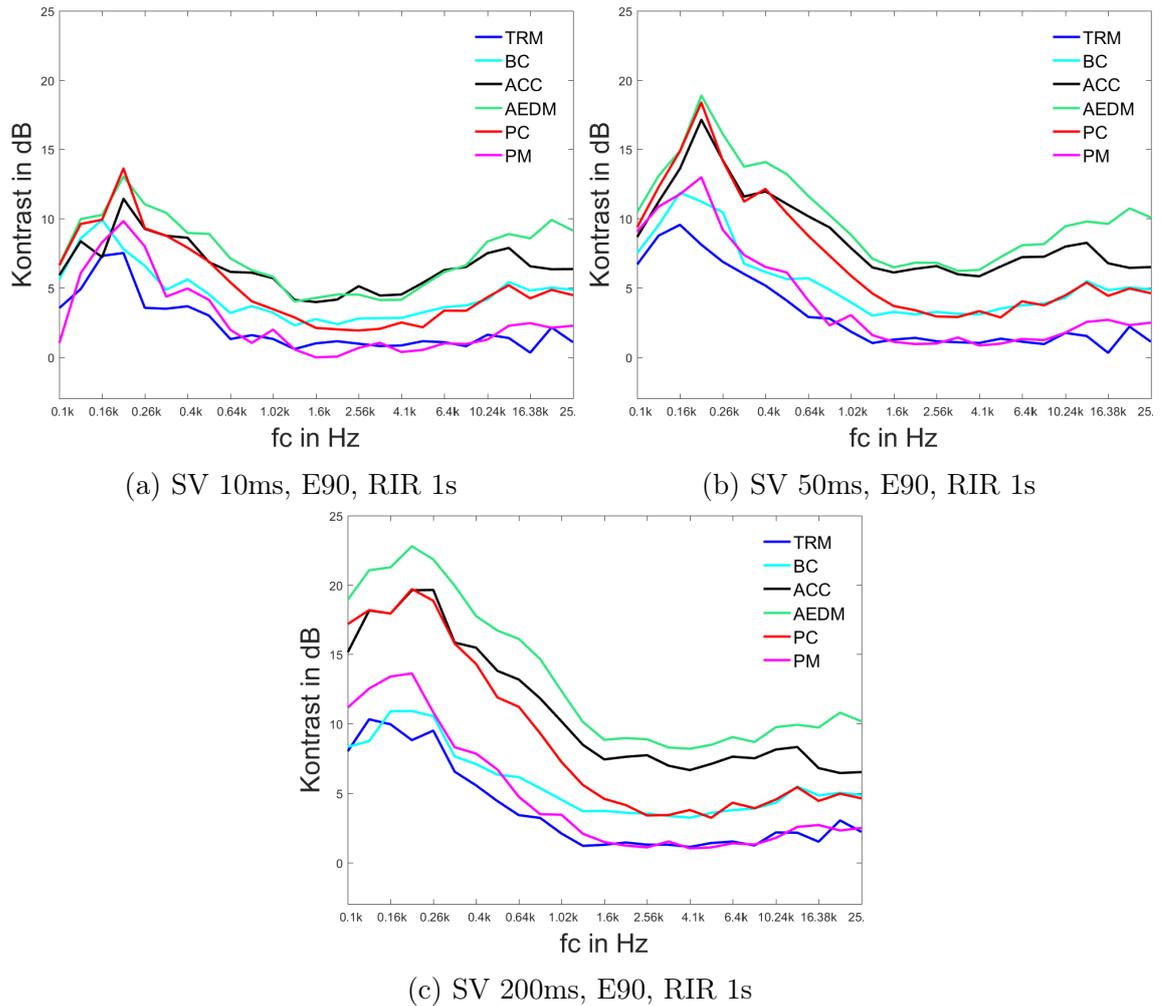


Abbildung 4.14: Kontrast der Methoden TRM, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ und $PM_{\varphi=90^\circ}$ der CUBE-LS-Kuppel für unterschiedliche Längen der Raumimpulsantwort zur Berechnung von \mathbf{q} .

4.2.3 Messung CUBE-LS-Kuppel

Wie schon in Kap.3.2.4 für das kreisförmige LS-Array wird auch für die CUBE-LS-Kuppel eine Messung in den beiden Zonen mit Hilfe von 6 Mikrofonen durchgeführt. Der Aufbau des Mikrofonarrays ist derselbe wie in Abb.3.24 dargestellt. Die Messungen wurden sowohl auf 2 Höhen $\mathbf{z}_{mic} = [1.28, 1.37]^T$ in m und an zwei unterschiedlichen Positionen durchgeführt. Für die erste Position befindet sich das Zentrum des Mikrofonarrays im Zentrum der Zone und für die zweite Position befindet sich Mikrofon $m = 5$ im Zentrum der Zone⁴. Das bedeutet, es wurden pro Zone vier separate Messungen durchgeführt und die Raumimpulsantworten, wie in Kap.3.2.4

⁴In Abb.3.24 sind die Mikrofone mit 1 bis 6 von rechts nach links durchnummeriert.

beschrieben, aus den Messdaten entfallen und der Kontrast berechnet. Zusätzlich wurde der Kontrast für die summierten Energien der Messung an der ersten und zweiten Position, also für 12 Punkte pro Zone, berechnet.

Ziel ist es, die gemessenen 6 bzw. 12 Raumimpulsantworten pro Zone (Messung 2) für die Auswertung der Methoden zu verwenden und mit der Auswertung der 64 Raumimpulsantworten pro Zone (Messung 1) zu vergleichen. Damit kann die Robustheit der Methoden gegenüber Veränderungen im Raum überprüft werden. Die Veränderungen betreffen unter anderem die Temperatur im Raum, die Bestuhlung (Messung 1 nicht bestuhlt, Messung 2 teilweise bestuhlt), sowie die Verwendung von Reflektoren (Messung 1 ja, Messung 2 nein). In Abb.4.16 ist der Kontrast für alle Methoden ausgewertet für die Messungen auf der Höhe von $1.28m$ für 12 Punkte pro Zone dargestellt. Es werden nicht so hohe Kontrastwerte für die Auswertung mit den 6 gemessenen Raumimpulsantworten der zweiten Messung erreicht wie für die Auswertung mit 64 gemessenen Raumimpulsantworten der ersten Messung (Abb.4.4). Die Differenzen zwischen Messung 1 und Messung 2 sind in Abb.4.15 dargestellt. Sie bewegen sich unterhalb der Aliasingfrequenz für ACC, AEDM, PC und PM in einem Bereich von etwa $6 - 12dB$. Auch für höhere Frequenzen sind die Unterschiede vor allem für ACC und AEDM sehr hoch. Das bedeutet, ACC und AEDM sind am wenigsten robust gegenüber Veränderungen im Raum, wohingegen PC und PM etwas robuster erscheinen.

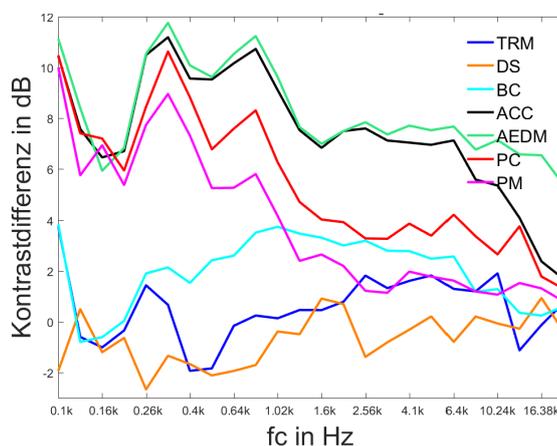


Abbildung 4.15: Differenz des Kontrastes $\Delta K = K_{Mess1} - K_{Mess2}$ für einen Steuervektoren mit Länge $200ms$, $RIR = 1s$ für die Auswertung.

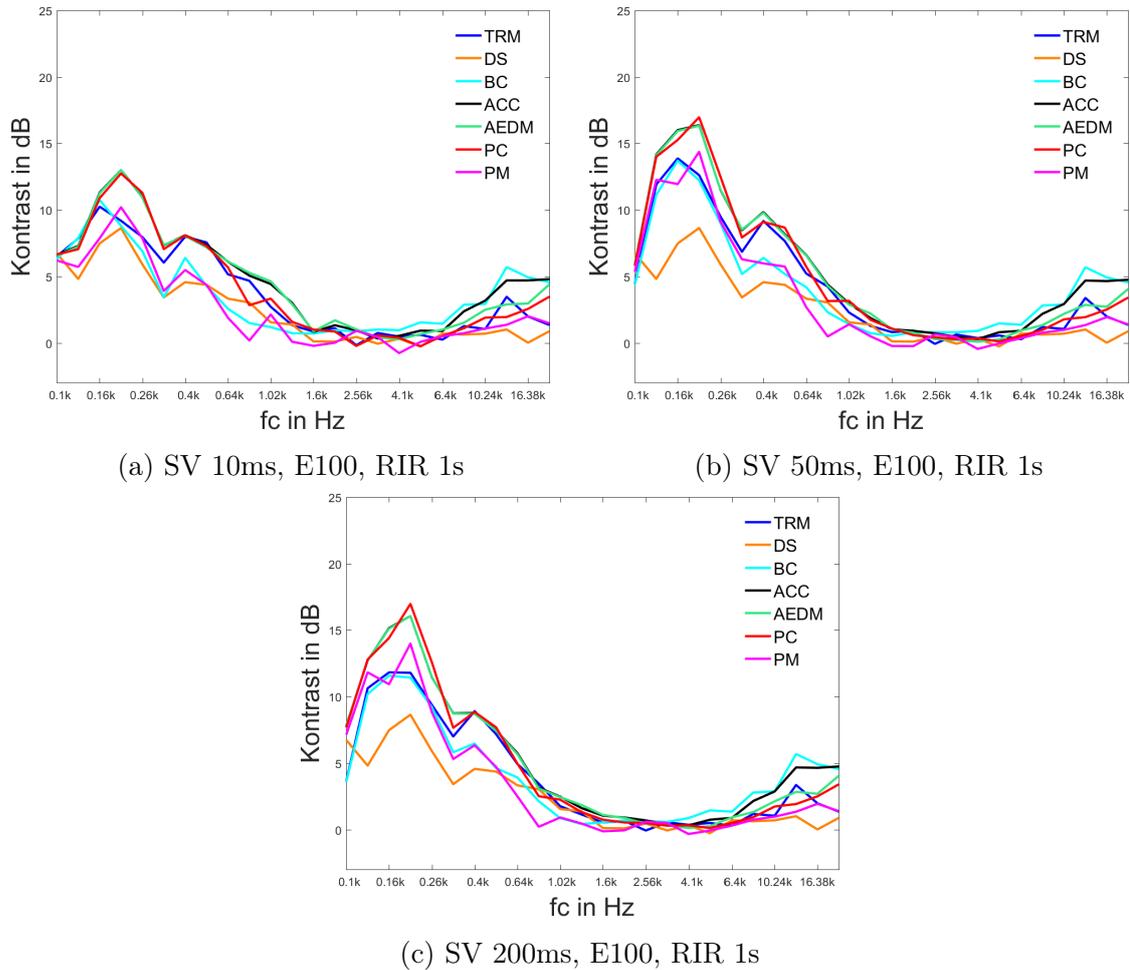


Abbildung 4.16: Kontrast der Methoden TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ und $PM_{\varphi=90^\circ}$ der CUBE-LS-Kuppel, berechnet aus den Messergebnissen für unterschiedliche Längen der Raumimpulsantwort zur Berechnung von \mathbf{q} . (12 Punkte pro Zone, $z_{mic} = 1.28m$)

