

## Vergleich verschiedener Lautsprecherzeilen im Nahfeld

Tom Wühle, Sebastian Merchel, M. Ercan Altinsoy

TU Dresden, Lehrstuhl Kommunikationsakustik, 01062 Dresden, Deutschland, E-mail: tom.wuehle@mailbox.tu-dresden.de

### Einleitung

Lautsprecherzeilen haben ein gerichtetes Abstrahlverhalten, welches sich durch Manipulationen ihrer Geometrie oder ihrer Ansteuerungssignale beeinflussen lässt. Ein typischer Anwendungsfall ist die gerichtete Beschallung eines bestimmten Publikumsbereiches auf einem Open-Air-Konzert. Während in derartigen Situationen eine Fernfeldmodellierung meist ausreicht, ist dies in geschlossenen Räumen nicht der Fall, da die erreichbaren Hörabstände zu gering sind. Hier wird eine komplexe Nahfeldmodellierung erforderlich. Eine solche Modellierung ermöglicht es darüber hinaus, die Anwendbarkeit von Lautsprecherzeilen in auch andersartigen Beschallungssituationen wie Heimkino, Produktgeräusdesign oder Umgebungen für virtuelle Realität zu untersuchen. Abhängig von der spezifischen Anwendung sind dabei jedoch unterschiedliche Qualitätsmerkmale von Bedeutung. Das vorliegende Paper untersucht in diesem Zusammenhang das Richtverhalten von drei verschiedenen Zeilenanordnungen im Nahfeld.

### Modellierung von Lautsprecherzeilen

#### Richtcharakteristik im Fernfeld

Wie u. a. bei Möser [1] zu finden, ist der Schalldruck  $p_{\text{ff}}$  im Fernfeld einer äquidistanten Lautsprecherzeile gegeben durch:

$$p_{\text{ff}} = \underline{A} \cdot \frac{\sin\left(\pi \frac{l}{\lambda} \sin(\theta)\right)}{\pi \frac{l}{\lambda} \sin(\theta)} \quad (1)$$

$\underline{A}$  entspricht dem komplexen Schalldruck einer Punktquelle mit dem selben Schallfluss wie dem der Lautsprecherzeile,  $\lambda$  kennzeichnet die Wellenlänge,  $l$  die Zeilenlänge und  $\theta$  den Winkel zwischen Hörposition und Zeilenmittelpunkt. Nach Möser [1] gilt Gleichung (1) jedoch nur mit folgenden Einschränkungen hinsichtlich des Hörabstandes  $R$ :

1. Die Amplitude des von jedem einzelnen Zeilenlautsprecher produzierten komplexen Schalldrucks, muss mit ungefähr derselben Funktion der Entfernung abnehmen. Dies gilt solange folgende Ungleichung erfüllt wird, die Zeile also klein im Vergleich zum Beobachtungsabstand ist:

$$R \gg l \quad (2)$$

2. In einem diskreten Beobachtungspunkt variiert die Phase des von jedem einzelnen Zeilenlautsprecher

produzierten komplexen Schalldrucks mit der jeweiligen Lautsprecherposition. Die resultierenden Phasenunterschiede steigen mit zunehmender Frequenz. Um keine Phasenunterschiede größer als  $\frac{\pi}{4}$  zu erhalten, muss folgende Ungleichung erfüllt werden, die eine obere Frequenzbegrenzung der Fernfeldmodellierung darstellt:

$$R \gg \frac{l^2}{\lambda} \quad (3)$$

3. Bei tiefen Frequenzen tritt zusätzlich zwischen komplexem Schalldruck und komplexer Schallschnelle ein Phasenunterschied auf. Damit dieser vernachlässigt werden kann, muss folgende Ungleichung erfüllt werden, die eine untere Frequenzbegrenzung der Fernfeldmodellierung darstellt:

