

## Zur Optimierung der Krümmung von Line Source Arrays

Florian Straube, David Albanés Bonillo, Frank Schultz, Stefan Weinzierl

Audio Communication Group, TU Berlin, 10587, Berlin, Germany, E-mail: florian.straube@tu-berlin.de

### Einleitung

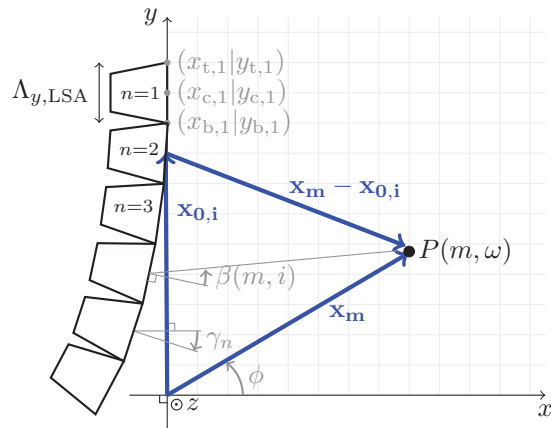
Für Großbeschallungsanwendungen (z. B. bei Open-Air-Veranstaltungen, in Arenen und Stadien) werden typischerweise Line Source Arrays (LSAs) eingesetzt, mit den Zielen homogene Schallfelder für den gesamten wahrnehmbaren Frequenzbereich zu generieren und möglichst hohe Schalldruckpegel zu erreichen. Die verwendeten Lautsprecherboxen werden zueinander angewinkelt und/oder geeignet elektronisch angesteuert, um wie beabsichtigt die Zuhörerbereiche zu beschallen und die Abstrahlung in Richtung Decken, reflektierenden Wänden und bewohnten Gebieten zu vermeiden.

In diesem Beitrag wird der analytische Ansatz Polygonal Audience Line Curving (PALC) vorgestellt. Dieser wird verwendet, um abhängig von der Geometrie des Veranstaltungsortes und von der gewünschten Abstrahlung geeignete Neigungswinkel für die Lautsprecherboxen zu finden. PALC kann entweder separat oder im Voraus einer Optimierung der Filterfunktionen der einzelnen Lautsprecher angewandt werden. Mit der Methode können unterschiedliche Zielstellungen verfolgt werden, z. B. eine unveränderliche Interaktion zwischen benachbarten Boxen im Zuhörerbereich sowie mit der zusätzlichen Berücksichtigung entfernungsabhängiger Amplitudenabnahme. Akustische Simulationen, die auf dem Complex-Directivity-Point-Source (CDPS)-Modell basieren, liefern die Daten für die Evaluation. PALC wird für ein jeweils uniform angesteuertes LSA für einen exemplarisch ausgewählten Veranstaltungsort mit anderen typischen LSA-Curving-Verfahren (Straight, Arc, J und Progressive) verglichen. Die Vorteile des präsentierten Ansatzes bezüglich der Schallfeld-Homogenität und der zielorientierten Abstrahlung werden mit Hilfe technischer Qualitätsmaße gezeigt.

### Evaluations-Setup

Das LSA-Setup und die betrachtete Geometrie sind in Abb. 1 dargestellt. Es werden insgesamt  $N = 16$  LSA-Boxen mit  $n = 1, 2, \dots, N$  verwendet. Die Länge  $\Lambda_{y, \text{LSA}}$  einer LSA-Box beträgt 0.372 m, so dass sich eine Gesamtlänge des Arrays von ca. 5.96 m ergibt.  $\gamma_n$  bezeichnet jeweils den Neigungswinkel der  $n$ -ten Box und der Ortsvektor  $\mathbf{x}_{0,i}$  charakterisiert die Position des  $i$ -ten LSA-Lautsprechers bezogen auf das entsprechende Frontgitter einer Box. Detaillierte Informationen zur geometrischen Konfiguration sind in [1] zu finden.

