

50. Jahrestagung
25. - 29. 9. 2000 Karl-
Franzens Universität
Graz



Jahrestagung der ÖPG
FA-Akustik

Physik-Event ÖPG 2000

gemeinsam mit
der Österreichischen Akustischen Gesellschaft (AAA)

Konzepte zur Schallfeldsynthese und Schallfeldreproduktion

Alois Sontacchi, Robert Höldrich
www.kug.ac.at/iem

Institut für Elektronische Musik und Akustik
Universität für Musik und Darstellende Kunst Graz

Zusammenfassung

Die Aufnahme und Wiedergabe im Stereoformat wird in naher Zukunft von Surround Sound Systemen abgelöst. Nicht nur für künstlerische Applikationen sondern, gerade auch im technischen Bereich werden sie ihre Verwendung finden. Die Anforderungen an Surround Systeme sind neben der Lokalisierungsschärfe Homogenität und Kohärenz d.h. alle Richtungen werden gleich behandelt und die Stabilität der Schallquellenposition durch Veränderung der Abhörposition bleibt wie im natürlichen Schallfeld gewährleistet. Ambisonic bietet eine Basis für die Schallfeldsynthese und -reproduktion, die diese Kriterien erfüllt. Bei diesem Ansatz wird die Richtungsabhängigkeit des natürlichen Schallfeldes in einem Set von sphärischen Harmonischen vektoriell kodiert. Mit einem Mikrofonarray und nachfolgender Signalverarbeitung werden die entsprechenden Komponenten aufbereitet (holophonischer Ansatz). Die Wiedergabe erfolgt über ein Lautsprecherarray, das bestimmte Anforderungen erfüllen muss, aber keine Einschränkung für die Aufnahme darstellt. Die aufgenommenen bzw. synthetisierten Signale können somit über „beliebige“ Lautsprecherarrays wiedergegeben werden. Die störenden Einflüsse des Wiedergaberaumes können durch die Filterung mit Ambisonic-kodierten Raumimpulsantworten kompensiert werden.

Im Folgenden werden Konzepte vorgestellt, die eine möglichst wirklichkeitsgetreue Wiedergabe bzw. Synthese von Schallfeldern über Lautsprecher ermöglichen. Dazu wird zuerst im Abschnitt 1 kurz auf die wesentlichen Unterschiede bei Lautsprechersystemen eingegangen. Im Abschnitt 2 werden der Ambisonic- und der Holophonie-Ansatz besprochen. Anschließend wird im Abschnitt 3 gezeigt, wie diese beiden Ansätze sinnvoll kombiniert werden können. Eine mögliche Systemerweiterung zur Kompensation des Wiedergaberaumes wird in Abschnitt 4 vorgestellt. Abschließend werden die wesentlichen Punkte zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche Anwendungen gegeben.

1 Einführung

Grundsätzlich kann man bei der Schallfeldreproduktion mittels Lautsprecher zwei Systemgruppen unterscheiden: transaurale und holophone Systeme [1]. Transaurale Systeme streben die originalgetreue Wiedergabe des Schalldrucks an den Ohren des Hörers an. Dabei wird auf die primären Lokalisationseigenschaften des Gehörs aufgebaut. Die Schallquellen werden so abgebildet, dass sie entweder aufgrund der unterschiedlichen interauralen Pegeldifferenzen (ILD), der interauralen Laufzeitdifferenzen (ITD), der spektralen Unterschiede oder deren Kombinationen (z.B. Kopfbezogene Übertragungsfunktionen, HRTFs) entsprechend geortet werden. Die Stabilität dieser Systeme ist bei der Wiedergabe mit Lautsprechern problematisch, da diese Systeme nur für einen sehr kleinen Bereich, dem sogenannten „sweet spot“, exakte Ergebnisse produzieren. Kleine Veränderung der Sitzposition oder Bewegungen des Kopfes führen zu einer sprunghaften Richtungsänderung. Holophone Systeme streben hingegen eine Reproduktion des originalen Schallfeldes in einem größeren Bereich (um den Hörer) an. Die Lokalisation der abgebildeten Quellen ergibt sich wie im realen Schallfeld. Ein holophones System ist idealerweise homogen, d.h. bei konstanter Entfernung zu einer Quelle, muss die Energie des reproduzierten bzw. synthetisierten Schallfeldes unabhängig von der Einfallsrichtung konstant sein – es gibt keine bevorzugten Richtungen. Weiters muss das System kohärent sein, d.h. die Ortung einer Quelle ist unabhängig von der Abhörposition (zumindest in einer definierten Umgebung des optimalen Abhörpunktes).