$$R \gg \lambda \quad (4)$$

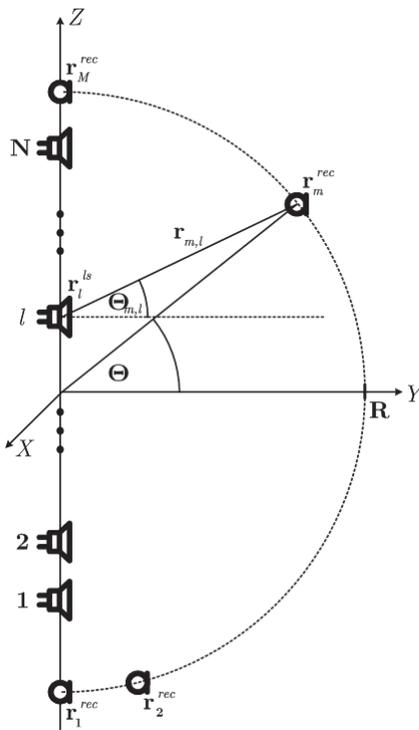
Bei kleinen Hörabständen wird Ungleichung (2) jedoch nur noch von kurzen Zeilen erfüllt und die Ungleichungen (3) bzw. (4) schränken den gültigen Frequenzbereich sehr stark ein. Werden die Relationssymbole in den Ungleichungen (3) bzw. (4) durch  $\gg$  ersetzt und damit etwas größere Phasenunterschiede zugelassen, erweitert sich der gültige Frequenzbereich. Für Betrachtungen in einem breiten Audiofrequenzbereich bleibt die Leistungsfähigkeit der Modellierung der Zeilerichtcharakteristik mit Gleichung (1) bei kleinen Hörabständen jedoch trotzdem unzureichend. Dafür ist eine komplexere Nahfeldmodellierung erforderlich.

#### Richtcharakteristik im Nahfeld

Im Nahfeld der Lautsprecherzeile muss der Einfluss der einzelnen Lautsprecherpositionen auf Amplitude und Phase des resultierenden Schalldrucks berücksichtigt werden. Dazu ist zunächst ein beliebiges Gebiet diskreter Hörpositionen einzuführen, wie es in Abbildung 1 verdeutlicht ist.

In jeder dieser Positionen müssen nun die komplexen Schalldruckübertragungsfunktionen  $\underline{H}_{m,l}(\mathbf{r}_{m,l}, \theta_{m,l}, f)$  der einzelnen Lautsprecher der Zeile überlagert werden. Der Schalldruck  $p(\mathbf{r}_m^{\text{rec}}, f)$  in einer diskreten Hörposition ist damit gegeben durch:

$$p(\mathbf{r}_m^{\text{rec}}, f) = \sum_{l=1}^N \underline{W}_l(f) \underline{H}_{m,l}(\mathbf{r}_{m,l}, \theta_{m,l}, f) \quad (5)$$



**Abbildung 1:** Geometrische Zusammenhänge bei der Modellierung der Richtcharakteristik von Lautsprecherzeilen im Nahfeld. (In Anlehnung an Start et al. [2].)

Der Faktor  $\underline{W}_l(f)$  ermöglicht dabei die zusätzliche frequenzabhängige Gewichtung eines jeden Lautsprecher-signals. Die einzelnen Lautsprecher sollen zunächst als Monopolquellen approximiert werden. Dies ist möglich solange folgende Bedingungen eingehalten werden:

- Der Lautsprecher ist in ein geschlossenes Gehäuse eingebaut [1]
- Die Lautsprecherdimensionen sind klein im Vergleich zur abgestrahlten Wellenlänge [1]
- Die Hörposition liegt im Fernfeld eines einzelnen Lautsprechers [3]:

$$kR \gg 1 \quad , \text{ mit Wellenzahl } k \quad (6)$$

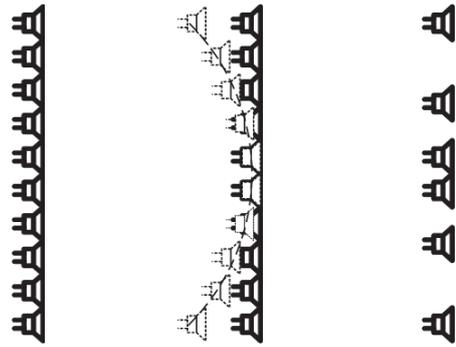
Damit gilt für die Zeilenlautsprecher [3]:

$$\underline{H}_{m,l}(\mathbf{r}_{m,l}, \theta_{m,l}, f) = j2\pi f v R_{SP} \cdot \frac{e^{-jk|\mathbf{r}_{m,l}|}}{|\mathbf{r}_{m,l}|} \quad , \quad (7)$$

wobei  $v$  die Schnelle der Lautsprechermembran und  $R_{SP}$  den Lautsprecherradius kennzeichnet. Neben der theoretischen Approximation kann  $\underline{H}_{m,l}(\mathbf{r}_{m,l}, \theta_{m,l}, f)$  natürlich auch vor der Nahfeldmodellierung der Zeilenrichtcharakteristik gemessen werden.

