



(11) **EP 2 571 290 A1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
20.03.2013 Patentblatt 2013/12

(51) Int Cl.:
H04S 3/00 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **11181445.5**

(22) Anmeldetag: **15.09.2011**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
PL PT RO RS SE SI SK SM TR**
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA ME

(71) Anmelder:
• **Deutsche Telekom AG**
53113 Bonn (DE)
• **Technische Universität Berlin**
10623 Berlin (DE)

(72) Erfinder:
• **Ahrens, Jens**
10823 Berlin (DE)
• **Helwani, Karim**
10829 Berlin (DE)
• **Spors, Sascha**
10243 Berlin (DE)

(74) Vertreter: **Vossius & Partner**
Siebertstrasse 4
81675 München (DE)

(54) **Lokale Schallfeldsynthese durch einen virtuellen Streukörper**

(57) Mit der Erfindung wird ein Verfahren zur Bestimmung von Ansteuerungssignalen zur Wiedergabe eines gewünschten Schallfelds innerhalb eines lokalen Zuhörerbereichs mittels mehrerer Lautsprecher an Positionen außerhalb des Zuhörerbereichs bereitgestellt. Ein virtuelles Schallfeld außerhalb des Zuhörerbereichs wird bestimmt, das durch Streuung des gewünschten Schallfelds an einem virtuellen Streukörper mit einer Geome-

trie, die der Geometrie des Zuhörerbereichs äquivalent ist, entsteht. Die Signale des virtuellen Schallfelds an den Positionen der Lautsprecher werden bestimmt und diese Signale des virtuellen Schallfelds werden zeitumgekehrt. In einem Verfahren zur Wiedergabe des gewünschten Schallfelds werden diese zeitumgekehrten Signale den Lautsprechern zugeführt.

EP 2 571 290 A1

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft die Wiedergabe bzw. Synthese eines Schallfeldes in einem begrenzten Zuhörerbereich, insbesondere die Schallfeldsynthese durch Streuung an einem virtuellen Streukörper und anschließende Zeitumkehr.

[0002] Es sind zahlreiche Verfahren zur Audiowiedergabe oder zur physikalischen Synthese eines Schallfeldes bekannt.

[0003] So wird bei stereophonischen Techniken der Audiowiedergabe mit Hilfe von zwei oder mehr Lautsprechern durch Pegeldifferenzen oder Laufzeitdifferenzen ein räumlicher Schalleindruck beim natürlichen Hören erzeugt. Der gewünschte räumliche Höreindruck entsteht dabei nur innerhalb eines begrenzten Bereichs dem sogenannten "sweet spot". Es wurden in der Vergangenheit eine Reihe von Verfahren vorgestellt, welche sich mit der Nachführung bzw. Vergrößerung des Sweet Spot bei stereophonischer (illusatorischer) Wiedergabe befassen. Beispielfhaft wird hier auf die Druckschriften DE-A-102005052904, DE-A-10125229 oder US-B-6633648 verwiesen.

[0004] Mit der Stereophonie kann im Allgemeinen nur der Eindruck einer Schallquelle, die mindestens den Abstand zu den nächst gelegenen Lautsprechern hat, vermittelt werden. Es kann aber keine physikalische Synthese eines gewünschten komplexen Schallfeldes erzielt werden.

[0005] Dagegen ermöglicht die Wellenfeldsynthese (WFS) die physikalische Synthese eines Schallfeldes über einen ausgedehnten Bereich. Eine Beschreibung der Wellenfeldsynthese kann beispielsweise den Dokumenten A.J. Berkhout, D. de Vries, and P. Vogel. Acoustic control by wave field synthesis. *Journal of the Acoustical Society of America*, Volume 93(5):2764-2778, May 1993 oder S. Spors, R. Rabenstein, and J. Ahrens. The Theory of Wave Field Synthesis Revisited. In *proceedings of 124th Convention of the Audio Engineering Society*, May 17-20, Amsterdam, The Netherlands, 2008 entnommen werden. Es können beliebig geformte konvexe oder gerade Lautsprecheranordnungen verwendet werden, die nicht zwingend geschlossen sein müssen. Die Lautsprecheransteuerungssignale können analytisch berechnet werden. In dem potentiellen Hörbereich, z.B. innerhalb einer Lautsprecheranordnung, gibt es keinen ausgeprägten "Sweet Spot" wo die Rekonstruktion des gewünschten Schallfeldes signifikant genauer ist als im Rest des Hörbereiches. Aufgrund des endlichen Lautsprecherabstandes sind bei praktischen Realisierungen große Abweichungen vom gewünschten Schallfeld über den gesamten potentiellen Hörerbereich vorhanden (Aliasing).