2 Ambisonic und Holophonie

2.1 Der Ambisonic-Ansatz

Ambisonic ist ein mehrkanaliges Aufnahme- und Wiedergabesystem. Es bietet die Möglichkeit ein Schallfeld dreidimensional über Lautsprecher zu reproduzieren [2]. Bei der Aufnahme wird das Schallfeld in einem Punkt mit Mikrofonen unterschiedlicher Richtcharakteristik aufgenommen. Die Lautsprechersignale werden bei der Wiedergabe in Abhängigkeit von den Lautsprecherpositionen entsprechend aus diesen Aufnahmesignalen zusammengesetzt.

An das Schallfeld werden folgende Voraussetzungen gestellt:

- Die aufgenommene Schallfeld ist eine ebene Welle (Referenzwelle). Diese Annahme ist gültig, solange die Schallquelle weit genug vom Hörer entfernt ist.
- Jeder Lautsprecher strahlt bei der Wiedergabe ebenfalls eine ebene Welle ab. Auch diese Annahme ist gültig, solange die Lautsprecher vom Zuhörer weit genug entfernt sind.

Im Folgenden beschränkt sich die Analyse auf den direkten Schallanteil (es wird die Freifeldsituation betrachtet) in der horizontalen Ebene (2D-Fall).

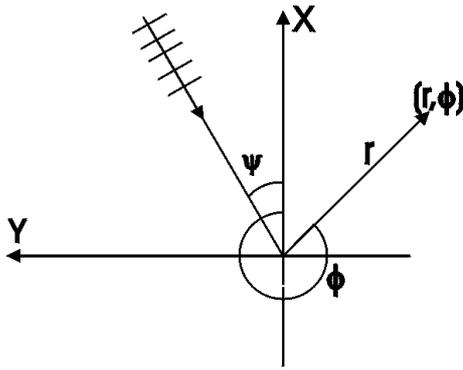


Abb. 1a Aufnahmesituation einer einzelnen Schallquelle aus der Richtung ψ .

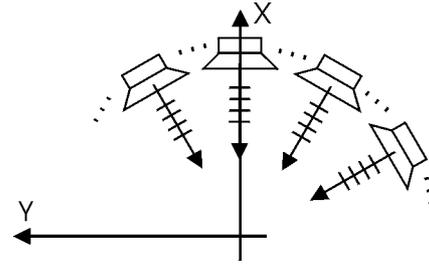


Abb. 1b Wiedergabesituation

In Abb.1a ist die Aufnahmesituation einer einzelnen Quelle im 2-dimensionalen Fall dargestellt. Der Ursprung des Bezugssystems entspricht der optimalen Abhör- und Aufnahmeposition. Die ebene Welle der Quelle trifft aus der Richtung ψ ein und wird im Punkt (r, ϕ) durch Gleichung (1) beschrieben. Sie wird im folgenden als Referenzwelle bezeichnet.

$$(1) \quad S_{\text{Referenz}}(r, \phi) = P_{\psi} \cdot e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}} = P_{\psi} \cdot e^{jk \cdot r \cdot \cos(\phi - \psi)}$$

\vec{k} ...ist die Wellenzahl und enthält die Richtungsinformation der Quelle.

Bei der Wiedergabe (Abb. 1b) werden N Lautsprecher entlang einer Kreislinie symmetrisch angeordnet. Jeder dieser Lautsprecher strahlt eine ebene Welle ab (Gl.2). Die resultierende Schallwelle des Ambisonic-Systems wird durch Superposition der N abgestrahlten Teilwellen der einzelnen Lautsprecher (P_n, ϕ_n) bestimmt werden (Gl.3).

$$(2) \quad S_n(r, \phi) = P_n \cdot e^{j\vec{k}_n \cdot \vec{r}} = P_n \cdot e^{jk_n \cdot r \cdot \cos(\phi - \phi_n)}$$

$$(3) \quad S_{\text{Ambisonic}}(r, \phi) = \sum_{n=1}^N S_n(r, \phi) = \sum_{n=1}^N P_n \cdot e^{j\vec{k}_n \cdot \vec{r}} = \sum_{n=1}^N P_n \cdot e^{jk_n \cdot r \cdot \cos(\phi - \phi_n)}$$