## Zeilenanordnungen im Nahfeld

In Anlehnung an die Fernfeldmodellierung, beschreibt ein Halbkreis mit Radius  $R$  das Gebiet der Hörpositionen für die folgenden Simulationen. Die resultierenden Isobarendiagramme zeigen die Verteilung der Schalldruckpegel



**Abbildung 2:** Schematische Darstellung der zum Vergleich ausgewählten Zeilenanordnungen: Äquidistante Lautsprecherzeile; Äquidistante, virtuell gekrümmte Lautsprecherzeile; Exponentiell gestufte Lautsprecherzeile. (v. l. n. r.)

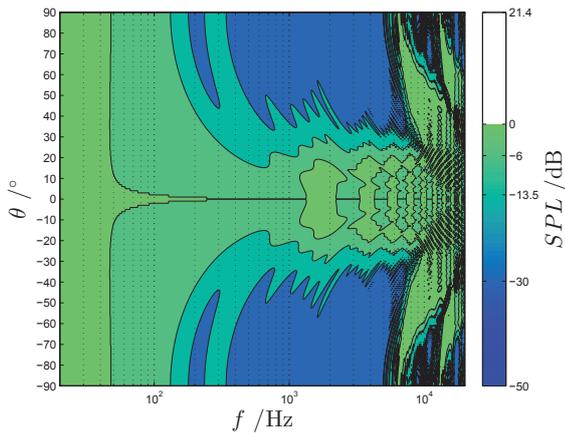
(SPL) in den diskreten Hörpositionen für den gesamten Audiofrequenzbereich ( $f \in [20 \text{ Hz}, 20 \text{ kHz}]$ ). Die Bestimmung der SPL-Werte erfolgt in Bezug auf den Schalldruck der Zeilenhauptachse (Senkrecht zur Mitte der Zeile, bei  $\theta = 0^\circ$ ):

$$SPL = 20 \log_{10} \left( \frac{|p(\theta, f, R = \text{const})|}{|p(0^\circ, f, R = \text{const})|} \right) \quad (8)$$

In Anlehnung an Keele [4] bzw. Start et al. [5] werden folgende, in Abbildung 2 schematisch dargestellte, Zeilenanordnungen verglichen:

- äquidistante Lautsprecherzeile
- äquidistante, virtuell gekrümmte Lautsprecherzeile
- exponentiell gestufte Lautsprecherzeile

Vor der separaten Betrachtungen der einzelnen Anordnungen, zeigt erster Blick auf die Abbildungen 3 bis 5 bereits die grundlegenden Eigenschaften in der Richtwirkung von Lautsprecherzeilen. Eine Zeile mit einer bestimmten Länge kann Schall nur oberhalb einer unteren Grenzfrequenz  $f_u$  bündeln. Die zugehörigen Wellenlängen müssen klein gegenüber der Zeilenlänge sein. Mit wachsender Frequenz erscheint ein Hauptkeulenbereich im Gebiet um die Zeilenhauptachse. Dieser ist zu größeren Winkeln  $\theta$  durch Nebenkeulenbereiche mit geringerem Schalldruckpegel begrenzt. Wird eine obere Grenzfrequenz  $f_o$  überschritten, erscheinen neue Hauptkeulen im Bereich der äußeren Winkel  $\theta$ , die sich mit steigender Frequenz in die Richtcharakteristik eindrehen. Dieses Phänomen wird als Spatial Aliasing bezeichnet. Verschiedene Abbildungen lassen außerdem Bereiche außerhalb der Hauptkeule erkennen, die SPL-Werte von mehr als 0 dB aufweisen. Derartige Pegelüberhöhungen treten jedoch hauptsächlich außerhalb des Bündelungsfrequenzbereiches ( $f \in [f_u, f_o]$ ) auf. Um breites Feld von Anwendungen abzudecken, erfolgt die Diskussion der verschiedenen Anordnungen im Folgenden anhand allgemeiner Qualitätsmerkmale, wie sie zum Teil von Keele [4] vorgeschlagen werden:



