

Vergleich von numerischen Lautsprechermodellen zur Simulation der Richtcharakteristik von linearen Lautsprecherarrays

Friedrich Beyer, Tom Wühle, Sebastian Merchel, M. Ercan Altinsoy

Institut für Akustik und Sprachkommunikation, Lehrstuhl für Akustik und Haptik, TU Dresden

Email: friedrich.beyer@tu-dresden.de, tom.wuehle@tu-dresden.de, sebastian.merchel@tu-dresden.de

Einleitung

In vielen Anwendungsfeldern der Akustik sollen Lautsprecher den Schall stark gerichtet abstrahlen. Beispielsweise sollen Beschallungsanlagen bei Live-Konzerten ausschließlich Bereiche vor und nicht hinter der Bühne mit Schall versorgen. Um diese Aufgabe zu realisieren, können lineare Lautsprecherarrays verwendet werden. Diese ermöglichen eine starke Bündelung des Schalls über einen gewissen Frequenzbereich. Zudem ist das Schallbündel hierbei mit geringem Aufwand elektronisch schwenkbar. Der Frequenzbereich in dem Arrays Schall bündeln können, hängt dabei grundlegend von Anzahl und Anordnung der Quellen ab.

Simulationsmodelle von Lautsprechern

Monopol-Modell

Da der Bau eines Arrays, aufgrund der (zumeist) großen Anzahl von Lautsprechern, aufwendig und teuer ist, ist es sinnvoll, die akustischen Eigenschaften von Arrays vorab zu simulieren. Dazu werden die einzelnen Quellen zumeist durch Monopolmodelle beschrieben (z. B. [1]). Bei diesen Schallquellen handelt es sich um ideale Punktschallquellen, die den Schall in alle Richtungen gleichermaßen abstrahlen. Der Schalldruck an einem beliebigen Punkt im Raum außerhalb der Quelle kann laut [2] für harmonische Signale wie folgt berechnet werden:

$$p(r) = \frac{A}{r} e^{jkr} \quad (1)$$

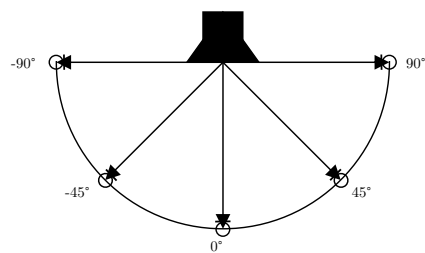
Dabei ist $p(r)$ der komplexe Schalldruck im Abstand r , A eine beliebige Amplitudenfunktion, j die imaginäre Einheit und k die Wellenzahl. Die Zeitabhängigkeit wurde hier aufgrund der Annahme harmonischer Signale weggelassen, sodass nur die komplexen Amplituden der reinen Töne betrachtet werden. [2]

Monopolmodelle sind offensichtlich sehr einfache Modelle, die bei der Berechnung sehr geringe Systemressourcen benötigen. Mit ihnen lassen sich dennoch gute Vorhersagen über den Einfluss der Geometrie eines Arrays auf die Verteilung von sich ausbildenden Haupt- und Nebenkeulen machen.

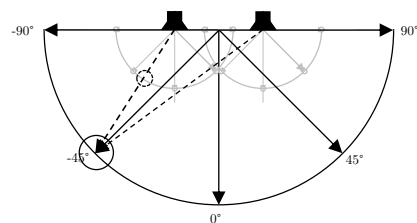
Reale Lautsprecher strahlen im Allgemeinen jedoch nicht in alle Richtungen gleichmäßig ab, sondern weisen richtungsabhängige Frequenzgänge auf. Um akkurate Vorhersagen über das Verhalten eines Arrays mit realen Lautsprechern zu machen, müssen daher Modelle verwendet werden, die die einzelnen Lautsprecher genauer charakterisieren.

Modelle realer Quellen / Empirisches Modell

Um das Monopolmodell zu erweitern, könnte für die allseitige Abstrahlung der Hauptachsenfrequenzgang des Lautsprechers eingesetzt werden. Somit entsteht eine Quelle, die den Schall in alle Richtungen mit dem Frequenzgang eines Lautsprechers auf Hauptachse abstrahlt. Da reale Lautsprecher jedoch, im Gegensatz dazu, eine winkelabhängige Richtcharakteristik aufweisen, müssen die Frequenzgänge für eine Vielzahl von Winkeln aufgenommen werden, um die Realität genauer abzubilden. Dazu eignen sich Polarmessungen, bei denen Frequenzgangmessungen in konstantem Abstand in einer Ebene rund um den Lautsprecher durchgeführt werden. Diese Messpunkte können dann in der Simulation mit dem Monopolmodell richtungsabhängig überlagert werden.