4.3 Ikosaeder-Lautsprecher

Im folgenden Unterkapitel wird der Ikosaeder-LS [ZS07] zur Schallfokussierung und Erzeugung von individualisierten Hörzonen verwendet. Der Ikosaeder ist eine Polyeder mit 20 dreiecksförmigen Flächen und gehört zu den platonischen Körpern. Aufbauend auf diese Form befinden sich am Ikosaeder-LS im Zentrum jeder Fläche eine koaxiale LS-Membran mit Durchmessern von 6.5" und 1". Der Radius des Ikosaeder-LS beträgt in etwa 0.33m. Für den Ikosaeder-LS als kompaktes Lautsprecherarray sind die erreichten Kontrastwerte im Allgemeinen geringer als für das verteilte Array (CUBE-LS). Die Steuervektoren sind mit dem Regularisierungsparameter von $a_r = 0.1$ berechnet und die Konditionszahlen der zu invertierenden Matrizen sind in Abb.4.17

dargestellt.

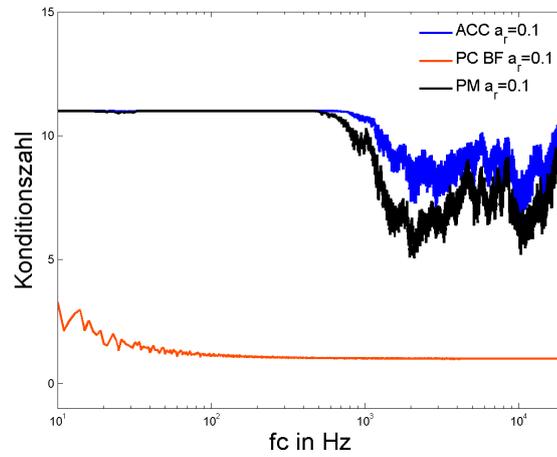


Abbildung 4.17: Ikosaeder-LS: Konditionszahl κ für die zu invertierende Matrix für ACC \mathbf{R}_d und $\text{PM}_{\varphi=90^\circ}$ ($\mathbf{H}_d^H \mathbf{H}_d + \mathbf{H}_b^H \mathbf{H}_b + \alpha I$), sowie die zu invertierende Korrelationsmatrix Φ des superdirektiven Beamformers für $\text{PC}_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$. Der Regularisierungsparameter ist mit $a_r = 0.1$ ausgewählt. Die Länge der Raumimpulsantwort beträgt $\text{SV}200\text{ms}$.

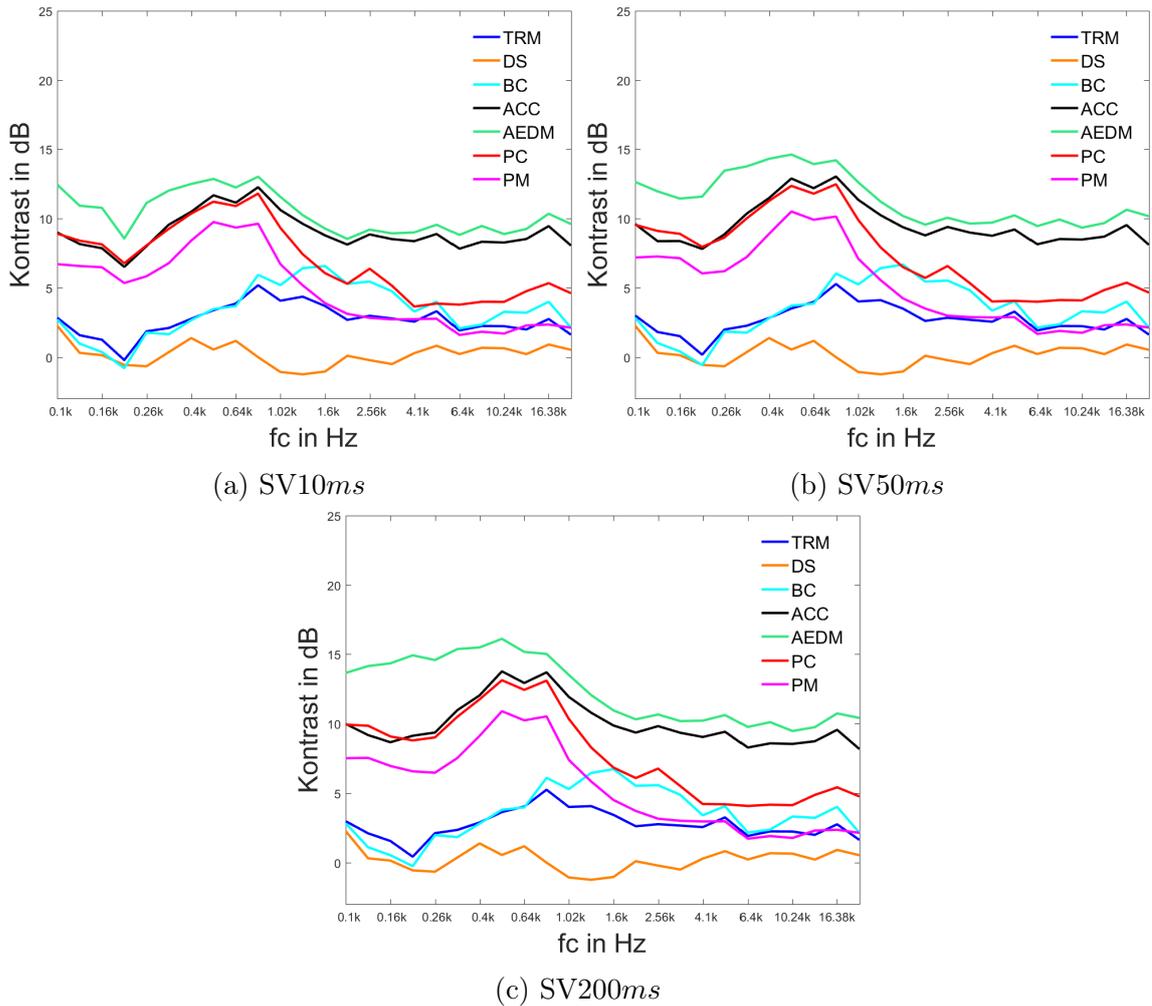
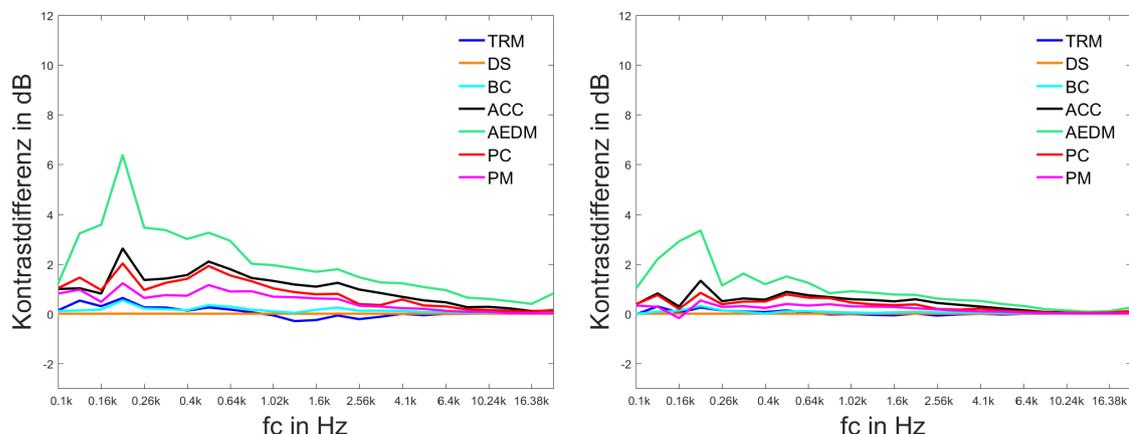


Abbildung 4.18: Kontrast der Methoden TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ und $PM_{\varphi=90^\circ}$ des Ikosaeder-LS für unterschiedliche Längen der Raumimpulsantwort zur Berechnung von \mathbf{q} .

In Abb.4.18 ist ebenfalls eine Erhöhung des Kontrastes für Steuervektoren festzustellen, die mit längeren Raumimpulsantworten berechnet wurden. Allerdings wirkt sich die Variation nicht so stark in absoluten dB-Werten, oder in der Differenz ΔK , aus. AEDM ergibt die höchsten Kontrastwerte und ACC und PC verhalten sich sehr ähnlich. BC erreicht vor allem bei niedrigen Frequenzen nur sehr geringe Kontrastwerte, da es zu Übersprechen zwischen den Zonen aufgrund der großen Wellenlängen der abgestrahlten Frequenz und dem örtlich eng aneinander liegenden LS des Arrays kommt. TRM zeigt ein ähnliches Verhalten, wobei die Fokussierung des Schalls auch für diese LS-Aufstellung möglich ist. Im Vergleich dazu ist es mit DS aufgrund des Setups nicht möglich, den Schall in der hellen Zone ohne ein Übersprechen in die dunkle Zone zu fokussieren, wodurch der Kontrast um $0dB$ fluktuiert. Die Differenz des Kon-

trastes ΔK aufgrund der unterschiedlichen Längen der Raumimpulsantworten für die Berechnung der Steuervektoren ist in Abb.4.19 dargestellt.



(a) Differenz des Kontrastes $\Delta K = K_{SV200ms} - K_{SV10ms}$.

(b) Differenz des Kontrastes $\Delta K = K_{SV200ms} - K_{SV50ms}$.

Abbildung 4.19: Differenz des Kontrastes für verschiedene Längen der berechneten Steuervektoren. Auswertung mit Hilfe der vollständigen Raumimpulsantwort RIR=1s.

In Abb.4.20 ist der Kontrast für ACC und PM für unterschiedliche Längen der Raumimpulsantworten und in Abb.4.21 ist die Variation über die Einstrahlungsrichtung für PC und PM dargestellt. Man erkennt, dass aus der 180°-Richtung geringere Kontrastwerte aufgrund des Setups erreicht werden. Aus der Richtung $\varphi = 90^\circ$ werden höhere Kontrastwerte erreicht, wobei bei weniger strengen Randbedingungen $\psi = 90^\circ$ eine weitere Verbesserung des Kontrastes im Vergleich zu $\psi = 10^\circ$ zu verzeichnen ist. Die Einstrahlungsrichtung wurde erneut mit Polarwinkeln von $\theta = [0^\circ, \dots, 90^\circ]^T$ für PC und $\theta = 90^\circ$ für PM definiert.

