Eine Web-Applikation zur Optimierung der Krümmung von Line Source Arrays

Arne Hölter[1], Florian Straube[1], Frank Schultz[2], Stefan Weinzierl[1]

[1] *Fachgebiet Audiokommunikation, TU Berlin, 10587, Berlin, E-mail: hoelter@campus.tu-berlin.de*

[2] *Institut für Nachrichtentechnik, Universität Rostock, 18119, Rostock*

Einleitung

Um verschiedene Veranstaltungsorte mit Line Source Arrays (LSAs) zu beschallen, bedarf es jeweils einer Anpassung der Krümmung des Arrays [1], wenn nicht allein durch elektronisches Beamsteering das gewünschte Schallfeld generiert werden kann bzw. soll. Das durch die Autoren vorgeschlagene Polygonal Audience Line Curving (PALC) [2] zur Optimierung der Neigungswinkel der LSA-Lautsprecherboxen wurde in [3] durch verschiedene Funktionen erweitert, etwa zur Berücksichtigung von nicht zu beschallenden Bereichen, zur Verwendung von diskreten Winkelschritten und zur Gewichtung im Hinblick auf unterschiedliche Zielparameter. In diesem Beitrag wird nun eine Web-Applikation des PALC-Algorithmus inklusive der Erweiterungen auf Basis der Python-Bibliothek bokeh [4] vorgestellt.

Sie erlaubt eine Modellierung von Veranstaltungsorten in der vertikalen Abstrahlungsebene, die Eingabe von Lautsprecher- und Arraydaten, die Benutzung modellierter und gemessener Richtcharakteristiken, die Parametrisierung des Algorithmus sowie die Visualisierung der Ergebnisse. Die Evaluation erfolgt über akustische Simulationen mit Hilfe des Complex-Directivity-Point-Source (CDPS)-Modells [5, 6]. Durch den Algorithmus können die Neigungswinkel eines LSAs hinsichtlich verschiedener Zielstellungen—etwa der Homogenität des simulierten Schallfeldes oder der Erhöhung des akustischen Kontrasts—optimiert werden. Anhand einer beispielhaften Lautsprecher-/Empfänger-Konfiguration werden in diesem Beitrag die Funktionen der Web-Applikation dargestellt und diskutiert.

Erstellen der Empfängergeometrie

Zunächst wird die Empfängergeometrie in der vertikalen Abstrahlungsebene des LSAs erstellt. Dies erfolgt durch Eingabe von Start- und Endwerten gerader Linien. Im Anschluss muss eine für die spätere Berechnung kompatible Geometrie erzeugt werden. Dabei werden Lücken in der Empfängergeometrie, also zwischen den verschiedenen Empfängerlinien, automatisch erkannt und berücksichtigt. In Abb. 1 ist eine einfache beispielhafte Empfängergeometrie mit zwei Empfängerlinien, z. B. Steh- und Sitzplätzen, dargestellt. Die erste Empfängerlinie reicht von

$$\mathbf{x}_{\text{start}} = \begin{pmatrix} x_{\text{start}} \\ y_{\text{start}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7\,\text{m} \\ 0\,\text{m} \end{pmatrix} \quad \text{bis} \quad \mathbf{x}_{\text{stop}} = \begin{pmatrix} 25\,\text{m} \\ 0\,\text{m} \end{pmatrix}$$

und die zweite Empfängerlinie von

$$\mathbf{x}_{\text{start}} = \begin{pmatrix} 30\,\text{m} \\ 3\,\text{m} \end{pmatrix} \quad \text{bis} \quad \mathbf{x}_{\text{stop}} = \begin{pmatrix} 40\,\text{m} \\ 6\,\text{m} \end{pmatrix}.$$

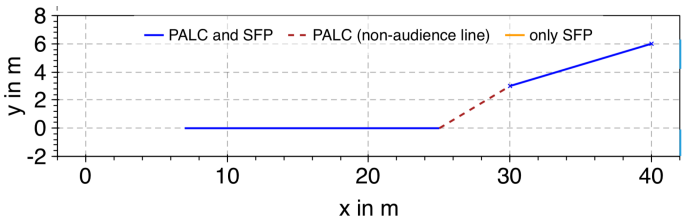


Abb. 1: Empfängergeometrie in der vertikalen Abstrahlebene mit einer Lücke (rot-gestrichelt, nicht zu beschallender Bereich) zwischen zwei Empfängerlinien (blau). Empfängerlinien, die ausschließlich bei der Schallfeldvorhersage (SFP) auf Grundlage des CDPS-Modells einbezogen werden, sind in diesem Beispiel nicht enthalten.