(a) Schematische Darstellung der Messpunkte einer (halben) Polarmessung eines Lautsprechers mit 45°-Raster und konstantem Messabstand.



(b) Schematische Darstellung der Messpunkte einer (halben) Polarmessung eines Arrays mit 2 Quellen.

Abbildung 1: Darstellung des Interpolationsproblems bei der Simulation von Arrays. Offensichtlich existieren für beide Lautsprecher (aus (a)) beim zu ermittelnden Winkel in (b) (großer Kreis) keine Messpunkte (kleiner Kreis).

Der Nachteil dieses Modells ist die geringe Genauigkeit, die durch die begrenzte Winkelauflösung und den konstanten Messradius beschränkt ist. Wie Abbildungen 1(a) und 1(b) verdeutlichen, müssen die Messpunkte für fehlende Winkel und Abstände interpoliert werden, was auf gewissen Annahmen zur entfernungsabhängigen

Pegeländerung, sowie zur Mittelwertbildung richtungsabhängiger Frequenzgänge beruht. Da es sich bei realen Lautsprechern nicht um homogen kugelförmig abstrahlende Quellen handelt, kann zum einen die entfernungsabhängige Schalldruckdämpfung nur ungenau durch das Abstandsgesetz ($1/r$ -Gesetz) bestimmt werden. Zum anderen sind bei der Mittelung von Frequenzgängen wegen der inhomogenen Abstrahlung große Simulationsfehler zu erwarten.

Um genaue Modelle mit dieser Methode zu erhalten, ist es nötig, die Messungen mit sehr hoher Winkelauflösung durchzuführen und sie für verschiedene Abstände zu wiederholen, was jedoch große Datenmengen zur Folge hat.

Spherical Wave Expansion-Modell

Deutlich kompaktere Modelle lassen sich durch analytische und numerische Modelle realisieren. Ein Beispiel für ein analytisches Modell mit idealisierten Kolbenmembranlautsprechern ist z. B. in [4] beschrieben. Als numerisches Modell für beliebige Lautsprecher eignet sich das *Kugelwellenausbreitungsmodell* oder engl. *Spherical Wave Expansion-Modell* (kurz: *SWE*).

In [5] wird das Modell als Übertragungsfunktion $H(f, \mathbf{r}_E) = P(f)/U(f)$ zwischen dem Eingangssignal $U(f)$ des Lautsprechers und dem Schalldruck $P(f)$ am Simulationspunkt \mathbf{r}_E in Abhängigkeit der Frequenz f definiert. \mathbf{r}_E ist dabei der Vektor vom Mittelpunkt des Modells zum Simulationsort. Diese Übertragungsfunktion kann laut [5] mithilfe von Kugelflächenfunktionen gebildet und mit einer Koeffizientenmatrix parametrisiert werden. Der große Vorteil eines solchen Modells ist, dass ein sehr detailreiches universelles Modell der realen Quelle entsteht, welches unabhängig vom Simulationspunkt (im 3D-Raum) Ergebnisse gleicher Genauigkeit liefert. Die Genauigkeit ist hierbei durch die endliche Ordnung des Modells begrenzt.

Mithilfe des *Klippel Near Field Scanner*-Systems (kurz: *NFS*)[6] lassen sich die Schalldrücke auf einer Hüllfläche um eine reale Schallquelle automatisiert messen. Mit den Messergebnissen kann die zugehörige Software die Koeffizientenmatrix berechnen. Die damit gebildeten *SWE*-Modelle können anschließend in Simulationen verwendet werden und werden im Folgenden Monopol-Modellen gegenübergestellt.

Vergleich von Monopol- und SWE-Modellen

In Abbildung 2 sind die Frequenzgänge für ein Monopolmodell (grau) und ein *SWE*-Modell (schwarz) jeweils für Simulationspunkte bei 0° , 45° und 90° (vgl. a. Abb. 1(a)) in der Horizontalebene in 5 m Entfernung abgebildet. Das *SWE*-Modell bildet dabei einen *Tang-Band W2-800SL*-Lautsprecher ab, der in einer Schallwand gemessen wurde. Der zu erwartende Fehler des Modells liegt im dargestellten Frequenzbereich zwischen 120 Hz und 17 kHz bei unter 1%. Die Amplitude des Monopols wurde so gewählt, dass sie bei 1 kHz den gleichen Schalldruck erzeugt, wie das *SWE*-Modell.