Damit das originale und das reproduzierte (synthetisierte) Schallfeld einander gleichen, muss die in Gleichung 4 geforderte Äquivalenz erfüllt werden.

$$(4) \quad S_{\text{Referenz}}(r, \phi) \equiv S_{\text{Ambisonic}}(r, \phi)$$

Für diese Äquivalenz wird die Eigenschaft einer ebenen Welle benutzt, dass sie in eine Bessel-Fourierreihe entwickelt werden kann (s. Gl.5 anhand der Referenzwelle) [3].

$$(5) \quad S_{\text{Referenz}}(r, \phi) = P_{\psi} \cdot e^{jk r \cos(\phi - \psi)} = P_{\psi} J_0(kr) + 2P_{\psi} \sum_{m=1}^{\infty} i^m J_m(kr) \cos[m(\phi - \psi)]$$

$$= P_{\psi} \left(J_0(kr) + 2 \sum_{m=1}^{+\infty} i^m J_m(kr) [\cos(m\phi) \cos(m\psi) + \sin(m\phi) \sin(m\psi)] \right)$$

Wird die Systemwelle ebenfalls in eine Reihe entwickelt, so ergibt sich eine Gleichheit beider Wellen durch eine Übereinstimmung aus dem Koeffizientenvergleich (matching conditions) in Gleichung 6.

$$\begin{aligned}
 P_\psi &= \sum_{n=1}^N P_n \\
 (6) \quad P_\psi \cdot \cos(m\psi) &= \sum_{n=1}^N P_n \cdot \cos(m\phi_n) \quad m = 1, \dots, \infty \\
 P_\psi \cdot \sin(m\psi) &= \sum_{n=1}^N P_n \cdot \sin(m\phi_n)
 \end{aligned}$$

Die Reihe in Gl. (5) besitzt unendlich viele Reihenelemente. In der Praxis wird diese Reihe nur bis zu einem bestimmten Grad m approximiert, der die Ordnung des Systems festlegt. Je höher die Ordnung gewählt wird, desto genauer wird die Reihe approximiert und desto größer ist der räumliche und der Frequenzbereich, indem das Ambisonic- System der Referenzwelle gut reproduziert. Gleichzeitig steigt die Anzahl von Übertragungskanäle und infolge die Anzahl der Lautsprecher damit an [3,4]. Durch den Koeffizientenvergleich ergeben sich auf der linken Seite des Gleichungssystems (6) die zu kodierenden vektoriellen Komponenten – die Kodierungsvorschrift.

Kodierung

Die Kodierung stellt für synthetisch erzeugte Schallfelder keine Schwierigkeit dar. Bei der Aufnahme eines realen Schallfeldes erfolgt die Kodierung durch Mikrofone, die im Ursprung des Bezugskoordinatensystem angeordnet werden, mit entsprechender Richtcharakteristik (s. Gl. 6). Für $m=0$ ergibt sich eine kugelförmige Richtcharakteristik; für $m=1$ ergeben sich zwei achterförmige Richtcharakteristika, die normal zueinander orientiert sind; für $m=2$ ergeben sich zwei kleeblattförmige Richtcharakteristiken, die um 45° zueinander verschoben sind, usw.. Hier ergeben sich Probleme für höhere Ordnungen, da diese Charakteristiken nicht verfügbar sind.

Eine Quelle mit dem Signal S aus der Richtung ψ wird wie folgt in Ambisonic-Signale kodiert¹:

$$(7) \quad W = 0.707 \cdot S \quad X = S \cdot \cos \psi \quad Y = S \cdot \sin \psi \quad U = S \cdot \cos 2\psi \quad V = S \cdot \sin 2\psi \dots$$

¹ Die Bezeichnungen W,X,Y,... sind willkürlich gewählt und haben sich in der vorhandenen Literatur als Standardbezeichnungen etabliert.