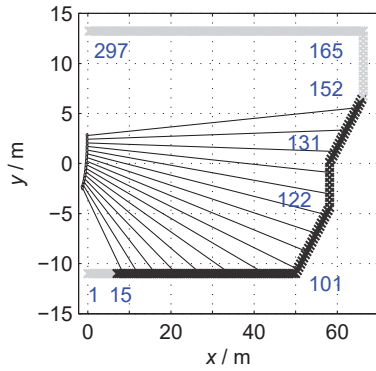
Die einzelnen LSA-Boxen sind in diesem Beitrag als Drei-Wege-System ausgeführt, wobei pro Kabinett  $L_{\text{LF}} = 1$ ,  $L_{\text{MF}} = 4$  und  $L_{\text{HF}} = 10$  vertikal übereinander angeordnete und individuell ansteuerbare Treiber für den tiefen (LF), den mittleren (MF) und den hohen Frequenzweg (HF) zur Verfügung stehen. Es handelt sich dabei um



**Abbildung 1:** Schematische Darstellung des betrachteten LSA-Setups. Es werden insgesamt  $N = 16$  LSA-Boxen der Länge  $\Lambda_{y, \text{LSA}} = 0.372$  m verwendet.

Treiber der Größe 12 Zoll für LF, 3 Zoll für MF und 1.2 Zoll für HF. Für die verschiedenen Lautsprecher werden frequenzunabhängige Empfindlichkeiten ( $1 \text{ W} / 1 \text{ m}$ ) angenommen, um auf plausible Schalldruckwerte schließen zu können. Diese betragen  $S_{\text{dB,LF}} = 96$  dB,  $S_{\text{dB,MF}} = 88$  dB und  $S_{\text{dB,HF}} = 112$  dB für die vertikale Abstrahlung. Das Verhältnis der Treibergrößen zum festen Abstand zwischen den Mittelpunkten der Treiber, welches unter dem Begriff Active Radiating Factor (ARF) [2, Sec. 3.2], [3] bekannt ist, beträgt ungefähr 0.82. Für LF und MF wird das Modell einer Kolbenmembran und für HF das Modell einer Zeilenmembran genutzt. Linkwitz-Riley-Filter 4. Ordnung mit den Übernahmefrequenzen  $f_{\text{LF,MF}} = 400$  Hz und  $f_{\text{MF,HF}} = 1500$  Hz werden als Frequenzweichenfilter für die verschiedenen Frequenzwege eingesetzt.

Eine komplex aufgebaute Arena mit Stehplatzflächen sowie Rängen und Tribünen [4, Sec. 6.1] wird durch eine zweidimensionale Venue Slice modelliert. Der Zuhörerbereich besteht aus 4 Sektionen mit unterschiedlichen Neigungswinkeln. In diesem Beitrag werden Near-Fills, Side-Fills und verzögerte Arrays, die in praktischen Realisierungen üblich sind, nicht berücksichtigt. Typischerweise wird lediglich die vertikale Abstrahlungsebene, hier  $xy$ -Ebene, betrachtet, vgl. Abb. 2. Das ist ein konventioneller Ansatz für Optimierungsmethoden der Treiberfunktionen, da davon ausgegangen wird, dass die horizontale Abstrahlung bereits geeignet ist [4–8]. Insgesamt werden  $M = 297$  Empfängerpositionen für den exemplarisch ausgewählten Veranstaltungsort berücksichtigt. Das entspricht einem Abstand von 0.5 m zwischen den Kontrollpositionen. Diese Positionen werden durch die Ortsvektoren  $\mathbf{x}_m = (x_m, y_m, 0)^T$  beschrieben und gegen den Uhrzeigersinn nummeriert, begin-



**Abbildung 2:** Venue Slice in der  $xy$ -Ebene mit Zuhörer- (schwarz) sowie Nicht-Zuhörerpositionen (grau) und ausgewählten Indizes der  $M$  Empfänger-Positionen, die entweder einen Wechsel zwischen Zuhörer- und Nicht-Zuhörerbereich und/oder eine Änderung des Neigungswinkels der Polygonzug-Sektion der Kontrollpositionen spezifizieren.

nend von der Position unterhalb des LSAs, die sich am nächsten zum LSA befindet (Index 1, vgl. Abb. 2).

Es ist zu erwähnen, dass die Begriffe *Bright Zone* und *Dark Zone*, die in der Mehrzonen-Schallfeldsynthese (MZSFS) [9, 10] gebräuchlich sind, den Zuhörerbereichen bzw. Nicht-Zuhörerbereichen bei Großbeschallungsproblemen entsprechen.