Offensichtlich liefert das Monopolmodell an allen Stellen einen über den gesamten Frequenzbereich konstanten Schalldruck. Im Vergleich dazu ist der Frequenzgang des *SWE*-Modells nicht konstant, sondern fällt bei Frequenzen unterhalb von 400 Hz stark ab. Des Wei-

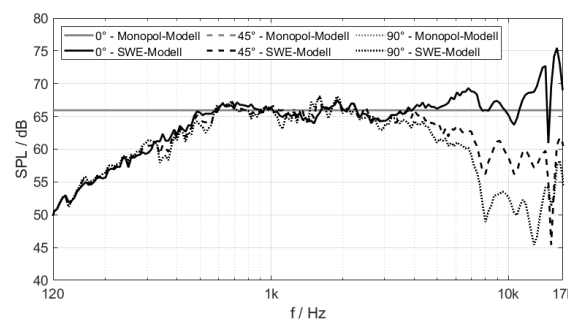


Abbildung 2: Frequenzgänge bei 0° , 45° und 90° eines Monopol-Modells (grau) und eines *SWE*-Modells (schwarz) im Abstand von 5 m. Im dargestellten Frequenzbereich liegt der *SWE*-Modellfehler bei unter 1%. Die Amplitude des Monopol-Modells wurde so gewählt, dass die Empfindlichkeit bei 1 kHz mit der des *SWE*-Modells übereinstimmt. Die 3 Frequenzgänge des Monopols sind identisch.

teren ist gut erkennbar, dass die Frequenzgänge dieses Modell bis ca. 3 kHz in allen drei Richtungen nahezu identisch sind, zu höheren Frequenzen jedoch starke richtungsabhängige Unterschiede aufweisen. Dabei fallen sie an den Seiten stärker ab als auf Hauptachse. Es kann somit geschlossen werden, dass der Lautsprecher bis 3 kHz durch ein hochpassgefiltertes Monopolmodell gut repräsentiert wird. Für Aussagen zum Verhalten bei höheren Frequenzen sollte jedoch auf komplexere Modelle zurückgegriffen werden, um realitätsnahe Simulationsergebnisse zu erhalten.

Anwendung der Modelle in Arraysimulationen

Der Hauptzweck eines Arrays ist es, den Schall zu bündeln. Um die Bündelungseigenschaften in bestimmten Richtungen darzustellen, wird im Folgenden das Richtwirkungsmaß verwendet (vgl. [7]):

$$G = 20 \log_{10} \Gamma^* \text{ dB} \quad (2)$$

Dabei ist Γ^* der statistische Richtfaktor, der laut [7] „[...] das Verhältnis des Schalldruckes in einer bestimmten Richtung zum Mittelwert des Schalldruckes über alle Abstrahlrichtungen, bei jeweils gleichem Aufpunktstand [ist].“

Für Winkelbereiche in denen der Schalldruck größer als der mittlere Schalldruck aller Messpunkte ist, wird das Richtwirkungsmaß positiv, für Bereiche in denen der Schalldruck geringer als das Mittel ist, wird es negativ. In der Annahme, dass die Quellen rotationssymmetrisch zur Hauptachse sind, ist das Richtwirkungsmaß für einen Punkt nur vom Winkel zur Hauptachse und dem Abstand zur Quelle abhängig, womit die Abhängigkeit von θ entfallen kann.

Das Richtverhalten eines Arrays ergibt sich durch die Überlagerung der Schallwellen, die von den einzelnen Quellen ausgestrahlt werden. Die Quellen sind dabei in den meisten Fällen nach vorne ausgerichtet. Strahlen die einzelnen Lautsprecher nur wenig Schall zu den Seiten ab, kann somit auch das gesamte Array nur wenig Schall in diesen Richtungen abgeben. Dieses Verhalten ist somit dann kritisch, wenn ein Schallbündel zur Seite abge-

strahlt werden soll (*Steering*), da so in die beabsichtigte Richtung weniger Schallenergie abgegeben wird als in andere Richtungen.