Dekodierung

Das Gleichungssystem aus Gl.6 kann in der Matrixschreibweise dargestellt werden.

$$(8) \quad \mathbf{b} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}$$

mit $\mathbf{b} = [W, X, Y, U, V, \dots]^T$, $\mathbf{x} = [P_1, P_2, P_3, \dots, P_N]$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \cos(\varphi_1) & \cos(\varphi_2) & & \cos(\varphi_N) \\ \sin(\varphi_1) & \sin(\varphi_2) & & \sin(\varphi_N) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \sin(m\varphi_1) & \sin(m\varphi_2) & \dots & \sin(m\varphi_N) \end{bmatrix}$$

Der Vektor \mathbf{b} beschreibt die kodierten Übertragungskanäle, \mathbf{x} beschreibt die gesuchten Lautsprecher-signale P_n . Die Matrix \mathbf{A} wird durch die Lautsprecheranordnung bestimmt. Da es sich bei \mathbf{A} um eine im allgemeinen nicht-quadratische Matrix handelt, muss bei der Lösung des Systems die Pseudoinverse gebildet werden. Die Lautsprecher-signale ergeben sich durch Lösung der Normalgleichungen:

$$(9) \quad \mathbf{x} = \mathbf{A}^T \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^T)^{-1} \cdot \mathbf{b}$$

Für eine symmetrische Lautsprecheranordnung entlang einer Kreislinie ergeben sich somit die Lautsprecher-signale durch Summation der einzelnen Richtungskomponenten (W, X, Y, U, V, \dots), die entsprechend mit der Position des Lautsprechers, in Abhängigkeit von der Signalordnung, gewichtet werden (Gl. 10).

$$(10) \quad P_i = \frac{1}{N} (W + 2X \cos(\varphi_i) + 2Y \sin(\varphi_i) + 2U \cos(2\varphi_i) + 2V \sin(2\varphi_i) \dots)$$

Um die in den Ambisonic-Signalen enthaltenen Richtungsinformationen vollständig in der Dekodierung zu erhalten, wird die Lautsprecheranzahl N so gewählt, dass Gl.(8) ein unterbestimmtes Gleichungssystem ist. Es folgt mit der Systemordnung M im 2D- bzw. im 3D-Fall [4]:

$$(11) \quad 2D \quad N \geq (2M + 1) \quad 3D \quad N \geq (M + 1)^2$$

Zusammenfassung

Die Vorteile des Ambisonic-Systems liegen in der vollständigen Trennung des Aufnahme- und Wiedergabesystems d.h. die Positionierung und die Anzahl der verwendeten Lautsprecher ist für die Aufnahme ohne Bedeutung. Die Lautsprecher-signale lassen sich durch eine relativ einfache Dekodiermatrix für jede Lautsprecheranzahl, die die Ungleichung in Gl. 11 erfüllt, aus den vektoriiellen Komponenten bestimmen. Synthetisch erzeugte Schallfelder lassen sich bis zu beliebig hoher Systemordnung kodieren und dekodieren.

Der Nachteil dieses Systems liegt bei der Kodierung natürlicher Schallfelder für höhere Ordnungen ($M > 1$), da Mikrofone mit entsprechenden Richtcharakteristiken nicht verfügbar sind.

2.1 Ansatz mit Holophonie

Der Holophonische Ansatz basiert auf dem Huygens'schen Prinzip [1690], welches besagt: *...Jedes Element einer Wellenfront kann als Zentrum einer Störung betrachtet werden, die Ausgangspunkt einer sekundären kugelförmigen Wellenfront (Elementarwelle) ist...* Diese Aussage wurde von Fresnel noch vervollständigt, indem er postulierte, dass diese sekundären Wellenfronten miteinander interferieren und somit eine neue Gesamtwellenfront bilden. Dieses Prinzip ist in Abbildung 2 dargestellt.

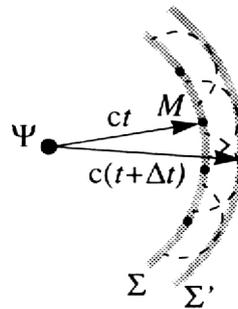


Abb.2 Darstellung des Huygens'schen Prinzips.

Ψ ist die primäre Quelle. Zum Zeitpunkt t hat sich in der Entfernung ct , wobei c die Schallgeschwindigkeit bezeichnet, eine Wellenfront Σ ausgebildet. Jeder Punkt M von Σ ist nun selber wieder Ausgangspunkt einer Elementarwelle, die nach Δt miteinander interferieren und eine neue Wellenfront Σ' erzeugen.