[0006] Eine weitere Familie von Verfahren zur Schallfeldrekonstruktion, bei denen das Ansteuerungssignal analytisch berechnet werden kann, wird mit Ambisonics bezeichnet. Die traditionelle Formulierung von Ambisonics (siehe z.B. J. Daniel, *Représentation de champs*

acoustiques, application à la transmission et à la reproduction de scènes sonores complexes dans un contexte multimedia, PhD thesis, Université Paris 6, 2001) erfordert kreisförmige bzw. kugelförmige Anordnungen von Lautsprechern. Mit Hilfe von numerischen Algorithmen werden die Lautsprecher-signale generiert, die zur Wiedergabe des gewünschten Schallfeldes führen. Die im Rechenweg notwendige Beschränkung der räumlichen Bandbreite der Ansteuerungsfunktion bewirkt, dass die Rekonstruktion des gewünschten Schallfeldes im Zentrum der Lautsprecheranordnung am genauesten ist ("Sweet Spot"). Je weiter der betrachtete Ort von Zentrum entfernt ist, desto größer werden die Abweichungen.

[0007] Erweiterungen der traditionellen Formulierung von Ambisonics (siehe z.B. J. Ahrens and S. Spors. Analytical driving functions for higher order Ambisonics. In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, Las Vegas, Nevada, March 30th-April 4th 2008) ermöglichen die analytische Berechnung der Lautsprecheransteuerungssignale, die um ein Vielfaches effizienter ist als numerische Verfahren. Jedoch besteht weiterhin die Restriktion, dass der "Sweet Spot" sich im Zentrum der Lautsprecheranordnung befindet, und dass lediglich kreisförmige oder kugelförmige Lautsprecheraufbauten verwendet werden können.

[0008] Neben diesen etablierten Verfahren wurde in den letzten Jahren eine Reihe von verallgemeinerten Verfahren zur Synthese eines Schallfeldes entwickelt. Diese basieren auf der expliziten Lösung der Synthesegleichung. Diese beschreibt den mathematischen Zusammenhang zwischen dem synthetisierten Schallfeld in einem Zielbeschallungsbereich und den Ansteuerungssignalen einer kontinuierlichen Verteilung von Schallquellen durch eine Integralgleichung. Diese kann durch Anwendung von Operatortheorie gelöst werden, wie in F.M. Fazi, P.A. Nelson and R. Potthast, *Analogies and Differences between three Methods for Sound Field Reproduction*, Ambisonics Symposium, June 2009, Graz, Austria beschrieben. Dazu werden die beteiligten Schallfeldgrößen in orthogonale Basisfunktionen zerlegt. Die konkrete Formulierung dieser Basisfunktionen hängt von der zugrundeliegenden Geometrie ab. Im Allgemeinen ist diese Methode numerisch aufwendig und schlecht konditioniert. Dies macht Ihre Anwendung in der Praxis komplex. Allerdings bietet die Formulierung des zugrundeliegenden physikalischen Problems in Form der Synthesegleichung Einblick in die benötigten Mechanismen zur Synthese eines Schallfeldes. In der oben genannten Veröffentlichung von F.M. Fazi et al. wurde aufgezeigt das die akustischen Randbedingungen zur Lösung der Synthesegleichung denen eines Streukörpers mit homogenen Dirichlet Randbedingungen entsprechen. Daraus kann direkt gefolgert werden, dass das äußere Schallfeld eines Systems zur Schallfeldsynthese der Streuung des gewünschten Schallfeldes an der Kontur der Systems entspricht. Die Rand-

bedingungen an dem Streukörper entsprechen dann homogenen Dirichlet Randbedingungen, d.h. das System zur Schallfeldsynthese verhält sich wie ein schallweicher Streukörper.