**Abbildung 3:** Richtcharakteristik einer äquidistanten Lautsprecherzeile in einem Hörabstand von  $R = 2$  m.

- Zeilenlänge  $l$ , Lautsprecheranzahl  $N$ , Lautsprecherabstand  $d$  (gemessen zwischen den Lautsprechermitelpunkten)
- Hauptkeulenbreite  $HB$  (Bereich um die Zeilenhauptachse mit weniger als 6 dB SPL-Dämpfung) und ihre Frequenzabhängigkeit
- SPL-Dämpfung  $ND$  der Nebenkeulenbereiche im Vergleich zur Hauptkeule
- Stabilität des Frequenzgangs  $FG$  im Hauptkeulenbereich
- Pegelüberhöhung  $PU$  innerhalb der Zeilenrichtcharakteristik

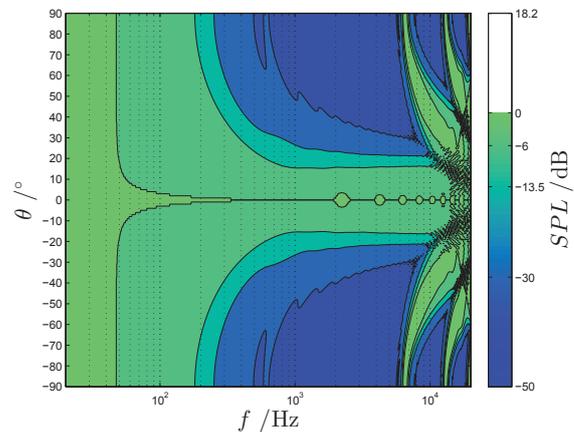
### Äquidistante Lautsprecherzeile

Die betrachtete Zeile besteht aus  $N = 32$  Lautsprechern mit einem Radius  $R_{SP} = 0,05$  m, die direkt nebeneinander ( $d = 2R_{SP}$ ) angebracht sind. Damit ergibt sich eine Zeilenlänge von  $l = 1,6$  m. Es erfolgt keine zusätzliche Ansteuerungsgewichtung, d.h. alle Wandler werden mit dem gleichen Signal versorgt. Abbildung 3 zeigt die resultierende Richtcharakteristik in einem Hörabstand von  $R = 2$  m. Es ist eine deutliche Frequenzabhängigkeit der  $HB$  innerhalb des Bündelungsfrequenzbereiches zu erkennen. Weiterhin erreicht die  $ND$  nur ein Maximum von 30 dB. Untersuchungen mit einem weiteren Hörabstand  $R = 5$  m zeigen, dass  $HB$  mit steigendem Hörabstand sinkt und ihre Frequenzabhängigkeit zurück geht. Ebenso erscheinen kleine Bereiche mit einer maximalen  $ND$  von 50 dB. Für beide Hörabstände ist  $FG$  stark instabil. Weiterhin tritt bei dieser Zeilenanordnung eine deutliche  $PU$  auf. Diese sinkt jedoch mit wachsendem Hörabstand und verschwindet im Fernfeld der Zeile völlig.

### Äquidistante, virtuell gekrümmte Lautsprecherzeile

Keele führte in [6] eine gekrümmte, äquidistante Zeilenanordnung ein, die innerhalb ihres Bündelungsfrequenzbereiches eine einheitlichere  $HB$

aufweist. Dazu ist eine frequenzunabhängige Ansteuerungsgewichtung erforderlich, die approximierten Legendre-Funktionen folgt und die Lautsprechersignale symmetrisch zu den Zeilenaußenseiten dämpft. Später [4] zeigte er, dass die Krümmung ohne einen deutlichen Verlust an Leistungsfähigkeit auch virtuell, d. h. durch Zeitverzögerung der Lautsprechersignale einer geraden Zeile erfolgen kann. Abbildung 4 zeigt die resultierende Richtcharakteristik in einem Hörabstand von  $R = 2$  m, wenn die beschriebene Ansteuerungsgewichtung auf die im letzten Abschnitt vorgestellte Zeilenanordnung angewendet wird. Es ist zu erkennen, dass sich die Frequenzabhängigkeit der  $HB$  deutlich reduziert. Ebenso ist der  $FG$  deutlich stabiler. Weiterhin treten größere Bereiche mit einer  $ND$  von mehr als 30 dB auf. Untersuchungen mit einem weiteren Hörabstand  $R = 5$  m zeigen erneut, dass die Bündelungsfähigkeit mit wachsendem Hörabstand steigt. Auch bei dieser Zeilenanordnung tritt eine deutliche  $PU$  auf. Sie ist jedoch geringer als im Fall ohne Ansteuerungsgewichtung und fällt mit wachsendem Hörabstand schneller ab.