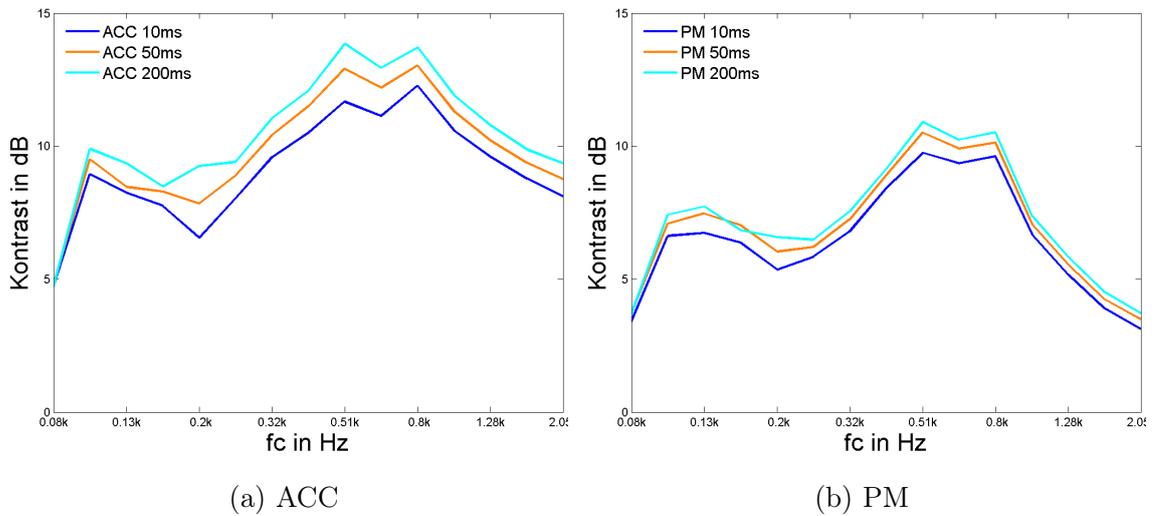


Abbildung 4.20: Kontrast über den gesamten untersuchten Frequenzbereich des Iksaeder-LS für unterschiedliche Längen der Raumimpulsantwort zur Berechnung von \mathbf{q} . Links sind die Längen der Raumimpulsantwort für die Methode ACC variiert und rechts für PM.

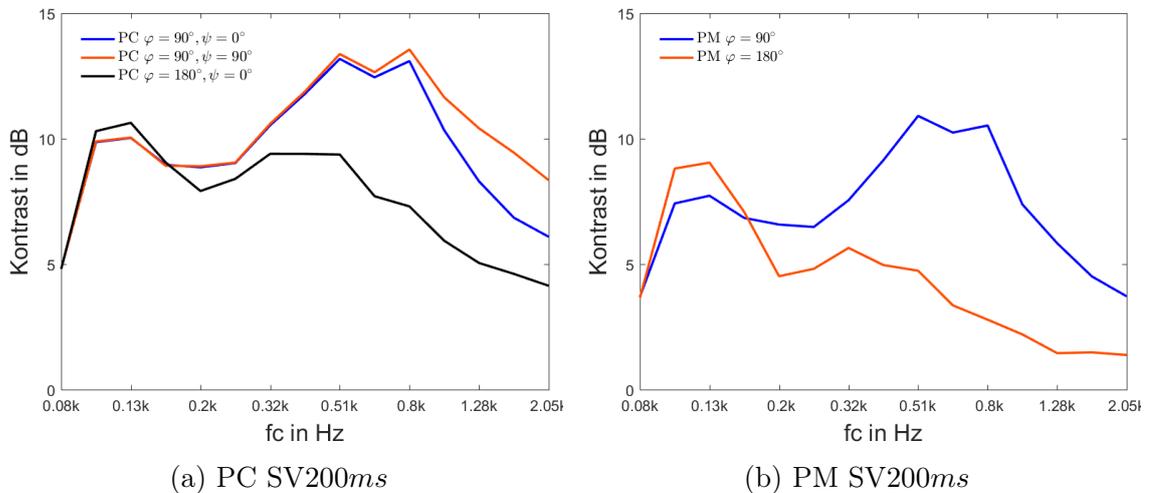


Abbildung 4.21: Kontrast über den gesamten untersuchten Frequenzbereich des Iksaeder-LS für unterschiedliche Einstrahlungsrichtungen zur Berechnung von \mathbf{q} .

Die Energieverteilung in der hellen und dunklen Zone ist in Abb.4.22 für das Terzband mit Mittenfrequenz $f_c = 640\text{Hz}$ dargestellt. Die Fokussierung bei TRM funktioniert beim Iksaeder-LS sehr gut und bildet scharfe Konturen in Abhängigkeit der abgestrahlten Frequenz in der hellen Zone. Der Fokuspunkt ist bei DS nicht ausgeprägt (vergl. CUBE-LS-Kuppel in Abb.4.8).

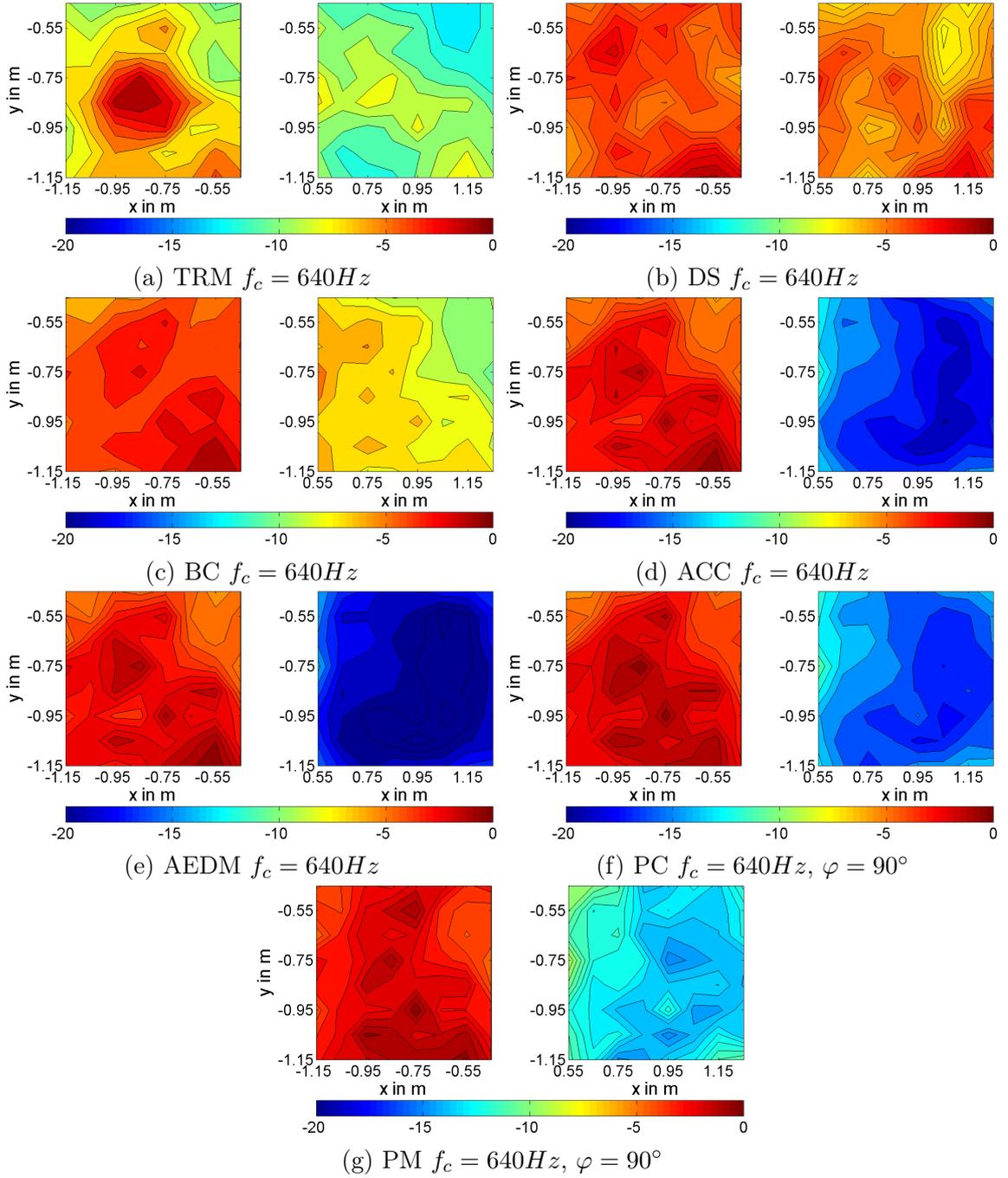


Abbildung 4.22: Energieverteilung $E_b^{(m_b, f_c)}$ und $E_d^{(m_d, f_c)}$ für ein Terzband mit Mittenfrequenz $f_c = 640 \text{ Hz}$ in der hellen Zone A (links) und der dunklen Zone B (rechts) für die gemessenen Übertragungsfunktionen mit dem Ikosaeder-LS für die Anwendung der Methoden TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ und $PM_{\varphi=90^\circ}$.

Die berechneten \mathbf{r}_E -Vektoren vom Zentrum der hellen Zone aus gesehen zeigen für alle Methoden auf die Position des Ikosaeder-LS. Die Länge des Vektors erreicht dementsprechend den maximalen Wert von 1. Die Auswertung der Planarität zeigt

	f_b/Hz	$\ \mathbf{r}_E\ _2$	$\varphi/^\circ$	$\theta/^\circ$
TRM	250	1.00	72	91
	500	1.00	71	92
	1000	1.00	70	91
DS	250	1.00	71	91
	500	1.00	71	91
	1000	1.00	71	91
BC	250	1.00	72	90
	500	1.00	71	93
	1000	1.00	69	91
ACC	250	1.00	72	90
	500	1.00	71	92
	1000	1.00	70	91
AEDM	250	1.00	71	90
	500	1.00	71	92
	1000	1.00	70	91
PC	250	1.00	72	90
	500	1.00	72	92
	1000	1.00	70	92
PM	250	1.00	72	90
	500	1.00	72	92
	1000	1.00	71	91

Tabelle 4.3: \mathbf{r}_E -Vektoren für den Ikosaeder-LS.

ebenfalls einen kontinuierlicheren Verlauf und allgemein höhere Werte als bei der CUBE-LS-Kuppel. Die folgenden Abbildungen zeigen den gleitenden Mittelwert der Planarität, berechnet für eine Fensterlänge von 64 Samples.