Um den Einfluss der realen Lautsprecher auf das Verhalten von Arrays zu untersuchen, wurden zwei identische lineare Arrays (16 Lautsprecher, Abstand zwischen den Quellen 60 mm) jeweils mit Monopol- und *SWE*-Modellen (*Tang-Band W2-800SL*) simuliert. Abbildung 3(a) zeigt die Richtwirkungsmaße über der Frequenz für beide Varianten bei 0° und 45°. Hierbei ist die Hauptkeule nach vorne gerichtet. Abbildung 3(b) zeigt das gleiche Bild für den Fall, dass die Hauptkeule 45° zur Seite ausgelenkt wurde. Dabei ist zu erkennen, dass das Richtwirkungsmaß in der ersten Abbildung für beide Modelle bei 0° und in der zweiten bei 45° besonders groß ist. In 3(a) wird deutlich, dass das 0°-Richtwirkungsmaß für das Array mit *SWE*-Modellen erst bei höheren Frequenzen und nicht so stark einbricht. Das resultiert aus der Richtcharakteristik der einzelnen Lautsprecher, die den Schall verstärkt nach vorne abgeben. Aus den Abbildungen ist zudem jeweils die Position der ersten Gitterkeule ablesbar. Gitterkeulen haben (nahezu) die gleiche Amplitude wie die Hauptkeule und entstehen, wenn die abzustrahlende Wellenlänge kleiner oder gleich dem Abstand der Quellen im Array ist (*Spatial Aliasing*). Die erste Gitterkeule tritt in 45°-Richtung bei ca. 8 kHz auf. Werden die hier betrachteten Richtungen als zwei getrennte akustische Kanäle angesehen, was z. B. bei Schallprojektionsanwendungen sinnvoll ist, kann die Differenz der Richtwirkungsmaße als Störabstand zwischen diesen Kanälen definiert werden. Diese Differenz ist hierbei für einen großen Frequenzbereich größer als 15 dB. Bei 8 kHz bricht sie jedoch für das *SWE*-Modell auf ca. 10 dB ein. Für Monopolmodelle beträgt sie bei dieser Frequenz ca. 5 dB.

Im ausgelenkten Fall (3(b)) ist offensichtlich das Richtwirkungsmaß bei 45° für nahezu alle Frequenzen größer als auf Hauptachse. Allerdings fällt das 45°-Richtwirkungsmaß in diesem Fall für das Array mit *SWE*-Quellen zu hohen Frequenzen deutlich stärker ab als mit Monopolquellen, da die einzelnen Quellen wenig Energie in die gewünschte und viel Energie in die unerwünschten Richtungen abstrahlen. Die Gitterkeule überragt in diesem Fall sogar die Hauptkeule.

Im Fernfeld kann ein Array mit realen Quellen offensichtlich als eine Überlagerung der Richtcharakteristik eines Monopolarrays und der Richtcharakteristik eines Einzelauslautsprechers interpretiert werden (vgl. [3]). Das bedeutet, dass die Richtcharakteristik des Arrays mit Monopol-Modellen, addiert mit der Richtcharakteristik eines einzelnen Lautsprechers, der Richtcharakteristik des Arrays mit *SWE*-Modellen dieses Lautsprechers gleicht.

Optimierungsmöglichkeiten für seitliche Abstrahlung mit realen Quellen

Verdrehen der Lautsprecher

Wie zuvor gezeigt, sind Arrays mit nach vorne orientierten realen Quellen, aufgrund deren Richtcharakteristik, vor allem für die Bündelung des Schalls entlang der Hauptachse geeignet. Soll die Hauptkeule dagegen zu den Seiten ausgelenkt werden, wirkt sich die Richtcharakteristik