[0009] Weiterhin wird in E.G. Williams, Fourier Acoustics: Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography, Academic Press, 1999 ein Verfahren zur Synthese bzw. Extrapolation eines Schallfeldes durch eine kontinuierliche Verteilung von Schallquellen mit Monopolcharakteristik beschrieben. Dabei wird ausgehend vom Kirchhoff-Helmholtz Integral gezeigt dass die Monopole durch die Differenz der Schallschnellen von innen und außen jeweils in Normalenrichtung zur Oberfläche angesteuert werden müssen. Das heißt, es wird keine explizite Lösung der Synthesegleichung benötigt. Hierzu wurde wiederum in der oben bereits angesprochenen Veröffentlichung von F.M. Fazi et al. gezeigt, dass die zugrundeliegende Forderung nach einem kontinuierlichen Schalldruck und einer diskontinuierlichen Schallschnelle über den Rand der Verteilung von Sekundärquellen hinweg den Randbedingungen eines schallweichen Streukörpers entspricht. Das heißt, die benötigte Differenz der Schallschnellen in Normalenrichtung kann aus der Streuung des virtuellen Schallfeldes an einem Streukörper mit der äquivalenten Geometrie wie das Synthesesystem gewonnen werden. Das äußere Schallfeld entspricht dann wieder der Streuung des virtuellen Schallfeldes an dem äquivalenten Streukörper.

[0010] Beide Verfahren, die Wellenfeldsynthese und erweitertes Ambisonics, streben die physikalisch akkurate Wiedergabe in einem möglichst großen Zuhörerbereich an. In der praktischen Realisierung beider Verfahren ist der erreichbaren Genauigkeit allerdings Grenzen gesetzt. Die endliche Anzahl von Lautsprechern führt zu einer Reihe von Artefakten, die zum Teil im gesamten Zuhörerbereich auftreten. Dies hat zu der Entwicklung einer Reihe von Ansätzen geführt, die eine höhere Genauigkeit in einem begrenzten Zuhörerbereich ermöglichen als Wellenfeldsynthese oder Ambisonics.

[0011] Die in der EP-A-2182744 vorgeschlagene Erfindung erlaubt die freie Platzierung des Sweet Spots bzw. der Sweet Area innerhalb einer geschlossenen Lautsprecheranordnung bei Ambisonics. Die Lautsprecheransteuerungssignale können analytisch berechnet werden. Das Verfahren ist signifikant effizienter als andere Ansätze aber limitiert auf geschlossene (z.B. kreis- und kugelförmige) Anordnungen.

[0012] Der in S. Spors and J. Ahrens. Local sound reproduction by virtual secondary sources, veröffentlicht in AES 40th International Conference on Spatial Audio, Tokyo, Japan, October 2010 vorgestellte Ansatz basiert auf dem Konzept räumlich dicht angeordneter virtueller Sekundärquellen um die Genauigkeit der Synthese zu verbessern. Die virtuellen Quellen werden dabei durch fokussierte Schallquellen realisiert. Dieser Ansatz lässt sich besonders Effizient durch die Wellenfeldsynthese realisieren.

[0013] Der in J. Ahrens, "The single-layer potential ap-

proach applied on sound field synthesis and its extension to nonenclosing distributions of secondary sources," Ph.D. dissertation, Technische Universität Berlin, 2010 vorgestellte Ansatz beruht wiederum auf einer räumlichen Bandbegrenzung der Ansteuerungssignale der Lautsprecher. Damit wird ein begrenzter Bereich mit erhöhter Genauigkeit der Synthese erreicht, der frei im Hörerbereich platziert werden kann. Es können sowohl umschließende als auch gerade Lautsprecheranordnungen verwendet werden.

[0014] Die DE-A-10 2007 032 272 und DE-A-10 2005 003 431 beschreiben die technische Realisierung eines virtuellen Kopfhörers. Dabei werden jeweils eine oder mehrere virtuelle Schallquellen in der Nähe der Ohren des Hörers erzeugt, um einen Kopfhörer zu simulieren. Diese virtuellen Schallquellen werden durch akustische Fokussierung realisiert. Diese virtuellen Schallquellen werden mittels einer so genannten Übersprechkompensation betrieben, die das Übersprechen der Signale zu den abgewandten Ohren hin kompensiert. Dies ist eine übliche Technik bei der Wiedergabe von binauralen Signalen über Lautsprecher. Die virtuellen Quellen werden der Kopfbewegung nachgeführt, dadurch kann die Übersprechkompensation bei Kopfbewegungen konstant gehalten werden. Dies ist ein wesentlicher Vorteil dieser Erfindung. Die Synthese von Außenohrübertragungsfunktionen, um andere Eigenschaften zu realisieren als in der Datenbank vorhanden sind, wird nicht betrachtet. Weiterhin wird die Schallfeldsynthese in dem Verfahren nur zur Erzeugung der Quellen für den virtuellen Kopfhörer genutzt und nicht für die Synthese eines Schallfeldes in einem lokalen Bereich.