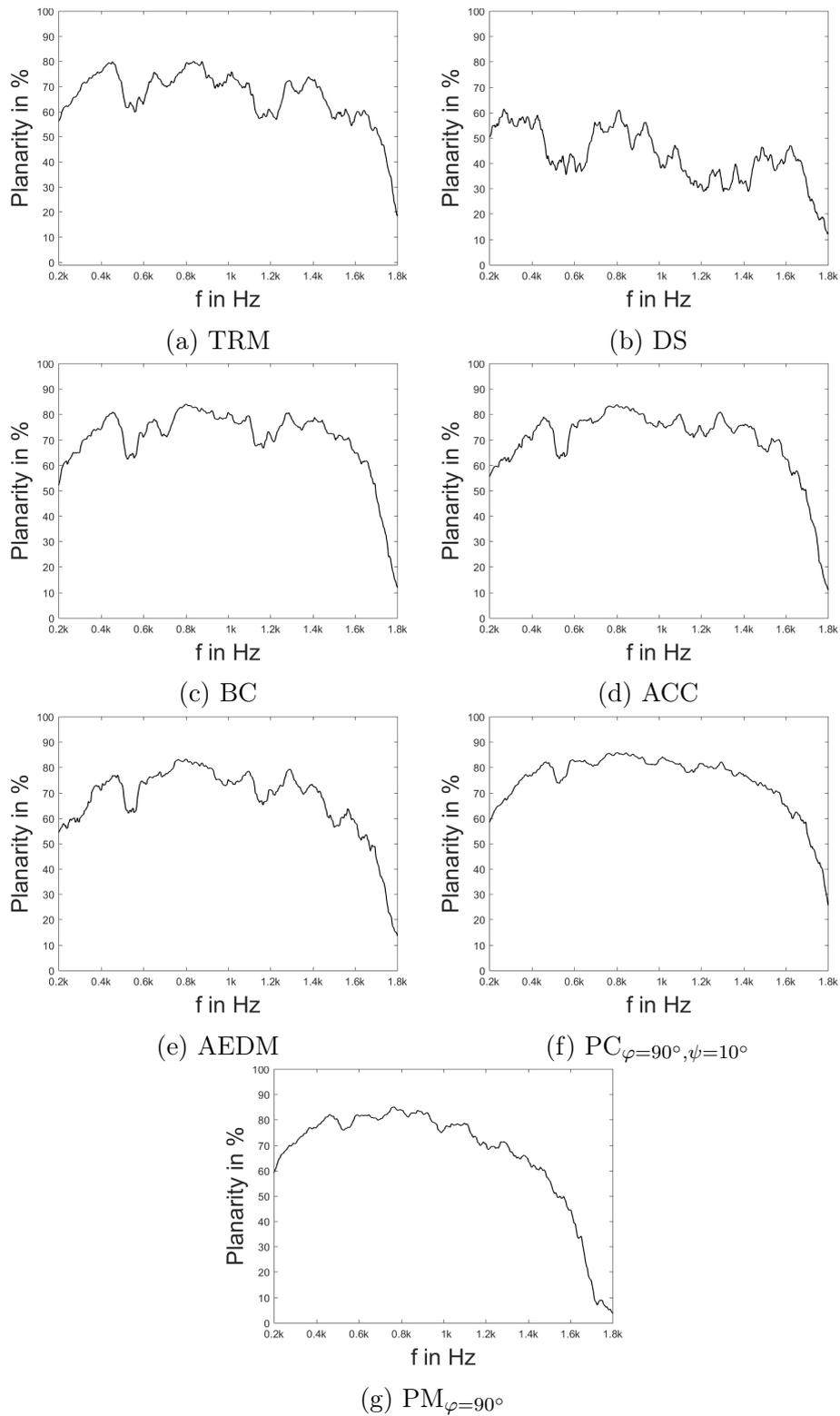
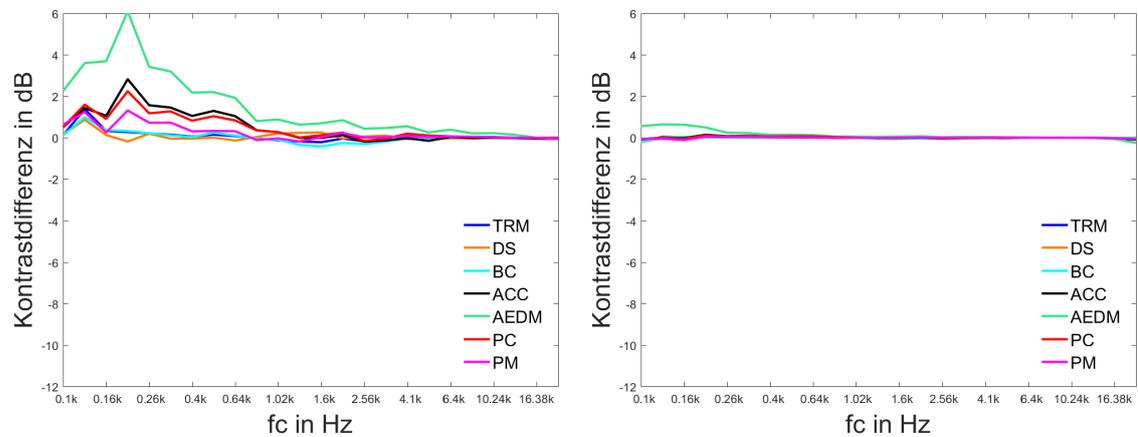


Abbildung 4.23: Planarität Ikosaeder-LS SV200ms, RIR1s

4.3.1 Auswirkungen auf die Funktionalität der Methoden bei Variation der Länge der Raumimpulsantworten für die Auswertung

In den zuvor gezeigten Auswertungen der Methoden für den Ikosaeder-LS wurden die Steuervektoren mit der vollständigen Raumimpulsantwort der Länge von $RIR = 1s$ für die Berechnungen der physikalischen Messgrößen verwendet. In diesem Unterkapitel wird die Länge der Raumimpulsantwort für die Auswertung variiert (vgl. Kap.4.2.1).

In Abb.4.25 sind die Kontrastwerte für die Steuervektoren SV_{200ms} der Methoden und für drei Längen der Raumimpulsantwort für die Auswertung $RIR = [100ms, 200ms, 1s]$ dargestellt. In Abb.4.24 sind die Differenzen des Kontrastes ΔK für die Auswertung mit der vollständigen RIR (1s) und den gekürzten RIR-Längen (100ms, 200ms) angegeben. Die Differenzen in Abb.4.24b zwischen der vollständigen Raumimpulsantwort und der RIR-Länge von 200ms sind vernachlässigbar. Wie schon in Kap.4.2.1 gezeigt, sinkt mit geringerer RIR-Länge der Kontrast und die Kontrastdifferenz wird größer (Abb.4.24a).



(a) Differenz des Kontrastes $\Delta K = K_{RIR1s} - K_{RIR100ms}$. (b) Differenz des Kontrastes $\Delta K = K_{RIR1s} - K_{RIR200ms}$.

Abbildung 4.24: Differenz des Kontrastes für einen Steuervektoren mit Länge 200ms und verschiedenen Längen der RIR für die Auswertung.

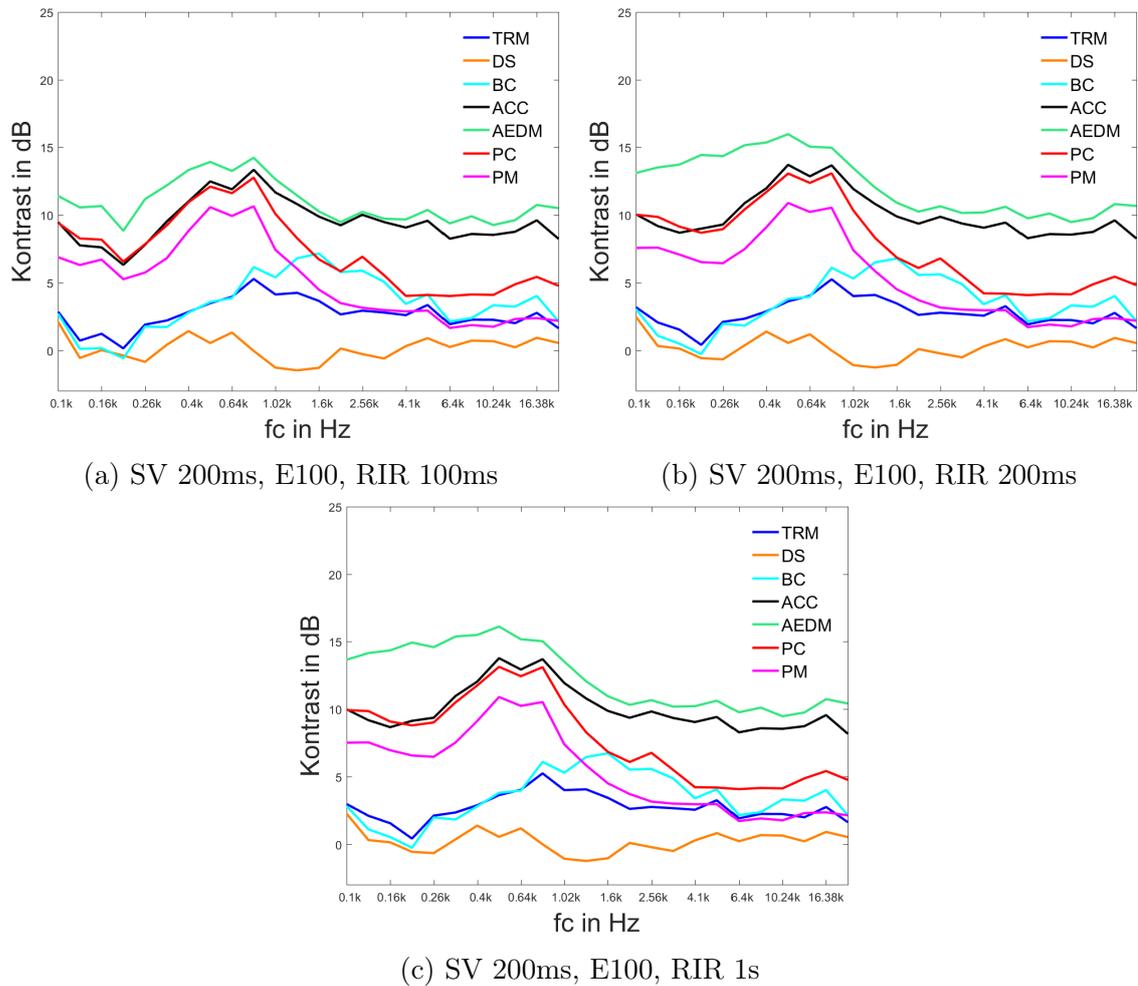


Abbildung 4.25: Kontrast der Methoden TRM, DS, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ und $PM_{\varphi=90^\circ}$ der Ikosaeder-LS für unterschiedliche Längen der Raumimpulsantwort zur Berechnung von \mathbf{q} .