Lautsprecher- und Array-Konfiguration

Anschließend werden die relevanten Lautsprecherdaten eingegeben: die Höhe des Lautsprechergehäuses, ein Startwert für den angenommenen Lautsprecher-PALC-Öffnungswinkel (default: 3° für den ersten Iterationsschritt) und die modellierte oder gemessene Richtcharakteristik. Als Auswahl für die modellierte Richtcharakteristik stehen ein Circular-Piston-Modell [7, Gl. (26.42)], ein Line-Piston-Modell [7, Gl. (26.44)] oder eine Kombination zur Verfügung, bei der die Übergabe mit einem Linkwitz-Riley-Filter vierter Ordnung [8] bei 1,5 kHz erfolgt. Der Active Radiating Factor (ARF) [9] beträgt standardmäßig 0,82. Gemessene Richtcharakteristiken können unter Berücksichtigung der Vorgaben im .csv-Format hochgeladen und im CDPS-Modell verwendet werden.

In der Array-Konfiguration werden die Anzahl der Lautsprecher, der Ort der vorderen Oberkante des obersten Lautsprechergehäuses, gegebenenfalls gleichmäßige Lücken zwischen den Lautsprechern und die Verwendung von diskreten Winkelschritten angegeben. Weiterhin kann zum Vergleich ein Referenz-Array definiert werden. Hier stehen straight, progressive und arc [1], sowie frei wählbare Winkelsets („user defined") zur Verfügung. Das optimierte LSA besitzt immer die gleiche Anzahl an Lautsprechern wie das Referenz-Array. In Tab. 1 sind die eingegebenen Daten für das Beispiel dargestellt.

Parametrisierung des Algorithmus

Zur Parametrisierung des Algorithmus stehen hauptsächlich die in [3] eingeführten Erweiterungen zur Verfügung.

PALC-Bedingung
PALC1, PALC2 und PALC3 [2, Gl. (33-35)] können als Algorithmen verwendet werden.

Tab. 1: Beispielhafte Konfiguration der Lautsprecher- und Array-Daten.

Parameter	Wert
Lautsprecher-PALC-Öffnungswinkel	3°
Lautsprecherhöhe	0,3 m
Richtcharakteristik	Kombination Circular Piston und Line Piston
Lautsprecheranzahl	12
Obere LSA-Kante	$\mathbf{x} = (0;\ 7)^{\mathrm{T}}$ m
Lücke zwischen LS	0 m
Diskrete Winkel	Ja
Diskrete Winkelschritte	(0;0,5;1;1,5;2;3;4;5;7;9)°

Behandlung von Lücken in der Empfängergeometrie
Lücken in der Empfängergeometrie können entweder (i) als zu beschallende Flächen ohne gesonderte Behandlung, (ii) als nicht zu beschallende Flächen durch eine geringere Gewichtung (Soft Margin, steuerbar mit dem Parameter μ) oder (iii) als nicht zu beschallende Flächen, die hinsichtlich des angenommenen Lautsprecher-PALC-Öffnungswinkels komplett vermieden werden sollen (Hard Margin), betrachtet werden.

Gewichtung
Das Ziel der Gewichtung ist die Verbesserung von technischen Qualitätsmaßen, wie beispielsweise der Homogenität, hinsichtlich gegebener Zielstellungen. Die Gewichtung erfolgt durch eine lineare oder logarithmische Abstandsfunktion mit dem Startwert 1 und einem frei wählbaren Endwert ν. Bei gleichzeitiger Verwendung des Soft-Margin-Ansatzes werden beide Gewichtungen ineinander verrechnet und anschließend der PALC-Bedingung übergeben, so dass diese für PALC2 beispielsweise

$$\begin{aligned}\Psi_1 \cdot d_1 \cdot w_1 &= \Psi_2 \cdot d_2 \cdot w_2 = ... \\ &= \Psi_n \cdot d_n \cdot w_n = \text{konstant}\end{aligned} \tag{1}$$

mit Ψ_n als Lautsprecher-PALC-Öffnungswinkel, d_n als Distanz zwischen Lautsprecher und Empfängerlinie, w_n als Gewichtungsfaktor und n als Lautsprecherindex lautet.