Aus dem Huygens'schen Prinzip folgt, dass jedes Schallfeld durch eine Verteilung von sekundären Quellen reproduziert werden kann. Dieser Sachverhalt wird mathematisch durch das Kirchhoff-Helmholtz Integral beschrieben (s.Gl.12). Durch die Kenntnis des Drucks und des Druckgradienten normal zur begrenzenden Oberfläche eines quellenfreien Volumens kann das Schallfeld innerhalb des Volumens eindeutig beschrieben werden.

$$(12) \quad P(\vec{r}_R) = \frac{1}{4\pi} \oint_S \left[P(\vec{r}_S) \cdot \nabla_S G(\vec{r}_R | \vec{r}_S) - G(\vec{r}_R | \vec{r}_S) \cdot \nabla_S P(\vec{r}_S) \right] \cdot \vec{n} dS$$

mit $G(\vec{r}_R | \vec{r}_S) = \frac{e^{-jk|\vec{r}_R - \vec{r}_S|}}{|\vec{r}_R - \vec{r}_S|} + K$...Green'sche Funktion und \vec{r}_S bzw. \vec{r}_R sind jeweils

Punkte auf der einhüllenden Oberfläche S bzw. Punkte im begrenzten Volumen.

Durch den allgemeinen Ansatz ist das Schallfeld, welches durch die sekundären Monopol- und Dipol-Quellen, die auf der begrenzenden Oberfläche verteilt sind, erzeugt wird, nur innerhalb des Volumens vorhanden und außerhalb identisch Null. Ist das außerhalb des Volumens erzeugte Feld ohne Bedeutung, so genügen entweder nur Monopol- oder nur Dipolquellen zur Erzeugung des Schallfeldes innerhalb des betrachteten Volumens [5,6].

Auch hier wird zur Vereinfachung nur der 2-dimensionale Fall betrachtet.

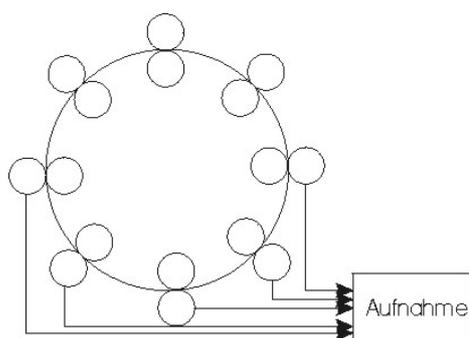


Abb. 3a Aufnahmesituation.

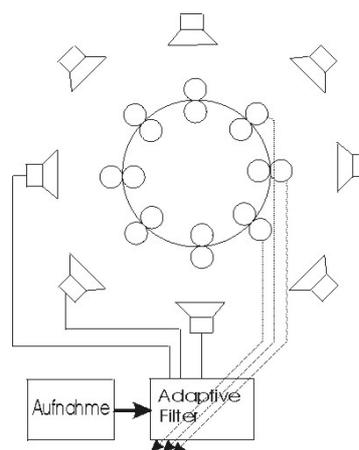


Abb. 3b Wiedergabesituation.

Bei der Aufnahme (Abb. 3a) nach dem holophonischen Ansatz wird das Schallfeld entlang einer beliebigen Kontur (im 3D-Fall: Oberfläche) durch ein Mikrofonarray aufgenommen. Die Größe der eingeschlossenen Fläche (im 3D-Fall: Volumen) ist im wesentlichen abhängig von der Anzahl der verwendeten Mikrofone, da der Abstand zwischen den Mikrofonen nicht beliebig groß werden darf, um räumliches Aliasing zu vermeiden [7]. Jedes Mikrofonsignal wird als eigener Kanal aufgenommen.

Bei der Wiedergabe (Abb. 3b) werden die aufgenommenen Signale den Lautsprecher zugeführt, die außerhalb um das Mikrofonarray angeordnet sind. Mit Hilfe eines Regelkreises (adaptive Filter) werden die Lautsprechersignale so eingestellt, dass die empfangenen Signale an den Mikrofonen mit der Aufnahme identisch sind. Dadurch ist das reproduzierte Feld im Inneren identisch mit dem originalen Aufnahmefeld.