## Berechnungsmodell

Der Gesamtschalldruck setzt sich aus den Wirkungen der einzelnen Frequenzwege zusammen, d. h.

$$P(m, \omega) = P_{LF}(m, \omega) + P_{MF}(m, \omega) + P_{HF}(m, \omega). \quad (1)$$

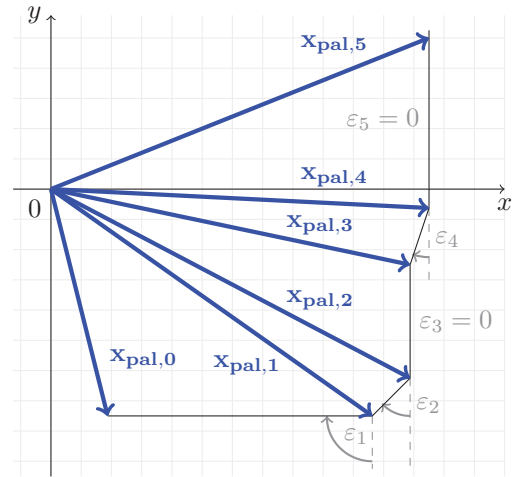
Im Folgenden werden die Indizes LF, MF und HF der Frequenzwege zur Verallgemeinerung vernachlässigt. Die Schallfeldberechnung basiert auf dem Complex-Directivity-Point-Source (CDPS)-Modell mit idealen Fernfeld-Direktivitäten von Lautsprechern. Dessen Grundgleichung [11, Gl. (5)], [5, Gl. (3-5)], [12, Sec. 1.1], [13, Gl. (11)] lautet

$$P(m, \omega) = \sum_{i=1}^{LN} G(m, i, \omega) D(i, \omega). \quad (2)$$

$P(m, \omega)$  bezeichnet das Frequenzspektrum des Schalldrucks an den Empfängerpositionen.  $G(m, i, \omega)$  steht für die akustische Transferfunktion (ATF) von der  $i$ -ten Quelle zur  $m$ -ten Empfängerposition. Das komplexe Treiberfunktionsspektrum  $D(i, \omega)$  der  $i$ -ten Quelle ist direkt proportional zum Schnellespektrum der Quelle. Die Schallfelder werden für uniform angesteuerte Lautsprecher und für einen logarithmisch verteilten Frequenzvektor mit  $f_{\text{start}} = 200$  Hz,  $f_{\text{stop}} = 20$  kHz und einer 1/36-Oktavauflösung prädiert.

## Polygonal Audience Line Curving

Polygonal Audience Line Curving (PALC) ist ein analytischer Ansatz, um abhängig von der Geometrie eines Veranstaltungsortes und abhängig vom gewünschten Schallfeld die Neigungswinkel  $\gamma_n$  der einzelnen LSA-Boxen zu



**Abbildung 3:** Polygonal Audience Line (PAL) mit  $K$  Sektionen (in diesem Fall:  $K = 5$ ). Die Anfangsposition der  $k$ -ten Sektion des Polygonzuges wird durch den Vektor  $\mathbf{x}_{\text{pal},k-1}$  beschrieben und die Endposition ist durch den Vektor  $\mathbf{x}_{\text{pal},k}$  gegeben.  $\varepsilon_k$  bezeichnet den Neigungswinkel der  $k$ -ten Sektion des Polygonzuges.

berechnen. Aus der vertikalen Abstrahlungsebene werden dafür die Zuhörerpositionen heraus extrahiert. Diese Anordnung kann geometrisch als Polygonzug interpretiert werden. Abb. 3 zeigt einen exemplarischen Zuhörer-Polygonzug, der sich an dem in diesem Paper betrachteten Veranstaltungsort orientiert.

Die Neigungswinkel der einzelnen Boxen werden iterativ von der obersten zur untersten Box als auch von der obersten zur untersten Sektion des Polygonzuges berechnet. Eine ausführliche Beschreibung des Algorithmus ist in [14] zu finden. Dieser Ansatz kann mit unterschiedlichen Zielen verwendet werden. Die Intention von PALC1 besteht darin, dass die Interaktion der einzelnen LSA-Boxen auf dem Zuhörer-Polygonzug möglichst konstant ist, d. h., dass sich der abgestrahlte Schall der Einzelquellen unter einem konstanten Winkel  $\psi$  im Fernfeld der Einzelquellen auf dem Polygonzug überschneidet. Mathematisch lässt sich das als

$$\psi_1 = \psi_2 = \psi_3 = \dots = \text{const.} \quad (3)$$

ausdrücken. PALC1 ist ähnlich zu einem Arc-Array, allerdings bezieht sich das Ziel nicht auf das Array selbst, also konstante Neigungswinkel zwischen allen Boxen, sondern auf die Form der Empfängergeometrie.