Weitere Parametrisierungen
Das Abbruchkriterium kann verändert [2, Abb. (6)] sowie der oberste Lautsprecher auf einen gewünschten Winkel fixiert werden.

Die für das Beispiel gewählten Algorithmus-Einstellungen sind in Tab. 2 angegeben. Mit der Auswahl des Soft-Margin-Ansatzes soll die Lücke als nicht zu beschallender Bereich betrachtet und durch die Gewichtung mit $\nu = 0,3$ ein möglichst homogenes resultierendes Schallfeld erzeugt werden. Die Ergebnisse für das optimierte LSA sind in Abb. 2 für die in Abschnitt *Erstellen der Empfängergeometrie* beschriebene Geometrie, die in Abschnitt *Lautsprecher- und Array-Konfiguration* eingegebenen Lautsprecher- und Array-Daten sowie den in Tab. 2 angegebenen Algorithmus-Einstellungen visualisiert.

Tab. 2: Beispielhafte Parametrisierung des Algorithmus.

Parameter	Wert
PALC-Algorithmus	PALC2
Lückenbehandlung	Soft Margin, $\mu = 1{,}3$
Gewichtung	Log. Abstandsfkt., $\nu = 0{,}3$
Toleranz (Abbruchkriterium)	0,3 m
Höchster Laustprecher fixiert	Nein

Evaluation und Diskussion

Die Evaluation erfolgt anhand von Schalldruck-Simulationen auf Grundlage des CDPS-Modells sowie durch das Homogenitätsmaß $H(f)$. Der Schalldruck $P(m, f)$ ergibt sich durch

$$P(m,f) = \sum_{n=1}^{N} G(m,n,f)\, D(n,f) \tag{2}$$

[5, Gl. (5)], [6, Gl. (11)] an den Empfängerpositionen m für die Frequenzen f und durch die Lautsprecher n. Die Treiberfunktionen $D(n, f)$ sind uniform, d. h. sie weisen eine Allpass- und Null-/Linearphasencharakteristik auf und beinhalten lediglich das Linkwitz-Riley-Crossover-Filter. Die normierte Freifeldübertragungsfunktion ist

$$G(m,n,f) = \underbrace{p_0}_{\text{(i)}}\ \underbrace{10^{\frac{S(n,f)}{20}}}_{\text{(ii)}}\ \underbrace{R\left(\beta(m,n),f\right)}_{\text{(iii)}}\ \underbrace{\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\,\frac{2\pi f}{c}\,|\mathbf{x_m}-\mathbf{x_{0,n}}|}}{|\mathbf{x_m}-\mathbf{x_{0,n}}|}}_{\text{(iv)}} \tag{3}$$

mit $||$ als Vektorbetrag. Sie besteht aus (i) dem Referenzschalldruck $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa, (ii) der Lautsprechersensitivität $S(n, f)$, die den Schalldruckpegel in 1 m Abstand für 1 W elektrischer Eingangsleistung bestimmt, (iii) der frequenzabhängigen Richtcharakteristik $R(\beta(m, n), f)$ für den Abstrahlwinkel $\beta(m, n)$ und (iv) das Schallfeld des Kugelmonopols mit der Schallgeschwindigkeit c und $\mathrm{j}^2 = -1$. Das Homogenitätsmaß berechnet sich durch [3, Gl. (17 - 18)]

$$H(f) = H_{q=0.9}(f) - H_{q=0.1}(f) \tag{4}$$

mit

$$H_q(f) = \underset{m\in\mathcal{M}_a}{\mathcal{Q}_q}\left[20\log_{10}\left(\frac{|P(m,f)|}{p_0}\right)\right], \tag{5}$$

wobei der Operator $\underset{m}{\mathcal{Q}_q}[\cdot]$ die q-Quantile über alle Empfängerpositionen m aus der Menge $\mathcal{M}_a$ der Zuhörerpositionen berechnet. Je geringer $H(f)$, desto homogener ist das Schallfeld über allen Empfängerpositionen. Die Ergebnisse werden mit einem progressiv gekrümmten Referenz-Array verglichen. Die dazugehörigen LSA-Neigungswinkel sind in