4.3.2 Auswirkungen auf die Funktionalität der Methoden bei Variation der Länge der Steuervektoren

Im folgenden Unterkapitel werden die zuvor berechneten Steuervektoren im Zeitbereich gekürzt und die Auswirkungen auf den erreichbaren Kontrast ermittelt (vgl. Kap.4.2.2). Abb.4.26 zeigt die ungekürzten Steuersignale aller LS des Steuervektors. Das rote Rechteck gibt den mittleren Schnittbereich für 90% der Energie an.

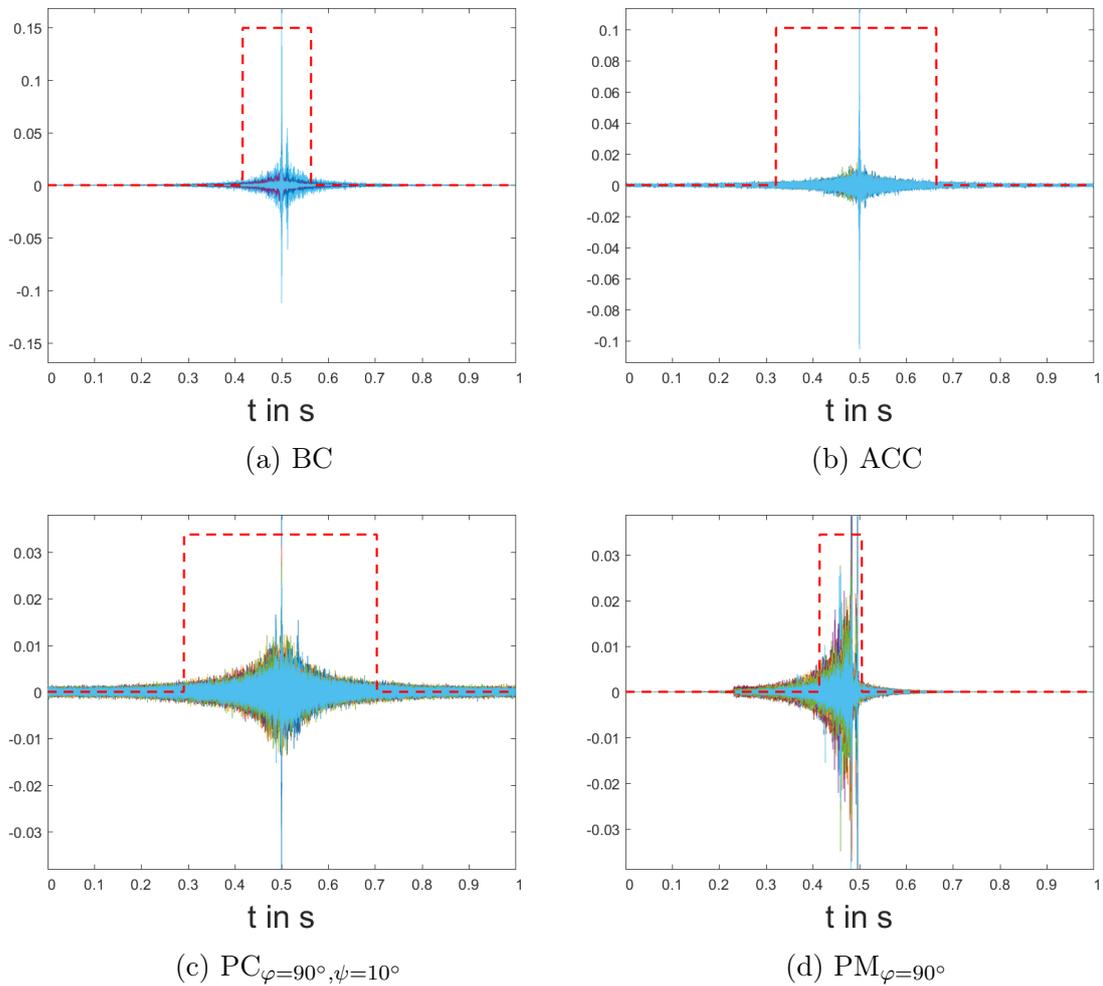
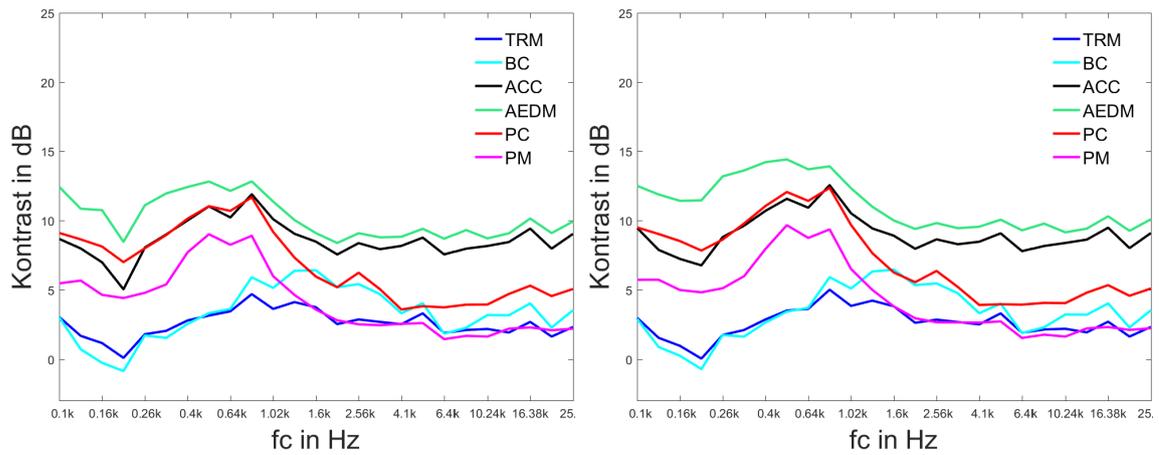


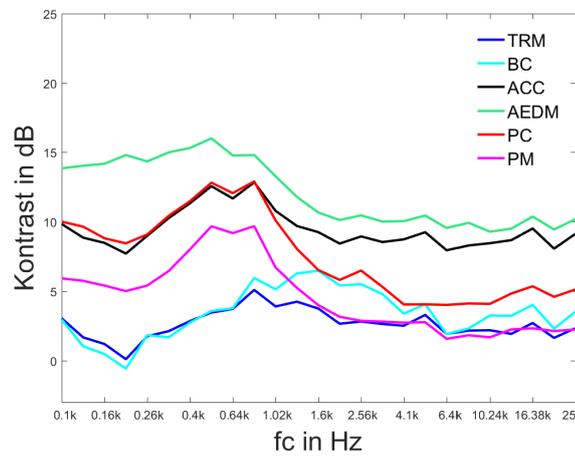
Abbildung 4.26: SV200ms für verschiedene Methoden (E100). Das rote Rechteck gibt den Schnittbereich für 90% der Energie (E90) an.

Abb.4.27 zeigt die Kontrastwerte für die Steuervektoren \mathbf{q} $SV10ms, SV50ms, SV200ms$, geschnitten bei 90% ihrer Gesamtenergie (E90) und für eine Auswertungslänge der Raumimpulsantwort von 1s. Die Kontrastwerte sind sehr ähnlich zu jenen mit E100, also den gesamten Steuervektoren in Abb.4.18. ACC und PC weisen etwas höheren Kontrastdifferenzen von bis zu $2dB$ auf.



(a) SV 10ms, E90, RIR 1s

(b) SV 50ms, E90, RIR 1s



(c) SV 200ms, E90, RIR 1s

Abbildung 4.27: Kontrast der Methoden TRM, BC, ACC, $PC_{\varphi=90^\circ, \psi=10^\circ}$ und $PM_{\varphi=90^\circ}$ der Ikosaeder-LS für unterschiedliche Längen der Raumimpulsantwort zur Berechnung von \mathbf{q} .

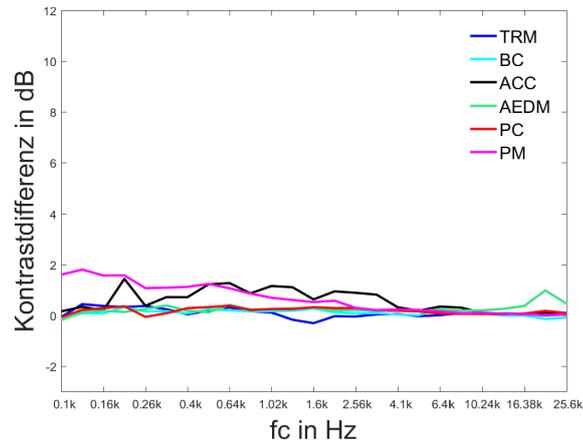


Abbildung 4.28: Differenz des Kontrastes $\Delta K = K_{E100} - K_{E90}$ für einen Steuervektoren mit Länge $200ms$, $RIR = 1s$ für die Auswertung.

In Abb.4.28 sind die Differenzen des Kontrastes $\Delta K = K_{E100} - K_{E90}$ dargestellt. Die Differenzen sind sehr gering und bewegen sich um etwa $1dB$.

Kapitel 5

Zusammenfassung

Die vorliegende Masterarbeit befasst sich mit der Schallfokussierung und Erzeugung von individualisierten Hörzonen unter Verwendung von unterschiedlichen LS-Arrays. Es wurden zwei Verfahren zur Schallfokussierung (DS und TRM) sowie fünf Verfahren zur Erzeugung von Hörzonen in Kap.2 vorgestellt. Die Methoden BC, ACC, AEDM und PC optimieren die Schallenergie in einer bzw. in beiden Zonen und PM minimiert den Fehler zwischen reproduziertem und gewünschtem Schallfeld, wodurch es als einzige Methode in dieser Arbeit zur Gruppe der Schallsyntheseverfahren gehört.