Zusammenfassung

Der Vorteil des Holophonieansatzes ist die relativ einfache Aufnahmesituation, abgesehen von der großen Anzahl der benötigten Mikrofone und Übertragungskanäle. Die Reflexionen des Wiedergaberaumes werden durch diesen Ansatz berücksichtigt und kompensiert. Die Anordnung der Lautsprecher ist "beliebig", d. h. sie müssen nur außerhalb des Mikrofonarrays positioniert sein. Der Nachteil liegt bei der Wiedergabe, da ein Einmessen des Wiedergaberaumes erforderlich ist. Weiters wird für die Dekodierung der Aufnahmesignale eine Filtermatrix benötigt. Die Anzahl der benötigten Filter ist gleich dem Produkt aus Anzahl der Lautsprecher und Anzahl der Arraymikrofone.

3 Verbindung der Ansätze

Aus den Betrachtungen in Abschnitt 2 folgt, dass die Vorteile bei der Aufnahme beim holophonischen Ansatz liegen und bei der Wiedergabe der Ambisonic-Ansatz zu bevorzugen ist. Somit liegt es nahe diese beiden Ansätze zu verbinden, um die entsprechenden Vorteile zu vereinen.

In der Tat sind die beiden Systeme äquivalent, wenn folgende drei Annahmen erfüllt werden.

- Das originale Schallfeld wird durch eine ebene Welle beschrieben.
(Keine Einschränkung der Allgemeinheit, weil jede Welle als Superposition von ebenen Wellen dargestellt werden kann.)
- Die sekundären Quellen sind entlang einer kreisförmigen Linie (im 2D-Fall) angeordnet.
- Die sekundären Quellen strahlen ebenfalls eine ebene Wellen aus.

Der genaue mathematische Nachweis findet sich bei Nicol und Emerit [8,9]. Dadurch können Ambisonic-Signale höherer Ordnung geschlossen aus den Holophonie-Signalen (Arraysignalen) berechnet werden.

4 Kompensation des Wiedergaberaumes

Die Akustik des Wiedergaberaumes hat einen meist störenden Einfluss auf das reproduzierte bzw. synthetisierte Schallfeld. Beim Holophonie-Ansatz wird dieser durch den adaptiven Prozess eliminiert. Hier wird gezeigt, wie beim kombinierten Ansatz die Systemeigenschaften des Ambisonic-Ansatzes genutzt werden.

Jeder Lautsprecher erzeugt am Abhörpunkt neben dem Direktschall auch vielfache Reflexionen aus verschiedenen Richtungen. Diese Reflexionen können als Quellen interpretiert werden. Es ist möglich durch die Kenntnis der Quellenposition und deren zeitliches Auftreten die dadurch verursachten Wellenfelder zu synthetisieren und phaseninvertiert mit dem originalen Feld zu superponieren. Dadurch werden die Einflüsse des Wiedergaberaumes eliminiert. Dieser Prozess kann durch die Messung der Raumimpulsantworten zwischen jedem Lautsprecher und jedem Mikrofon des Aufnahmearrays erfolgen. Aus den Mikrofonsignalen (Raumimpulsantworten) werden die 3-dimensionalen Raumimpulsantworten im Ambisonicformat berechnet. Deren reflektive Anteile können in der Dekodiermatrix entsprechend berücksichtigt werden, d.h. jedes Element der Dekodiermatrix ist nun ein Filter.

Die neue Vorgangsweise zur Kompensation von Raumreflexionen wird im Folgenden anhand eines Ambisonic Systems 1. Ordnung für den 2 dimensional Fall im Punkt (0,0) vorgestellt. Die Wiedergabe erfolgt mit einem kreisförmigen Lautsprecherarray bestehend aus L Lautsprechern. Durch die begrenzenden Flächen des Wiedergaberaumes kommt es zu Reflexionen, die das Originalsignal mit einer entsprechenden Verzögerung, Abschwächung und Klangfarbenveränderung aus einer anderen Richtung zumischen.

Für eine Freifeldwiedergabe berechnen sich die Lautsprecher-signale L_i aus den Ambisonic Signalen (W_{org} , X_{org} und Y_{org}) wie folgt:

$$(13) \quad \begin{pmatrix} L_1 \\ \vdots \\ L_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Decoder} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} W_{org} \\ X_{org} \\ Y_{org} \end{pmatrix}$$

Der Decoder gewichtet die originalen Drucksignale W_{org} , X_{org} und Y_{org} in Abhängigkeit von der Lautsprecherposition und bildet die entsprechenden Summen der Lautsprecherpfade (siehe Gl.10).