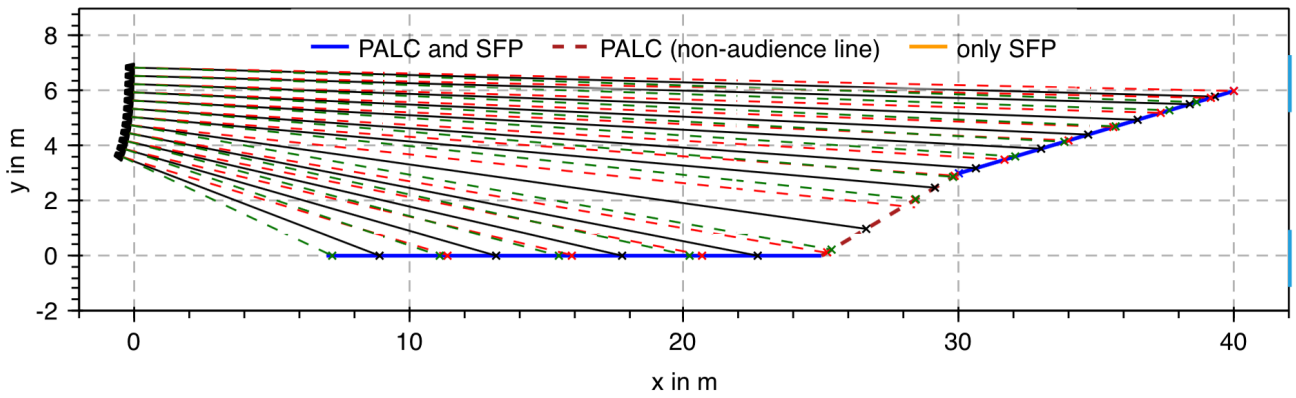


Abb. 2: Empfängergeometrie und durch PALC optimiertes, gekrümmtes LSA mit dazugehörigen, iterativ bestimmten Lautsprecheröffnungswinkeln.

Tab. 3 angegeben.

Für Abb. 3 sind die aus Gl. (2) erhaltenen Schalldrücke in Gl. (4) eingesetzt und dargestellt. Es ist zu erkennen, dass eine deutlich bessere räumliche Homogenität ab etwa 200 Hz durch die optimierte Krümmung des LSAs erreicht wird. In den Abb. 4a, 4b sind die Schalldruckpegel L_p in der vertikalen Abstrahlungsebene der LSAs für 1 kHz dargestellt. Das PALC-optimierte Array fokussiert die Schallabstrahlung durch den Soft-Margin-Ansatz auf die Empfängerlinien und spart im Gegensatz zum Referenz-Array die nicht zu beschallenden Flächen besser aus.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde eine Web-Applikation zur PALC-optimierten Krümmung von LSAs vorgestellt. Sie erlaubt das Erstellen von Empfängergeometrien in der vertikalen Abstrahlungsebene, die Lautsprecher- und Array-Konfiguration inklusive Upload von gemessenen Richtcharakteristiken, das Wählen von diskreten Winkelschritten, die Parametrisierung des Algorithmus inklusive der Behandlung von Lücken in der Empfängergeometrie und die Auswahl von Gewichtungsfunktionen zur Annäherung an Zielschallfelder. Es wurde anhand eines Beispiels gezeigt, dass der implementierte Algorithmus das Homogenitätsmaß $H(f)$, d. h. die räumliche Homogenität, gegenüber einer progressiven LSA-Standardkrümmung verbessert. Die Web-Applikation ist auf der Webseite des Fachgebiets Audiokommunikation abrufbar.[1]

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) innerhalb der Projekte LE 3888/2-1 und WE 4057/16-1.

Literatur

[1] Ureda, M.S. (2004): "Analysis of loudspeaker line arrays." In: *J. Audio Eng. Soc.*, **52**(5):467–495.

[2] Straube, F.; Schultz, F.; Bonillo, D.A.; Weinzierl, S. (2018): "An analytical approach for optimizing the curving of line source arrays." In: *J. Audio Eng. Soc.*, **66**(1/2):4–20.

[3] Hölter, A.; Straube, F.; Schultz, F.; Weinzierl, S. (2020): "Enhanced Polygonal Audience Line Curving for Line Source Arrays." In: *Proc. of 148th Audio Eng. Soc. Conv., Vienna.*

[4] Bokeh Development Team (2020), "Bokeh: Python library for interactive visualization." `https://bokeh.org`.