Beim Fall PALC2 werden zudem die Abstände zwischen den Quellen und den Mittelpunkten der betreffenden beschallten Abschnitte des Polygonzuges miteinbezogen. Das Ziel besteht darin, das Produkt aus dem (Fernfeld-) Winkel  $\psi$  und diesem Abstand  $d$  zwischen Quelle und Mittelpunkt konstant zu halten, also

$$\psi_1 d_1 = \psi_2 d_2 = \dots = \text{const.} \quad (4)$$

Diese Forderung resultiert aus der Intention, dass alle Längen der von den unterschiedlichen Lautsprechern beschallten Polygonzug-Abschnitte gleich groß sein sollen. Gl. (4) enthält die Vereinfachung von  $\tan(\psi)$  zu  $\psi$  für kleine  $\psi$  sowie die Annahme, dass alle Neigungswinkel

$\varepsilon_k$  der Polygonzug-Sektionen und alle Neigungswinkel  $\gamma_n$  der Array-Boxen entweder gleich groß oder klein gegenüber 0 sind.

## Diskussion

Die Evaluation erfolgt auf Grundlage von Schallfeldern, die mit dem CDPS-Modell generiert werden. PALC1 und PALC2 werden mit den LSA-Krümmungen Straight, Arc, J und Progressive [15] verglichen. Eine Auswahl von Evaluationskriterien, die in [1] vorgeschlagen wurden, dienen zur Bewertung der unterschiedlichen Curving-Methoden. Die Position Index Plots (PIPs) zeigen die resultierenden SPL-Spektren für alle Empfängerpositionen, also die Schalldruckpegel in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$  und dem Ortsindex  $m$ . In den Abb. 4a, 4b, 4c und 4d ist für die Fälle Arc, Progressive, PALC1 sowie PALC2 zu erkennen, dass wie gewünscht nur wenig Energie in die Nicht-Zuhörerbereiche abgestrahlt wird. Die vom Arc- und vom PALC1-Array generierten Schallfelder sind im Zuhörerbereich sehr ähnlich. Quantitative Schlussfolgerungen lassen sich allerdings nicht aus den PIP-Visualisierungen ziehen.

Daher beruht die quantitative Evaluation auf zwei technischen Maßen: Das frequenzabhängige Verhältnis  $L_{p,a,na}(\omega)$  der mittleren Schalldruckpegel im Zuhörer und im Nicht-Zuhörerbereich [1, Gl. (18)], das in der MZSFS als akustischer Kontrast bekannt ist [9, 10], wird genutzt. Zusätzlich wird das Homogenitätsmaß  $H1(\omega)$  verwendet [14, Gl. (37)], das die Standardabweichung der abstandskompensierten Schalldruckpegel an allen Zuhörerpositionen angibt. In Abb. 4e wird deutlich, dass der Wert des akustischen Kontrasts für alle Methoden prinzipiell mit zunehmender Frequenz ansteigt. Bei ca. 8.5 kHz fallen die Werte aufgrund des einsetzenden räumlichen Aliasings stark ab. PALC1 und PALC2 liefern abhängig von der Frequenz bis zu (1...1.5) dB größere  $L_{p,a,na}(\omega)$ -Werte als J, Arc und Progressive. Das gerade Array weist die besten Werte auf, was jedoch darin begründet ist, dass dieses Array aufgrund der für alle Konfigurationen gewählten gleichen Gesamtlänge nicht alle Zuhörer-Positionen direkt beschallt, sondern die ersten und die letzten Zuhörer-Positionen nicht direkt erreicht.

Dieses Verhalten spiegelt sich ebenfalls in den Homogenitätswerten wider, siehe Abb. 4f.  $H1(\omega)$  des geraden Arrays liegt für alle Frequenzen oberhalb der anderen Werte. Das progressive Curving liefert, wie es für eine Vielzahl von Venues als robuste Anfangslösung bekannt ist, sehr gute Ergebnisse. Es hat neben PALC2 die geringste Standardabweichung. Das Arc- und das J-Array erlauben keine Anpassung an die komplexe Form des gewählten Veranstaltungsortes und der PALC1-Ansatz scheint entgegen der Erwartung bezogen auf die Homogenität keine sinnvollen Neigungswinkel zu produzieren.