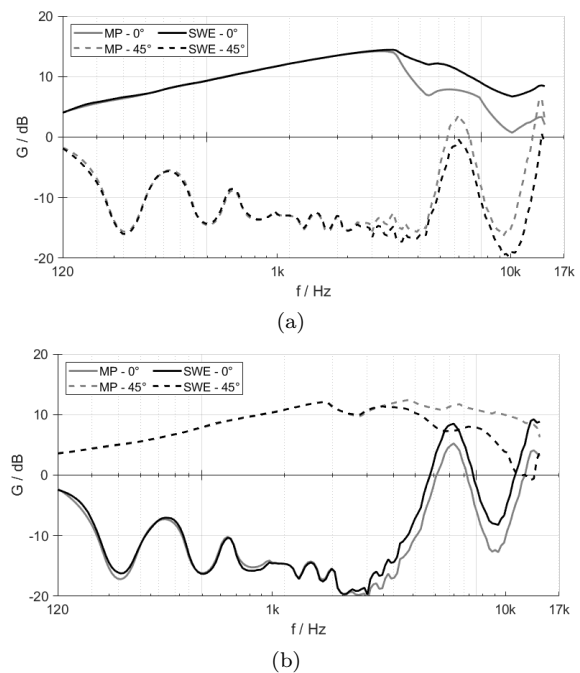


Abbildung 3: Richtwirkungsmaße bei 0° und 45° für Arrays mit unterschiedlichen Quellenmodellen (Monopol-Modell (grau) und *SWE*-Modell (schwarz)). Die Hauptkeule wird in (a) in Richtung der Hauptachse abgestrahlt und in (b) 45° zur Seite.

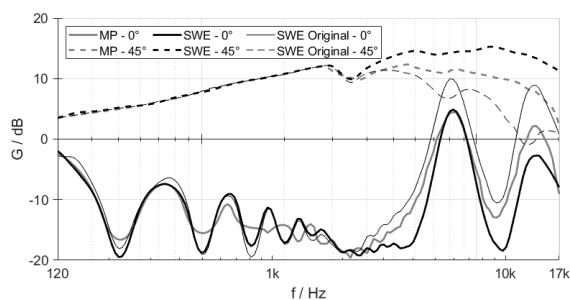
istik der Lautsprecher negativ aus. Da das unabhängig von der Arraygeometrie ist, wird im Folgenden die direkte Beeinflussung des Richtverhaltens der einzelnen Quellen betrachtet.

Um die Vorzugsrichtung der Lautsprecher auszunutzen, werden die Lautsprecher zunächst im Array in die gewünschte Hauptkeulenrichtung gedreht angeordnet. Abbildung 4(a) zeigt die Ergebnisse einer Simulation des gleichen Arrays wie zuvor, jedoch mit um 45° gedrehten Quellen. Dadurch lässt sich das Richtwirkungsmaß bei 45° vor allem für hohen Frequenzen gegenüber der Ausgangslage deutlich erhöhen. Zusätzlich wird das Richtwirkungsmaß auf der Hauptachse abgesenkt. Die erste Gitterkeule auf Hauptachse tritt auch hier bei 8 kHz aber in abgeschwächter Form auf. Die Differenz zwischen dem gewünschten Kanal (45°) und dem unerwünschten Kanal (0°) liegt hier bei ca. 10 dB, was einer Verbesserung von ca. 15 dB gegenüber der nicht-gedrehten Variante entspricht.

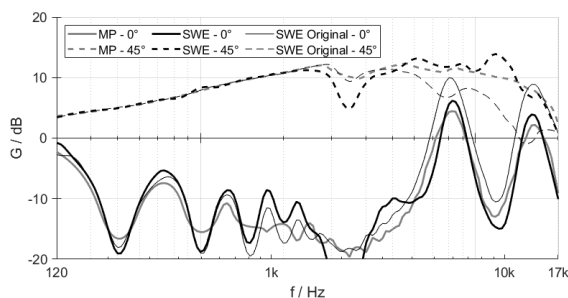
Damit lässt sich zeigen, dass das Drehen der Lautsprecher für die Abstrahlung des Schalls in diese Richtung vorteilhaft ist. Sollen jedoch verschiedene Richtungen mit einem Array beschallt werden, ist das Drehen der Lautsprecher bzw. des gesamten Arrays nachteilig. Wenn beispielsweise zwei Kanäle, links und rechts, erzeugt werden sollen und alle einzelnen Lautsprecher nach links gedreht werden, verbessert sich das Richtwirkungsmaß nur in dieser Richtung. In der gegenüberliegenden Richtung verschlechtert es sich dagegen stark.