In Kap.3 werden die vorgestellten Methoden für ein kreisförmiges LS-Array in einem reflexionsarmen Raum umgesetzt. Der kreisförmige Aufbau des Arrays und die Positionierung der Zonen ist in Anlehnung an die bekannten Aufbauten in der Literatur gewählt [Oli14], [SLF⁺10], [JOMA11]. Die verwendeten Raumimpulsantworten für die Berechnung der Steuervektoren \mathbf{q} werden durch Simulation generiert, wobei nur der berechnete Direktschall verwendet wird. Bei den Methoden ACC, PC und PM muss eine Matrixinvertierung durchgeführt werden. Für die praktische Anwendung und um eine robuste Lösung zu erhalten, müssen die zu invertierenden Matrizen regularisiert werden. Die Regularisierung wurde durch Hinzufügen von 10% des größten Singulärwerts zu allen Singulärwerten in der Diagonalmatrix S erreicht. Diese Methode führt laut [ZCWY17] zu einer leicht überrobusten Lösung. Aufgrund der unterschiedlichen Implementierungen der Methoden kommt es zu Klangfärbungen, die mit Hilfe von Entzerrungsfiltren (Kap.3.1.3) verringert werden. Die Performance der Methoden wurde mit Hilfe von physikalischen Messgrößen verglichen (vgl. Kap.3.2), wobei der Kontrast von ACC und AEDM für die eingestellten Parameter sehr ähnlich ist und der Kontrast für PC und PM abhängig von der Einstrahlungsrichtung ist. Die höchsten Werte der Planarität werden aufgrund der einstellbaren Einstrahlungsrichtung von PC und PM erzielt. Die praktische Umsetzung in einem reflexionsarmen Raum, unter Verwendung der aus den Simulationsdaten berechneten

Steuervektoren, wurde im Messraum des IEM durchgeführt. Mit Hilfe eines Hörversuches (vgl. Kap.3.3) wurden die räumlichen Aspekte sowie die Qualität und die Sprachverständlichkeit der Methoden evaluiert. Dabei wird die Lokalisation von DS und TRM *Im-Kopf* wahrgenommen, wodurch diese Methoden am wenigsten robust gegenüber einer Bewegung des Kopfes des Zuhörers/der ZuhörerIn sind. Die Qualität von PC und PM wird im Vergleich zu den restlichen Methoden am besten bewertet und PM erreicht zusätzlich die besten Ergebnisse bezüglich der Sprachverständlichkeit gegenüber einem Störsignal.

In Kap.4 wird die reflexionsarme Umgebung durch einen reflektiven Raum ersetzt und die Raumimpulsantworten entstammenden Messungen im realen Raum. Als Lautsprecherarrays werden sowohl die CUBE-LS-Kuppel, als auch der Ikosaeder-LS als einziges kompaktes LS-Array untersucht. Die Robustheit der Methoden gegenüber Veränderungen des Systems und des Raumes (Temperatur, Aufstellung von Reflektoren und Stühlen, leichte Änderungen der LS-Positionen (Verdrehen,...), usw.) spielt in der praktischen Anwendung eine große Rolle. Aufgrund der reflektiven Umgebung kommt es zu Vor- und Nachechos, wodurch die zeitliche Kompaktheit der Wiedergabe nicht mehr gegeben ist und die Wiedergabequalität verringert wird. Um die auftretenden Vor- und Nachechos zu verringern, können zur Berechnung der Steuervektoren gekürzte Raumimpulsantworten verwendet werden. Die erreichbaren Kontrastwerte für unterschiedliche Längen der Raumimpulsantwort zur Berechnung der Steuervektoren \mathbf{q} sind in Kap. 4.2 und Kap. 4.3 gegenübergestellt. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Kürzung der berechneten Steuervektoren. Die Ergebnisse der Auswertung für den Kontrast wurden ebenfalls präsentiert.

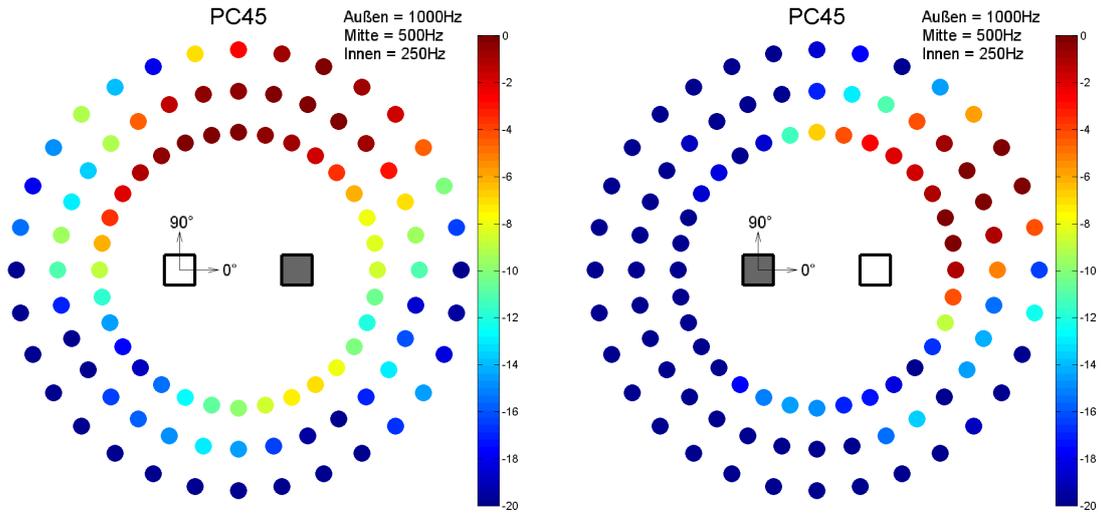
Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Methoden PC und PM aufgrund der einstellbaren Einstrahlungsrichtung eine gute Qualität der Wiedergabe, sowie gute Kontrastwerte und sehr gute Planaritätswerte in einer reflexionsarmen Umgebung erreichen. Die Performance der Methoden ist von der Regularisierung der zu invertierenden Matrizen abhängig. Für die Anwendung aller Methoden in einer reflektiven Umgebung müssen die Vor- und Nachechos minimiert werden. Die Umsetzung dieser Minimierung sowie die genauere Auseinandersetzung der Wahl der Regularisierungsmethoden bleibt zukünftiger Forschungsarbeit vorbehalten.

Kapitel 6

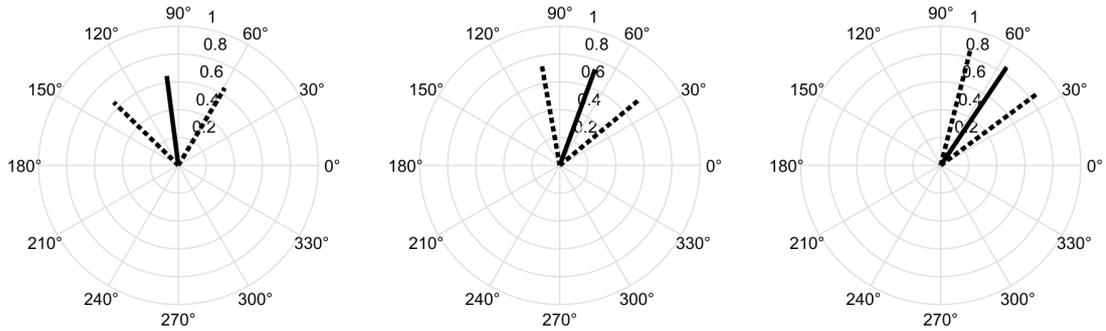
Appendix

Lautsprechergewichte und \mathbf{r}_E -Vektoren für das kreisförmige LS-Array

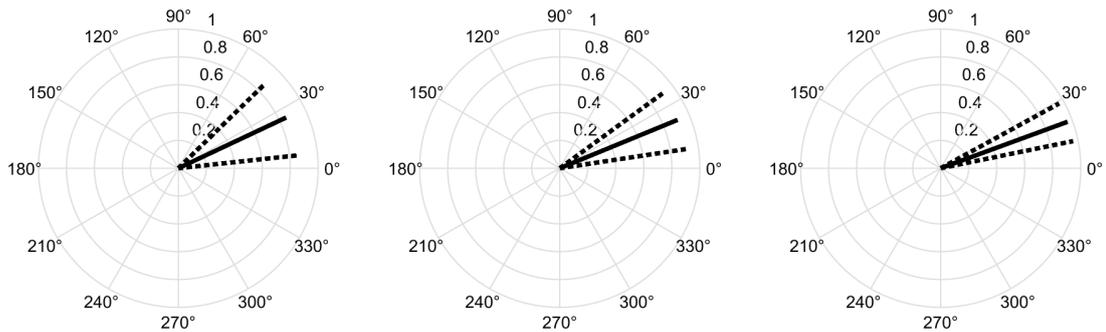
Die folgenden Abbildungen zeigen die Lautsprechergewichte sowie \mathbf{r}_E -Vektoren für die Methoden $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$, $PM_{\varphi=45^\circ}$ sowie für die im Hörversuch verwendeten Referenzen ONE und ALL. In Abb.6.3 sieht man die Gewichte und \mathbf{r}_E -Vektoren für ALL, bei der alle LS dasselbe Gewicht aufweisen. Aufgrund der nicht zentralen Abhörposition im Kreis zeigt der \mathbf{r}_E -Vektor nach links zum nächst gelegenen LS. Abb.6.4 zeigt die Gewichte und \mathbf{r}_E -Vektoren für ONE. Es gibt für diese Methoden keinen Unterschied zwischen heller Zone A und dunkler Zone A.



(a) LS-Gew.: $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$ helle **Zone A** (b) LS-Gew.: $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$ helle **Zone B**

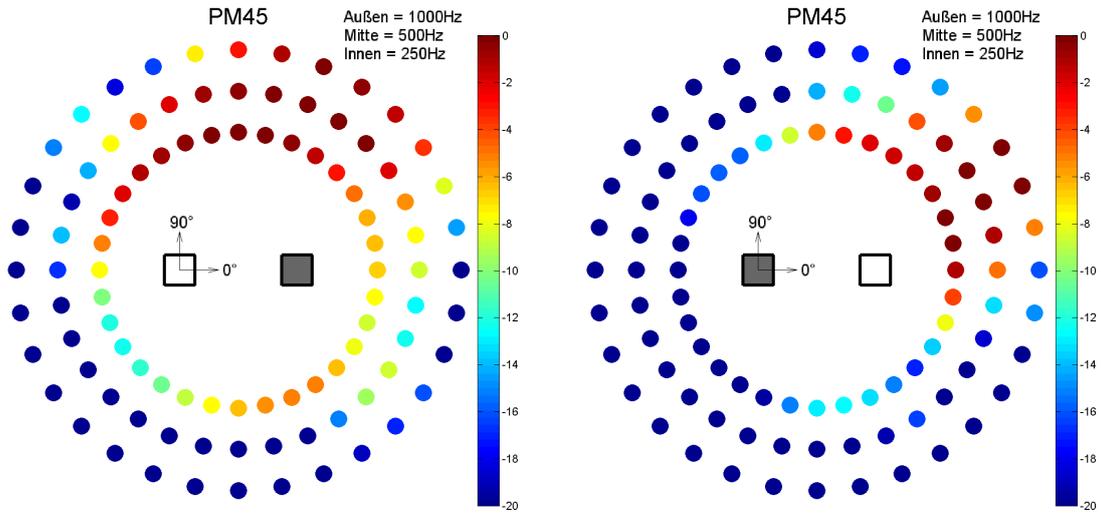


(c) r_E : $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$ helle **Zone A** $f = 250Hz$ (d) r_E : $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$ helle **Zone A** $f = 500Hz$ (e) r_E : $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$ helle **Zone A** $f = 1000Hz$