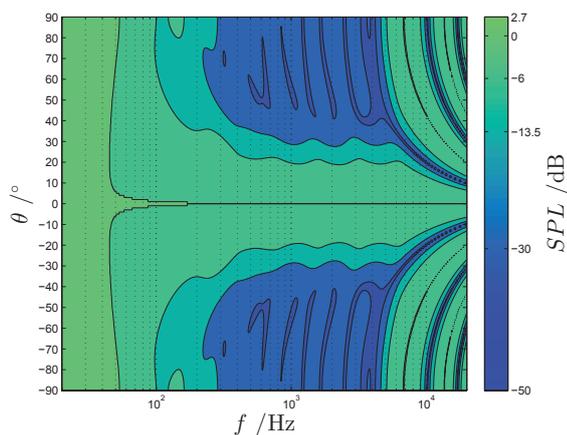


**Abbildung 4:** Richtcharakteristik einer äquidistanten, virtuell gekrümmten Lautsprecherzeile in einem Hörabstand von  $R = 2$  m.

### Exponentiell gestufte Lautsprecherzeile

Die volle Länge der Zeile ist nur für Bündelung von Schall im Frequenzbereich um  $f_u$  erforderlich. Mit wachsender Frequenz verringert sie die  $HB$  und verursacht zunehmend Nebenkeulen. Ähnliche Zusammenhänge gelten auch  $d$  und  $f_o$ . So ist ein geringer Lautsprecherabstand nur für Bündelung von Schall im Frequenzbereich um  $f_o$  erforderlich. Start et al. [2] führten deshalb eine Zeilenstruktur ein, in der nur ein geringer Teil  $n$  der  $N$  Lautsprecher äquidistant mit  $d$  in der Mitte angeordnet ist. In Abhängigkeit von  $n$  und  $d$  erhöht sich der Abstand der verbleibenden Lautsprecher exponentiell zu den Zeilenaußenseiten. Die Frequenzabhängigkeit der erforderlichen Zeilenlänge wird dabei durch eine ebenfalls von  $n$  und  $d$  abhängige Ansteuerungsgewichtung berücksichtigt. Sie verkürzt den aktiven Teil der Zeile zu hohen Frequenzen, indem die Lautsprechersignale symmetrisch zu den Zeilenaußenseiten gedämpft werden. Abbildung 5 zeigt die Richtcharakteristik einer entsprechend

gewichteten exponentiellen Zeilenanordnung mit  $N = 12$  (bzw.  $n = 4$ ) Lautsprechern und einer Gesamtlänge von  $l = 2,45$  m in einem Hörabstand von  $R = 2$  m. Im Vergleich zu den vorangegangenen Anordnungen ist die  $HB$  im Bündlungsfrequenzbereich wesentlich weniger frequenzabhängig und der  $FG$  deutlich stabiler. Ebenso ist der Einfluss des Hörabstandes auf  $HB$  und  $FG$  geringer, wie Untersuchungen mit einem weiteren Hörabstand  $R = 5$  m zeigen. Weiterhin ist die  $PU$  für  $R = 2$  m kaum ausgeprägt und verschwindet für  $R = 5$  m bereits völlig. Betrachtet man die  $ND$ , so treten jedoch nur geringe Bereiche mit einem Maximum von 50 dB auf. Exponentiell gestufte Zeilen mit einer geringfügig größeren Anzahl äquidistant positionierter Lautsprecher reduzieren die verbleibende Frequenzabhängigkeit von  $HB$  weiter und weisen bessere Bündelungseigenschaften auf. Die Länge solcher Anordnungen übersteigt jedoch schnell die typischen Hörabstände im Nahfeld. Aus diesem Grund schlagen Start et al. [2] auch asymmetrische exponentiell gestufte Lautsprecherzeilen vor, die eine Halbierung der Zeilenlänge ohne eine wesentliche Verringerung der Leistungsfähigkeit ermöglichen.