[5] Meyer, D.G. (1984): "Computer simulation of loudspeaker directivity." In: *J. Audio Eng. Soc.*, **32**(5):294–315.

[6] Feistel, S.; Thompson, A.; Ahnert, W. (2009): "Methods and limitations of line source simulation." In: *J. Audio Eng. Soc.*, **57**(6):379–402.

[7] Skudrzyk, E. (1971): *The Foundations of Acoustics.* New York: Springer.

[8] Linkwitz, S.H. (1978): "Passive crossover networks for noncoincident drivers." In: *J. Audio Eng. Soc*, **26**(3):149–150.

[9] Schultz, F.; Straube, F.; Spors, S. (2015): "Discussion of the Wavefront Sculpture Technology criteria for straight line arrays." In: *Proc. of the 138th Audio Eng. Soc. Conv., Warsaw*, #9323.

Anhang

Tab. 3: Neigungswinkel γ_n in Grad des PALC-optimierten und des progressiv gekrümmten Referenz-Arrays.

Lautsprecher	PALC	Referenz
1	1,54	2,00
2	1,54	2,50
3	2,04	3,00
4	2,54	4,00
5	3,04	5,50
6	4,04	7,00
7	5,04	9,00
8	8,04	12,00
9	11,04	15,00
10	13,04	18,00
11	16,04	21,00
12	21,04	25,00