Abschattungsobjekte und Reflektoren

Um ohne Drehung der Lautsprecher eine Verbesserung des Richtwirkungsmaßes bei gewünschtem Winkel zu er-



(a) Einfluss von im Array verdrehten Quellen



(b) Einfluss von keilförmigen Reflektoren direkt vor den einzelnen Lautsprechern

Abbildung 4: Richtmaße für zwei Optimierungsansätze realer Arrays im Vergleich zur Ausgangslage (dünne schwarze Linie) und zum Monopolarray (grau).

reichen, wurden Ansätze mit Objekten entwickelt, die direkt vor dem Lautsprecher platziert wurden. Diese sollten den Schall der einzelnen Lautsprecher zum einen zur Seite reflektieren und zum anderen den nach vorne gerichteten Schallanteil abschwächen. Dazu wurden 3D-Druck-Objekte aus *PLA (Polylactic acid)* hergestellt. Abbildung 5 zeigt ein solches Objekt. In Kombination mit dem *Tang-Band W2-800SL*-Lautsprecher wurde dieses Objekt mit dem *NFS*-System vermessen und anschließend ein *SWE*-Modell erstellt. Dieses Modell wurde im gleichen Array wie zuvor simuliert. Das Richtwirkungsmaß ist für den Fall der Bündelung nach 45° in Abbildung 4(b) dargestellt. Der Reflektor kann das Richtwirkungsmaß bei

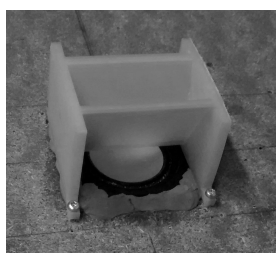


Abbildung 5: Bild des Reflektors im eingebauten Zustand, direkt vor dem Lautsprecher.

45° für hohe Frequenzen etwas anheben und im Vergleich zum Array mit nicht-gedrehten Lautsprechern verbessern. Im Vergleich zur Variante mit gedrehten Quellen verschlechtert sich jedoch die Abstrahlung bei hohen Frequenzen und die Kanaltrennung bei 8 kHz sinkt auf 5 dB.

Grundsätzlich hängt die Wirksamkeit des Reflektors stark von seiner Größe ab, die groß gegenüber der Wellenlänge der zu reflektierenden Welle sein muss. Jedoch ist es bei der Anwendung im Array nicht möglich, beliebige Größen zu verwenden, da der Reflektor eines Lautsprechers sich gleichzeitig im Ausbreitungsweg des benachbarten Lautsprechers befindet. Die verwendete Variante ist bereits ein Kompromiss aus Größe und Anwendbarkeit im Array.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden verschiedene Modelle zur Simulation von Lautsprechern verglichen. Dabei konnte gezeigt werden, dass Monopol-Modelle, bei geringem Rechenaufwand, den Einfluss der Geometrie auf das Richtverhalten eines Arrays gut darstellen. Allerdings bilden sie das Richtverhalten realer Lautsprecher bei hohen Frequenzen nicht ab, wofür es komplexerer Modelle bedarf. Ein sehr universelles Modell ist dabei das *SWE*-Modell, welches hier dem Monopol-Modell gegenübergestellt wurde.

Es zeigte sich, dass Arrays mit realen nach vorne gerichteten Quellen zu den Seiten gelenkte Hauptkeulen schlechter abstrahlen können, als Simulationen mit Monopol-Modellen das vermuten lassen.

Um mit diesen Arrays dennoch Schall zu den Seiten bündeln zu können, wurden zwei Optimierungsansätze vorgestellt, wobei zum einen die Lautsprechermodelle im Array verdreht und zum anderen Reflektorobjekte vor den einzelnen Lautsprechern platziert wurden. Dabei konnten die betrachteten Optimierungsansätze die simulierten Arrays hinsichtlich der Kanaltrennung gegenüber der Ausgangslage verbessern. Ihr Einfluss auf das Gesamtrichtverhalten des Arrays ist jedoch gegenüber geometrische Faktoren, wie Lautsprecherabstand und Arraylänge, gering.

Literatur

- [1] Keele, Jr.: The Application of Broadband Constant Beamwidth Transducer (CBT) Theory to Loudspeaker Arrays, AES 109th Convention (2000), 5216
- [2] Möser, M.: Technische Akustik, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2015
- [3] Baird, J. und Meyer, P.: The Analysis, Interaction, and Measurement of Loudspeaker Far-Field Polar Patterns, AES 106th Convention (1999), 4949 (Q4)
- [4] Meyer, D.: Computer Simulation of Loudspeaker Directivity, J. of Audio Eng. Soc., Vol. 32, No 5 (1984)
- [5] Klippel, W.: Holographic Nearfield Measurement of Loudspeaker Directivity, Dresden
- [6] Klippel GmbH: Near Field Scanner 3D (NFS), Spezifikationsdokument
- [7] Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V.: DEGA-Empfehlung 101, Berlin, 2006