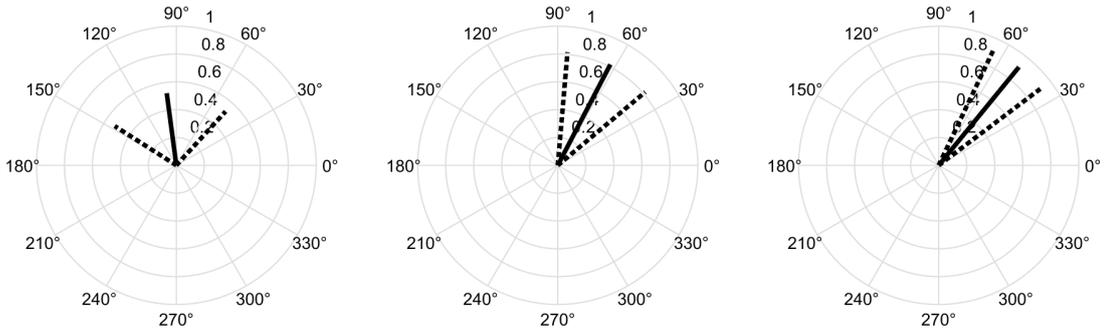


(f) r_E : $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$ helle **Zone B** $f = 250Hz$ (g) r_E : $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$ helle **Zone B** $f = 500Hz$ (h) r_E : $PC_{\varphi=45^\circ, \psi=10^\circ}$ helle **Zone B** $f = 1000Hz$

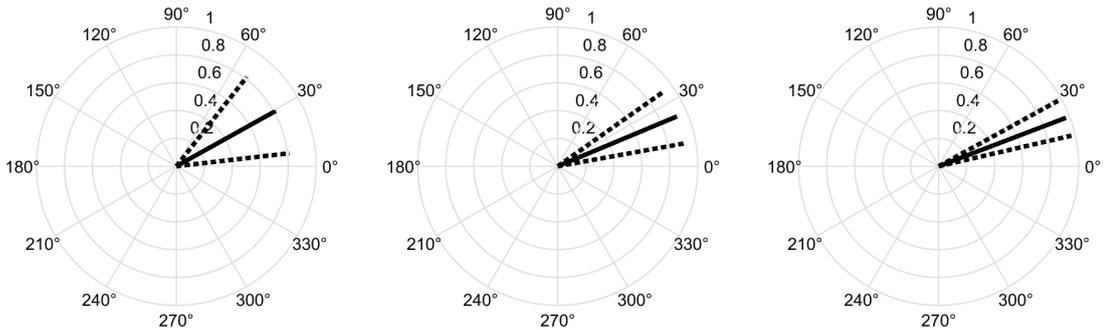
Abbildung 6.1: Kreisförmiges LS-Array mit 32LS im Freifeld: (a),(b) Darstellung der Lautsprechergewichte des Steuervektors PC mit Einstrahlungsrichtung $\varphi = 45^\circ$ und Öffnungswinkel $\psi = 10^\circ$ an den Lautsprecherpositionen. Die Gewichte sind auf das Maximum normiert und farbcodiert. (c) bis (h) Darstellung der r_E -Vektoren.



(a) LS-Gewichte: $PM_{\varphi=45^\circ}$ helle **Zone A** (b) LS-Gewichte: $PM_{\varphi=45^\circ}$ helle **Zone B**

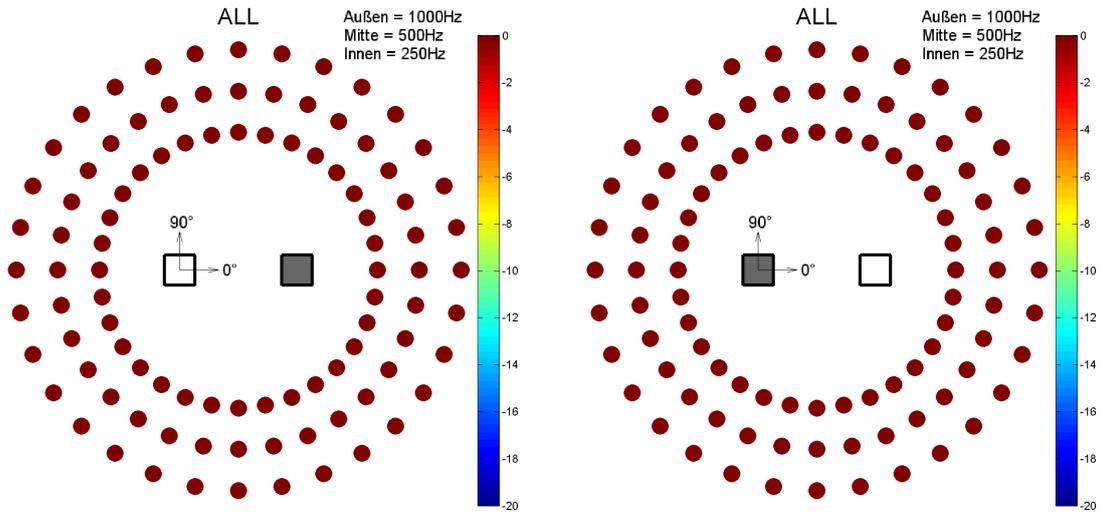


(c) r_E : $PM_{\varphi=45^\circ}$ helle **Zone A** $f = 250Hz$ (d) r_E : $PM_{\varphi=45^\circ}$ helle **Zone A** $f = 500Hz$ (e) r_E : $PM_{\varphi=45^\circ}$ helle **Zone A** $f = 1000Hz$



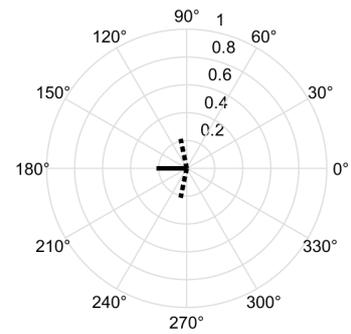
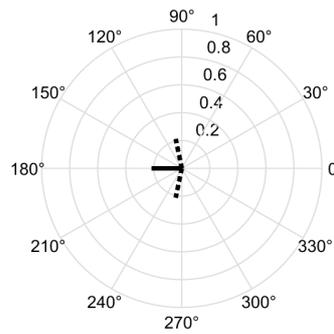
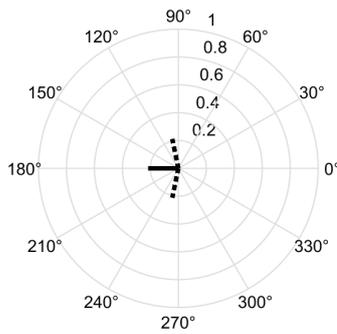
(f) r_E : $PM_{\varphi=45^\circ}$ helle **Zone B** $f = 250Hz$ (g) r_E : $PM_{\varphi=45^\circ}$ helle **Zone B** $f = 500Hz$ (h) r_E : $PM_{\varphi=45^\circ}$ helle **Zone B** $f = 1000Hz$

Abbildung 6.2: Kreisförmiges LS-Array mit 32LS im Freifeld: (a),(b) Darstellung der Lautsprechergewichte des Steuervektors PM mit Einstrahlungsrichtung $\varphi = 45^\circ$ an den Lautsprecherpositionen. Die Gewichte sind auf das Maximum normiert und farb-codiert. (c) bis (h) Darstellung der r_E -Vektoren.



(a) LS-Gewichte: ALL helle **Zone A**

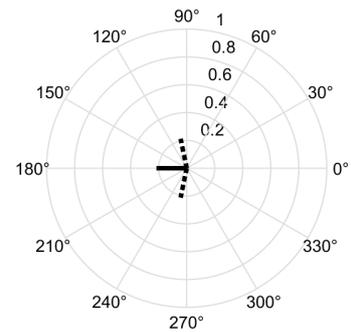
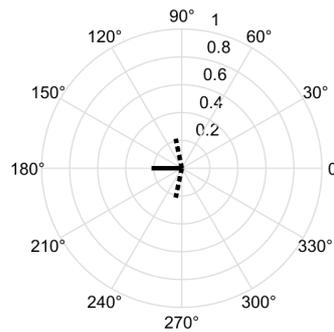
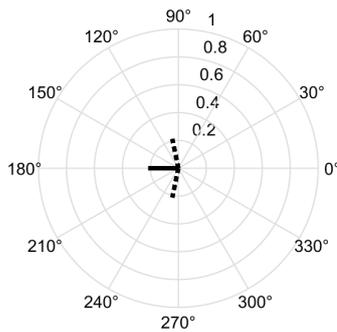
(b) LS-Gewichte: ALL helle **Zone B**



(c) r_E : ALL helle **Zone A**
 $f = 250Hz$

(d) r_E : ALL helle **Zone A**
 $f = 500Hz$

(e) r_E : ALL helle **Zone A**
 $f = 1000Hz$

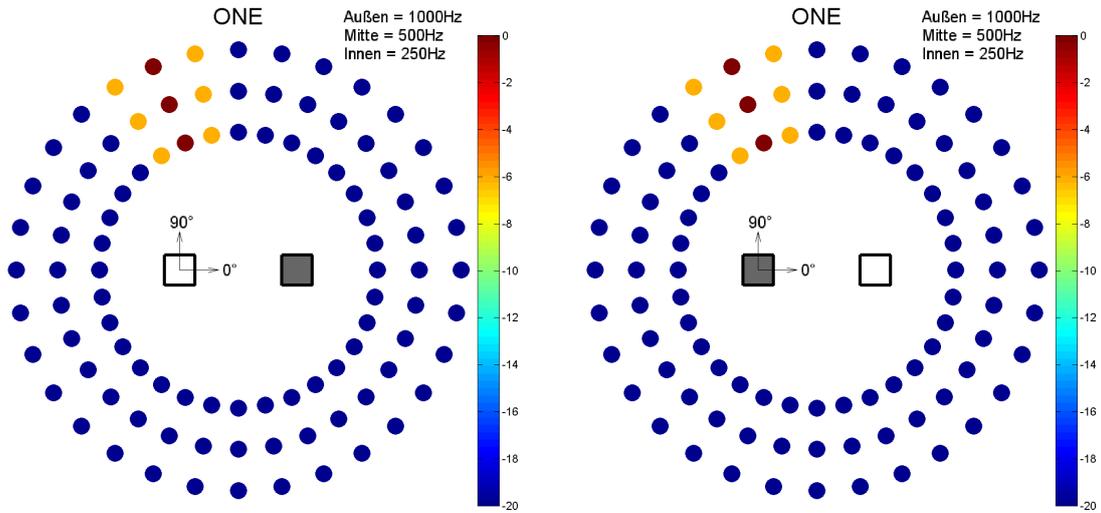


(f) r_E : ALL helle **Zone B**
 $f = 250Hz$

(g) r_E : ALL helle **Zone B**
 $f = 500Hz$

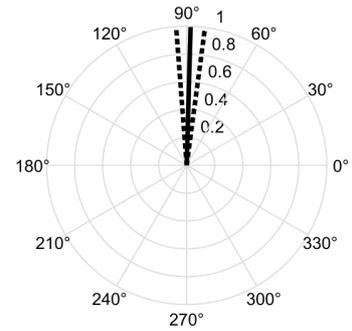
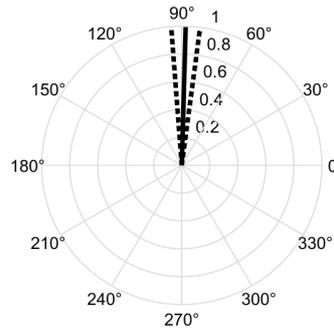
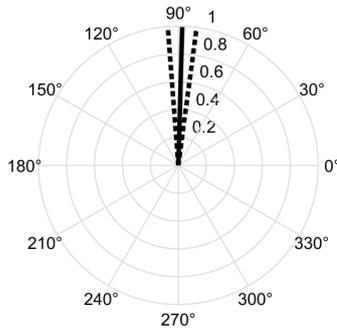
(h) r_E : ALL helle **Zone B**
 $f = 1000Hz$

Abbildung 6.3: Kreisförmiges LS-Array mit 32LS im Freifeld: (a),(b) Darstellung der Lautsprechergewichte des Steuervektors ALL an den Lautsprecherpositionen. Die Gewichte sind auf das Maximum normiert und farbcodiert. (c) bis (h) Darstellung der r_E -Vektoren.