## Zusammenfassung

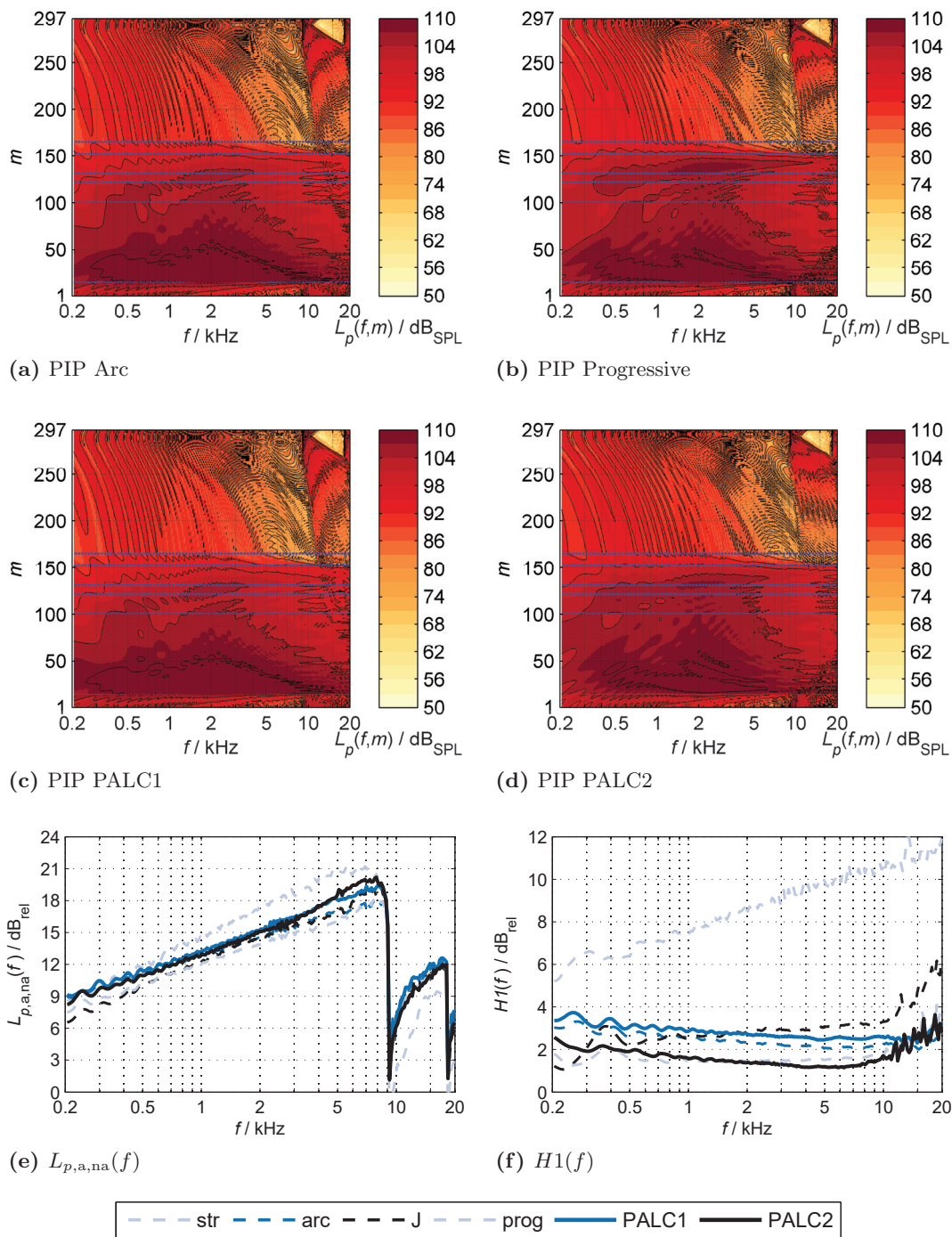
Um verschiedene Veranstaltungsorte mit Line-Arrays zu beschallen, bedarf es jeweils einer Anpassung des Curvings des Arrays, wenn nicht allein durch elektronisches Beamsteering das gewünschte Schallfeld generiert

werden kann bzw. soll. Der analytische Ansatz PALC zum Finden geeigneter Neigungswinkel für LSA-Boxen wird in diesem Beitrag mit Standard-LSA-Curving-Verfahren verglichen. PALC basiert auf der Geometrie der Empfängerpositionen und der beabsichtigten Abdeckung. Er ist den Standard-Methoden überlegen, weil er eine flexible Anpassung an die konkrete Geometrie des Veranstaltungsortes erlaubt. Die Berechnung lässt sich effizient implementieren.