Im Folgenden werden Reflexionen durch eine Amplitude a_k , eine Verzögerung t_k und eine Richtung θ_k modelliert. Die Raumimpulsantwort des i -ten Lautsprechers $h_i(t)$ aus der Richtung ϕ_i lautet:

$$(14) \quad h_i(t) = \delta_{\phi_i}(t - t_0) + \sum_{k=1}^{+\infty} a_k \cdot \delta_{\theta_{i,k}}(t - t_{i,k})$$

Die L Raumimpulsantworten werden mit dem Mikrofonarray gemessen und Abschnitt 3 folgend in Ambisonic-Signale umgerechnet. Die Impulsantwort für den i -ten Lautsprecher kann im Ambisonicformat dargestellt werden mit:

$$(15a) \quad W_{h_i}(t) = \delta(t - t_0) + \sum_{k=1}^{+\infty} a_k \cdot \delta(t - t_{i,k})$$

$$(15b) \quad X_{h_i}(t) = \delta(t - t_0) \cdot \cos(\phi_i) + \sum_{k=1}^{+\infty} a_k \cdot \delta(t - t_{i,k}) \cdot \cos(\theta_{i,k})$$

$$(15c) \quad Y_{h_i}(t) = \delta(t - t_0) \cdot \sin(\phi_i) + \sum_{k=1}^{+\infty} a_k \cdot \delta(t - t_{i,k}) \cdot \sin(\theta_{i,k})$$

Die ersten Terme der Gl. (15) beschreiben den Direktschall und werden für die folgenden Betrachtungen entfernt. Für den Anteil der Reflexionen ergeben sich folgende zeitdiskrete Impulsantworten zur Kompensation (negatives Vorzeichen):

$$(16a) \quad W_{h_{i,r}}(n) = - \sum_{k=1}^{+\infty} a_k \cdot \delta(n - m_{i,k})$$

$$(16b) \quad X_{h_{i,r}}(n) = - \sum_{k=1}^{+\infty} a_k \cdot \delta(n - m_{i,k}) \cdot \cos(\theta_{i,k})$$

$$(16c) \quad Y_{h_{i,r}}(n) = - \sum_{k=1}^{+\infty} a_k \cdot \delta(n - m_{i,k}) \cdot \sin(\theta_{i,k})$$

Im Folgenden wird die Vorgangsweise der Kompensation des Wiedergaberaumes anhand eines Lautsprecher-signals gezeigt. Das Lautsprecher-signal des i -ten Lautsprechers für das freie Schallfeld lautet (siehe Gl. 13):

$$(17) \quad L_i(n) = a_i \cdot W_{org}(n) + b_i \cdot X_{org}(n) + c_i \cdot Y_{org}(n)$$

Die Koeffizienten a_i , b_i und c_i in Gl. (17) sind die Elemente der i . Zeile der Ambisonic Decodermatrix. Die Kompensationssignale für die Reflexionen werden durch Faltung (im Folgenden mit \otimes bezeichnet) der Lautsprecher-signale mit den dazugehörigen Ambisonic Raumimpulsantworten berechnet.

$$(18a) \quad W_{L_{i,r,comp}}(n) = L_i(n) \otimes W_{h_{i,r}}(n)$$

$$(18b) \quad X_{L_{i,r,comp}}(n) = L_i(n) \otimes X_{h_{i,r}}(n)$$

$$(18c) \quad Y_{L_{i,r,comp}}(n) = L_i(n) \otimes Y_{h_{i,r}}(n)$$

Somit ergeben sich die Lautsprechersignale L^* aus den Ambisonic Signalen unter Berücksichtigung der Reflexionen von L_i :

$$(19a) \quad \begin{pmatrix} L_1^* \\ \vdots \\ L_L^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Decoder \\ \vdots \\ Decoder \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} W_{org} \\ X_{org} \\ Y_{org} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Decoder \\ \vdots \\ Decoder \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} W_{L_{i,r,comp}} \\ X_{L_{i,r,comp}} \\ Y_{L_{i,r,comp}} \end{pmatrix}$$

Unter Berücksichtigung von Gl. (17) und (18) ergibt das:

$$(19b) \quad \begin{pmatrix} L_1^* \\ \vdots \\ L_L^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Decoder \\ \vdots \\ Decoder \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \delta(n) + a_i W_{h_{i,r}}(n) & b_i W_{h_{i,r}}(n) & c_i W_{h_{i,r}}(n) \\ a_i X_{h_{i,r}}(n) & \delta(n) + b_i X_{h_{i,r}}(n) & c_i X_{h_{i,r}}(n) \\ a_i Y_{h_{i,r}}(n) & b_i Y_{h_{i,r}}(n) & \delta(n) + c_i Y_{h_{i,r}}(n) \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} W_{org} \\ X_{org} \\ Y_{org} \end{pmatrix}$$