**Abbildung 5:** Richtcharakteristik einer exponentiell gestuften Lautsprecherzeile in einem Hörabstand von  $R = 2$  m.

## Ansteuerung der Zeilen

Bis auf wenige Anwendungsfälle, in denen Symmetriebeziehungen ausgenutzt werden können, muss bei der Ansteuerung der Zeile ein separater Kanal für jeden Lautsprecher vorgesehen werden. Insbesondere dann, wenn die resultierenden Richteigenschaften zusätzlich mittels Beamsteering geschwenkt werden sollen. Die moderne DSP- und Verstärkertechnologie bietet dafür mittlerweile grundsätzlich genügend Potential. Betrachtet man aber Energie-, Leistungs- oder Kostenaufwand als zusätzliches Qualitätsmerkmal, können Zeilen mit einer hohen Lautsprecheranzahl und einer entsprechend aufwendigen Ansteuerungsgewichtung dennoch ineffizient werden. Besonders im Hinblick auf Echtzeitanforderungen.

## Zusammenfassung

Die Leistungsfähigkeit von äquidistanten Lautsprecherzeilen ohne zusätzliche Ansteuerungsgewichtung ist für

die meisten Anwendungen im Nahfeld wohl nicht ausreichend. Der Hörabstand hat einen starken Einfluss auf die Richtcharakteristik, die Hauptkeulenbreite ist selbst innerhalb des Bündlungsfrequenzbereiches deutlich frequenzabhängig und die erreichbaren Nebenkeulendämpfungen sind mäßig. Bereits eine einfache zusätzliche Ansteuerungsgewichtung, wie sie am Beispiel der virtuell gekrümmten Zeile nach Keele [6] vorgestellt wurde, verbessert die Leistungsfähigkeit deutlich. Es bestehen wesentlich geringere Frequenzabhängigkeiten und die erreichbaren Nebenkeulendämpfungen sind höher. Exponentiell gestufte Lautsprecherzeilen zeigen im durchgeführten Vergleich jedoch die insgesamt größte Leistungsfähigkeit. Derartige Anordnungen reduzieren sowohl die bemängelten Frequenz- als auch die Hörabstandsabhängigkeiten. Zudem ist die Anzahl der benötigten Wandler vergleichsweise gering. Die erreichbare Verbesserung der Bündlungsleistung dieser verhältnismäßig langen Zeilenanordnungen ist zunächst nur moderat. Sie kann aber durch asymmetrische exponentiell gestufte Anordnungen weiter gesteigert werden wodurch sich außerdem die resultierende Zeilenlänge verringert. Auch im asymmetrischen Fall übersteigt die resultierende Zeilenlänge jedoch die Länge einer äquidistanten Zeile mit vergleichbarem Bündlungsfrequenzbereich. Mit dem Ziel die Vorteile der vorgestellten Zeilenanordnungen zu vereinen, werden in modernen Lautsprecherzeilen für Nahfeldanwendungen meist mehrere sogenannte Subarrays kombiniert und deren Ansteuerungsgewichtung aufwendig optimiert. Bei der Formulierung entsprechender Vorgaben und Randbedingungen zur Optimierung bestehen jedoch zahlreiche Freiheitsgrade. Diesbezüglich widmet sich der der Lehrstuhl Kommunikationsakustik in weiterführenden Untersuchungen der Entwicklung wahrnehmungsbasierter Ansätze.

## Literatur

- [1] MÖSER, M.: *Technische Akustik*. Springer Verlag, Berlin, 2005
- [2] VAN BEUNINGEN, G.W.J. ; START, E.W.: Optimizing Directivity Properties of DSP controlled Loudspeaker Arrays. In: *Reproduced Sound 16 Conference, Statford (UK)*, 2000
- [3] KÖLTZSCH, P. ; PFEIFFER, G.: *Vorlesung Akustik*. Technische Universität Dresden, 2009
- [4] KEELE JR., D. B.: A Performance Ranking of Seven Different Types of Loudspeaker Line Arrays. In: *Audio Engineering Society Convention 129*, 2010
- [5] VAN DER VAL, M. ; START, E.W. ; DE VRIES., D.: Design of Logarithmically Spaced Constant Directivity Transducer Arrays. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 44 (1996), June, Nr. 6, S. 497–507
- [6] KEELE JR., D.B.: The Application of Broadband Constant Beamwidth Transducer (CBT) Theory to Loudspeaker Arrays. In: *Audio Engineering Society Convention 109*, 2000