(a) LS-Gewichte: ONE helle **Zone A**

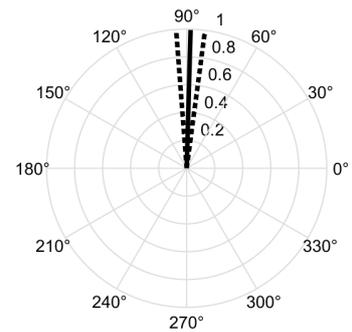
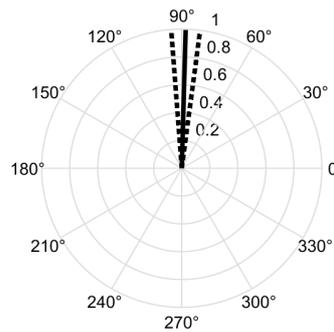
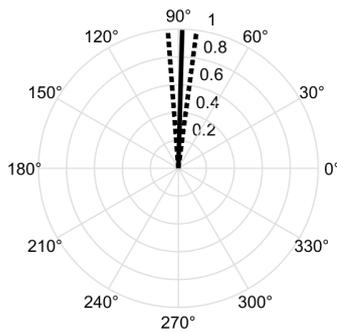
(b) LS-Gewichte: ONE helle **Zone B**



(c) r_E : ONE helle **Zone A**
 $f = 250Hz$

(d) r_E : ONE helle **Zone A**
 $f = 500Hz$

(e) r_E : ONE helle **Zone A**
 $f = 1000Hz$



(f) r_E : ONE helle **Zone B**
 $f = 250Hz$

(g) r_E : ONE helle **Zone B**
 $f = 500Hz$

(h) r_E : ONE helle **Zone B**
 $f = 1000Hz$

Abbildung 6.4: Kreisförmiges LS-Array mit 32LS im Freifeld: (a),(b) Darstellung der Lautsprechergewichte des Steuervektors ONE an den Lautsprecherpositionen. Die Gewichte sind auf das Maximum normiert und farbcodiert. (c) bis (h) Darstellung der r_E -Vektoren.

Koordinaten der CUBE-LS-Kuppel

Die Werte sind in karthesischen Koordinaten vom Zentrum des Raumes aus angegeben.

LS	x/m	y/m	z/m
01	0.000	4.635	1.341
02	2.023	4.600	1.381
03	4.596	4.113	1.401
04	5.028	1.574	1.405
05	5.553	-1.289	1.406
06	3.873	-4.376	1.358
07	0.016	-4.636	1.371
08	-3.860	-4.331	1.353
09	-5.533	-1.068	1.400
10	-4.943	1.821	1.376
11	-4.456	4.481	1.387
12	-1.850	4.711	1.385
13	1.766	4.230	3.828
14	4.441	1.806	3.938
15	4.873	-2.189	4.173
16	1.476	-3.624	3.478
17	-1.577	-3.602	3.493
18	-4.782	-2.055	4.160
19	-4.210	1.925	3.854
20	-1.767	4.223	3.771
21	1.456	1.368	4.423
22	1.324	-1.252	4.153
23	-1.342	-1.267	4.142
24	-1.325	1.399	4.392

Tabelle 6.1: LS Koordinaten für die CUBE-LS-Kuppel in m

Literaturverzeichnis

- [Ber09] P. Berens, “Circstat: A matlab toolbox for circular statistics,” *Journal of Statistical Software, Articles*, vol. 31, no. 10, pp. 1–21, 2009. [Online]. Available: <https://www.jstatsoft.org/v031/i10>
- [BW01] M. Brandstein and D. Ward, *Microphone Arrays: Signal Processing Techniques and Applications*, ser. Digital Signal Processing - Springer-Verlag. Springer, 2001.
- [BZPA15] T. Betlehem, W. Zhang, M. Poletti, and T. Abhayapala, “Personal sound zones: Delivering interface-free audio to multiple listeners,” *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 32, no. 2, pp. 81–91, March 2015.
- [CJO⁺14] P. Coleman, P. J. B. Jackson, M. Olik, M. Møller, M. Olsen, and J. Abildgaard Pedersen, “Acoustic contrast, planarity and robustness of sound zone methods using a circular loudspeaker array,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 135, no. 4, pp. 1929–1940, 2014. [Online]. Available: <http://scitation.aip.org/content/asa/journal/jasa/135/4/10.1121/1.4866442>
- [CJOP13] P. Coleman, P. Jackson, M. Olik, and J. A. Pedersen, “Optimizing the planarity of sound zones,” *Proceedings of the 52nd international conference of Audio Engineering Society*, pp. 1–10, 2013.
- [CK02] J.-W. Choi and Y.-H. Kim, “Generation of an acoustically bright zone with an illuminated region using multiple sources,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 111, no. 4, pp. 1695–1700, 2002. [Online]. Available: <http://scitation.aip.org/content/asa/journal/jasa/111/4/10.1121/1.1456926>
- [Col14] P. Coleman, “Loudspeaker Array Processing for Personal Sound Zone Reproduction,” Ph.D. dissertation, University of Surrey, 2014.

- [ECCK12] S. J. Elliott, J. Cheer, J. W. Choi, and Y. Kim, “Robustness and regularization of personal audio systems,” *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, vol. 20, no. 7, pp. 2123–2133, 2012.
- [Fin92] M. Fink, “Time reversal of ultrasonic fields. I. Basic principles,” *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 39, no. 5, pp. 555–566, 1992. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=156174
- [FP01] M. Fink and C. Prada, “Acoustic time-reversal mirrors,” *Inverse Problems*, vol. 17, no. 1, pp. R1–R38, 2001.
- [Fra13] M. Frank, “Phantom sources using multiple loudspeakers in the horizontal plane,” Doctoral thesis, University of Music and Performing Arts Graz, Austria, 2013.
- [JE08] M. Jones and S. J. Elliott, “Personal audio with multiple dark zones.” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 124, no. September, pp. 3497–3506, 2008.
- [JOMA11] F. Jacobsen, M. Olsen, M. Moller, and F. Agerkvist, “A comparison of two strategies for generating sound zones in a room,” *18th International Congress on Sound & Vibration*, no. July, pp. 10–14, 2011. [Online]. Available: http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:63983/datastreams/file_5677256/content
- [KN93] O. Kirkeby and P. A. Nelson, “Reproduction of plane wave sound fields.” *J. Acoustic. Soc. Am. Vol 94, No. 5*, pp. 2992–3000, 1993.
- [MBL07] P. Majdak, P. Balazs, and B. Laback, “Multiple exponential sweep method for fast measurement of head-related transfer functions,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 55, no. 7/8, pp. 623–637, 2007. [Online]. Available: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14190>
- [NA79] S. T. Neely and J. B. Allen, “Invertibility of a room impulse response,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 66, no. 1, pp. 165–169, 1979. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1121/1.383069>
- [Oli14] M. Olik, “Personal Sound Zone Reproduction with Room Reflections,” Ph.D. dissertation, University of Surrey, 2014.

- [SLF⁺10] M. Shin, S. Q. Lee, F. M. Fazi, P. a. Nelson, D. Kim, S. Wang, K. H. Park, and J. Seo, “Maximization of acoustic energy difference between two spaces.” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 128, no. 1, pp. 121–31, jul 2010. [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20649207>
- [SPH09] A. Sontacchi, H. Pomberger, and R. Höldrich, “Recruiting and evaluation process of an expert listening panel,” in *Fortschritte der Akustik - NAG-DAGA 2009 (NAG/DAGA 2009)*, B. Rinus, Ed., Rotterdam (Niederlande), 03 2009, procedure: without peer reviewing.
- [TAG⁺01] M. Tanter, J.-F. Aubry, J. Gerber, J.-L. Thomas, and M. Fink, “Optimal focusing by spatio-temporal inverse filter. I. Basic principles,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 110, no. 1, p. 37, 2001. [Online]. Available: <http://scitation.aip.org/content/asa/journal/jasa/110/1/10.1121/1.1377051>
- [Wei09] S. Weinzierl, *Handbuch der Audiotechnik*, ser. VDI-Buch. Springer Berlin Heidelberg, 2009. [Online]. Available: <https://books.google.at/books?id=Lf0mBAAAQBAJ>
- [WEJV10] A. Wabnitz, N. Epain, C. T. Jin, and A. Van Schaik, “Room acoustics simulation for multichannel microphone arrays,” *International Symposium on Room Acoustics*, no. August, pp. CDROM: 1–6, 2010.
- [Wit07] H. Wittek, “Perceptual difference between wavefield synthesis and stereophony,” Ph.D. dissertation, School of Arts, Communication and Humanities University of Surrey, 2007.
- [YTF03] S. Yon, M. Tanter, and M. Fink, “Sound focusing in rooms: The time-reversal approach,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 113, no. 3, p. 1533, 2003. [Online]. Available: <http://scitation.aip.org/content/asa/journal/jasa/113/3/10.1121/1.1543587>
- [ZCWY17] Q. Zhu, P. Coleman, M. Wu, and J. Yang, “Robust acoustic contrast control with reduced in-situ measurement by acoustic modeling,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 65, no. 6, pp. 460–473, 2017. [Online]. Available: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=18779>

- [ZS07] F. Zotter and A. Sontacchi, “Iem-report 39/07: Icosahedral loudspeaker array,” University of Music and Performing Arts Graz, Graz (Austria), Tech. Rep., 02 2007.
- [ZSR03] J. M. Zmoelnig, A. Sontacchi, and W. Ritsch, “The iem-cube, a periphonic re-/production system,” in *Audio Engineering Society Conference: 24th International Conference: Multichannel Audio, The New Reality*, Jun 2003. [Online]. Available: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=12295>