PALC soll um verschiedene Ziele erweitert werden und die möglichen Lösungen für die Neigungswinkel sollen auf eine diskrete Sammlung von Winkelwerten reduziert werden, wie es für praktische Realisierungen erforderlich ist. Ein geplanter Vergleich mit in der Praxis gängigen numerischen Methoden soll Aufschluss über Effizienz, Genauigkeit und Relevanz des entwickelten Verfahrens geben. Es wird beabsichtigt, PALC als Vorstufe für die Optimierung der elektronischen Ansteuerung von Line-Arrays zu verwenden.

## Literatur

- [1] Straube, F.; Schultz, F.; Makarski, M.; Spors, S.; Weinzierl, S. (2015b): "Evaluation strategies for the optimization of Line Source Arrays." In: *Proc. of the 59th Audio Eng. Soc. Int. Conf. on Sound Reinforcement, Montreal*.
- [2] Urban, M.; Heil, C.; Bauman, P. (2003): "Wavefront Sculpture Technology." In: *J. Audio Eng. Soc.*, **51**(10):912–932.
- [3] 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*.
- [4] Thompson, A.; Baird, J.; Webb, B. (2011): "Numerically optimized touring loudspeaker arrays - Practical applications." In: *Proc. of the 131st Audio Eng. Soc. Conv., New York, #8511*.
- [5] van Beuningen, G.W.J.; Start, E.W. (2000): "Optimizing directivity properties of DSP controlled loudspeaker arrays." In: *Proc. of the Inst. of Acoustics: Reproduced Sound*, **22**(6):17–37.
- [6] Thompson, A. (2006): "Line array splay angle optimisation." In: *Proc. of the Inst. of Acoustics*, **28**(8):135–148.
- [7] Thompson, A. (2009): "Improved methods for controlling touring loudspeaker arrays." In: *Proc. of the 127th Audio Eng. Soc. Conv., New York, #7828*.
- [8] Feistel, S.; Sempf, M.; Köhler, K.; Schmalle, H. (2013): "Adapting loudspeaker array radiation to the venue using numerical optimization of FIR filters." In: *Proc. of the 135th Audio Eng. Soc. Conv., New York, #8937*.
- [9] Choi, J.W.; Kim, Y.H. (2002): "Generation of an acoustically bright zone with an illuminated region using multiple sources." In: *J. Acoust. Soc. Am.*, **111**(4):1695–1700.
- [10] Coleman, P.; Jackson, P.J.B.; Olik, M.; Pedersen, J.A. (2014): "Personal audio with a planar bright zone." In: *J. Acoust. Soc. Am.*, **136**(4):1725–1735.
- [11] Meyer, D.G. (1984): "Computer simulation of loudspeaker directivity." In: *J. Audio Eng. Soc.*, **32**(5):294–315.
- [12] Meyer, P.; Schwenke, R. (2003): "Comparison of the directional point source model and BEM model for arrayed loudspeakers." In: *Proc. of the Inst. of Acoustics*, **25**(4).
- [13] Feistel, S.; Thompson, A.; Ahnert, W. (2009): "Methods and limitations of line source simulation." In: *J. Audio Eng. Soc.*, **57**(6):379–402.
- [14] Straube, F.; Schultz, F.; Bonillo, D.A.; Weinzierl, S. (2017): "An analytical approach for optimizing the curving of Line Source Arrays." In: *Proc. of the 142nd Audio Eng. Soc. Conv., Berlin*, submitted and accepted.
- [15] Ureda, M.S. (2004): "Analysis of loudspeaker line arrays." In: *J. Audio Eng. Soc.*, **52**(5):467–495.



**Abbildung 4:** Technische Qualitätsmaße für alle untersuchten Curving-Methoden und Position Index Plots (PIPs) für die Fälle Arc, Progressive, PALC1 und PALC2.