[1] https://www.ak.tu-berlin.de/menue/publications/open_research_tools/

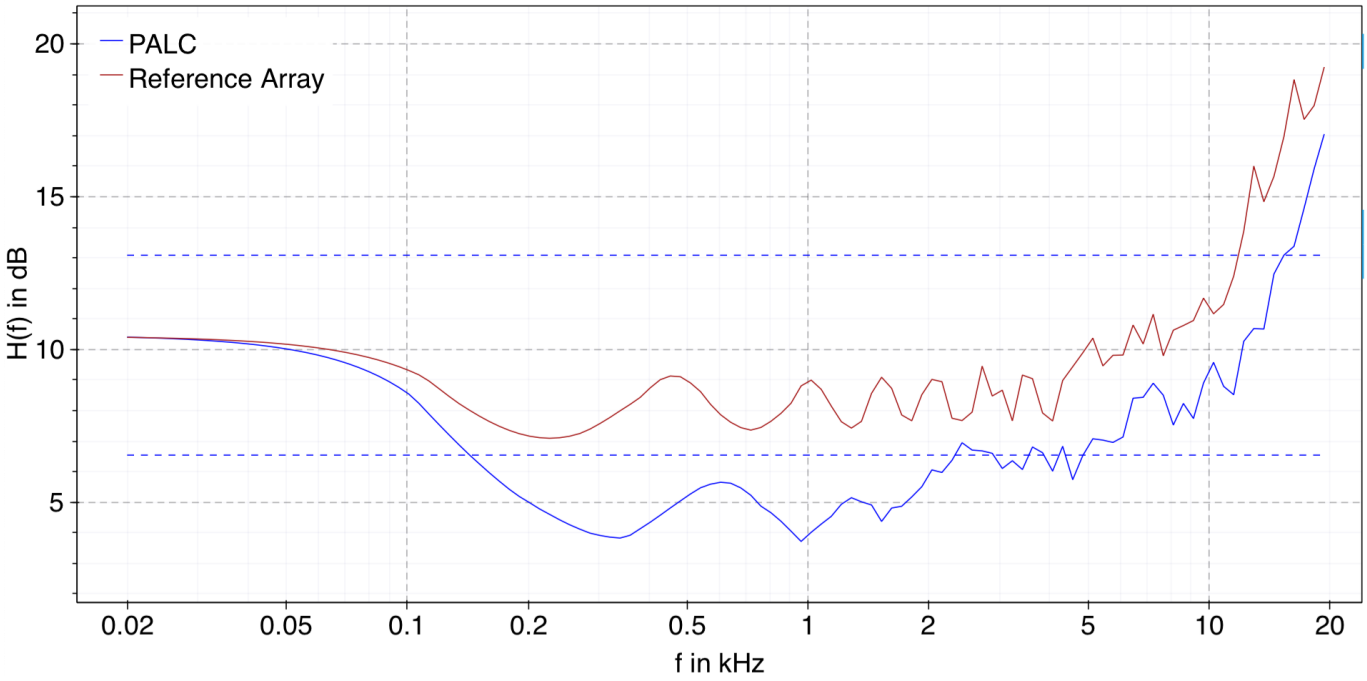
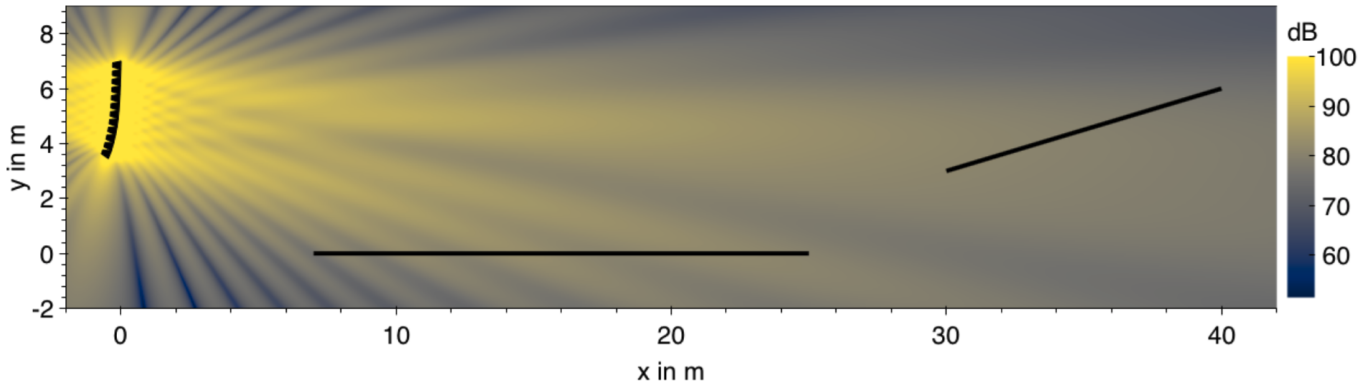
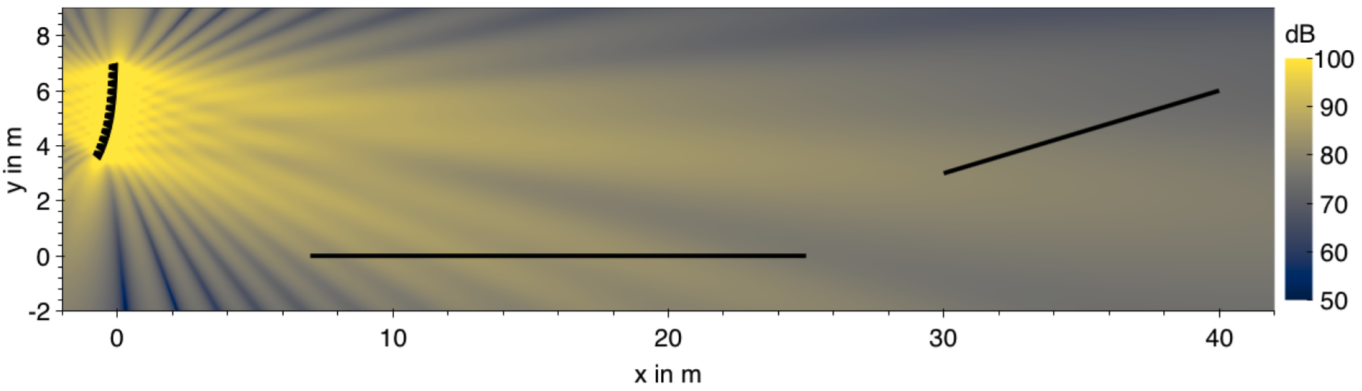


Abb. 3: Homogenitätsmaß des PALC-optimierten und des progressiv gekrümmten Referenz-Arrays. Die obere blau-gestrichelte Linie quantifiziert einen optimalen 6-dB-Schalldruckabfall und die untere einen 3-dB-Schalldruckabfall je Entfernungsverdopplung, ausgehend von der Mitte des LSAs.



(a) PALC2-optimiertes LSA mit Gewichtung $\nu = 0,3$ und Soft Margin $\mu = 1,3$



(b) Progressiv gekrümmtes Referenz-Array

Abb. 4: Schalldruckpegel L_p in der vertikalen LSA-Abstrahlungsebene des PALC-optimierten (oben) und des Referenz-Arrays (unten) bei der Frequenz $f = 1\,\mathrm{kHz}$.