Für die Kompensation der Reflexionen aller L Lautsprecher erhält man die kompensierten Lautsprechersignale L_{comp} :

$$(20) \quad \begin{pmatrix} L_{1,comp} \\ \vdots \\ L_{L,comp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Decoder \\ \vdots \\ Decoder \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \delta(n) + \sum_{i=1}^L a_i W_{h_{i,r}} & \sum_{i=1}^L b_i W_{h_{i,r}}(n) & \sum_{i=1}^L c_i W_{h_{i,r}}(n) \\ \sum_{i=1}^L a_i X_{h_{i,r}}(n) & \delta(n) + \sum_{i=1}^L b_i X_{h_{i,r}}(n) & \sum_{i=1}^L c_i X_{h_{i,r}}(n) \\ \sum_{i=1}^L a_i Y_{h_{i,r}}(n) & \sum_{i=1}^L b_i Y_{h_{i,r}}(n) & \delta(n) + \sum_{i=1}^L c_i Y_{h_{i,r}}(n) \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} W_{org} \\ X_{org} \\ Y_{org} \end{pmatrix}$$

Durch diese Vorgangsweise benötigt man abhängig von der Anzahl N der Übertragungskanäle (hier $N=3$) N^2 Filter zur Eliminierung der Raumreflexionen des Wiedergaberaumes im Abhörpunkt (0,0). Die Anzahl der Filter ist also unabhängig von der Anzahl der Lautsprecher.

5 Zusammenfassung

Es wurden die Ansätze „Ambisonic“ und „Holophonie“ zur Schallfeldreproduktion mittels Lautsprecherwiedergabe vorgestellt. Weiters wurde gezeigt, dass sich die beiden Ansätze miteinander verbinden lassen und somit ein System entsteht, das die Vorteile beider Ansätze vereint. Darüber hinaus wurde eine Systemerweiterung von Ambisonic vorgestellt, die die störenden Einflüsse des Wiedergaberaumes kompensiert kann. Der Aufwand bezüglich der verwendeten Filter zur Raumkompensation ist geringer als im holophonischen Ansatz.

Die Vorgangsweise bei der Kompensation des Wiedergaberaumes kann auch zur Erzeugung eines 3-dimensionalen Halls angewendet werden. Das neue System scheint für psychoakustische Hörversuche geeigneter als kopfhörerbezogene Anordnungen. Weiters ist das vorgestellte System zur Erzeugung von virtuellen Räume einsetzbar.

6 Literatur

- [1] M. Poletti: "The Design of Encoding Functions for Stereophonic and Polyphonic Sound Systems"; J.Acoust.Soc.Am., Vol.44, No.11; November 1996.
- [2] M. A. Gerzon, "With Height Sound Reproduction", AES Journal, Vol. 21, No.1, Jan/Feb, pp. 2-10, 1973.
- [3] J.S. Bamford: "An Analysis of Ambisonic Sound Systems of First and Second Order", Thesis presented to the University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada; 1995.
- [4] M. A. Gerzon, "General Metatheory of Auditory Localisation.", Preprint 3306, 92nd AES Convention, March 24-27, Vienna, 1992.
- [5] E. Verheijen, "Sound Reproduction by Wave Field Synthesis.", Thesis, TU Delft, 1998.
- [6] E. W. Start, "Direct sound enhancement by wave field synthesis.", Thesis, TU Delft, 1997.
- [7] S. Ise, "A Principle of Sound Field Control Based on the Kirchhoff-Helmholtz Integral Equation and the Theory of Inverse Systems.", ACUSTICA, acta acustica, Vol. 85, pp78-87, 1999.
- [8] Rozenn Nicol, Marc Emerit: "3D-Sound Reproduction Over An Extensive Listening Area, A Hybrid Method Derived From Holophony And Ambisonic"; AES 16th International Conference, pp.436-453; 1999.
- [9] Rozenn Nicol, Marc Emerit: "Reproducing 3D-Sound for Videoconferencing: a Comparison between Holophony and Ambisonic"; DAFX98 Proceedings pp.17-20; 1998.