[0015] Ein weiteres Verfahren ist die sogenannte Zeitumkehr-Akustik. Die verlustlose akustische Wellengleichung enthält nur zeitliche und räumliche Ableitungen zweiten Grades (siehe z.B. Didier Cassereau and Mathias Fink, Time-Reversal of Ultrasonic Fields-Part III: Theory of the Closed Time-Reversal Cavity, IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS, FERROELECTRICS, AND FREQUENCY CONTROL, VOL. 39, NO. 5, SEPTEMBER 1992). Daraus folgert die interessante Eigenschaft der Wellengleichung, dass bei einer bekannten Lösung der Wellengleichung diese Lösung bei einer Umkehrung der Zeit auch eine Lösung der Wellengleichung darstellt. Praktisch wird dieses Prinzip zur Fokussierung von Schallenergie auf einen Punkt bzw. ein Objekt angewendet. Hierzu wird in einem ersten Schritt am gewünschten Fokuspunkt eine Schallquelle platziert und der Schalldruck an den späteren Quellenpositionen mittels Mikrofonen aufgezeichnet. In einem zweiten Schritt werden die Mikrophone durch Schallquellen ersetzt die mit dem zeitumgekehrten vorher aufgezeichneten Signal angesteuert werden. Die Schallquelle im gewünschten Fokuspunkt sowie die Mikrofone können auch virtuell sein. Die oben genannte Veröffentlichung von Cassereau und Fink nennt Anwendungen der Zeitumkehr-Akustik, zum Beispiel bei der Zerstörung von Nierensteinen durch Ultraschall.

[0016] Die vorliegende Erfindung soll ein verbessertes und insbesondere ein vereinfachtes Verfahren zu Rekonstruktion eines Schallfelds in einem lokal begrenzten Zuhörerbereich bereitstellen.

[0017] Die vorliegende Erfindung beruht auf der Grundidee, zur lokalen Synthese eines Schallfelds die Erkenntnisse über das äußere Schallfeld eines Systems zur Schallfeldsynthese mit der Zeitumkehr-Akustik zu kombinieren. Hierzu wird angenommen, dass der Zuhörerbereich von einem virtuellen Streukörper umhüllt ist. Dieser Streukörper kann maximal bis zu den Lautsprechern reichen und/oder beliebig klein sein. Das externe Schallfeld ist nun durch die Streuung des gewünschten virtuellen Schallfeldes an einem Streukörper gegeben, dessen Geometrie zu der Geometrie des Zuhörerbereichs äquivalent ist.

[0018] Die entsprechenden akustischen Randbedingungen müssen nun am Rand des lokalen Zuhörerbereichs synthetisiert werden. Dies könnte zum Beispiel - ähnlich dem Verfahren aus der oben bereits angesprochenen Veröffentlichung von F.M. Fazi et al. - durch eine explizite Lösung der zugrundeliegenden Integralgleichungen erfolgen. Hierfür sind aber komplexe mathematische Berechnungen nötig.

[0019] Gemäß der vorliegenden Erfindung werden hierzu die Prinzipien aus der Zeitumkehr-Akustik angewendet. Das Feld außerhalb des lokalen Zuhörerbereichs kann als das zeitumgekehrte Feld interpretiert werden, welches durch einen virtuellen Streukörper an der Position des Zuhörerbereiches entstanden ist. Dieses äußere Feld kann durch die Anwendung der Zeitumkehr durch Lautsprecher außerhalb des lokalen Zuhörerbereichs synthetisiert werden. Dadurch entsteht innerhalb des lokalen Zuhörerbereichs das Feld der gewünschten virtuellen Quelle.

[0020] Dementsprechend stellt die vorliegende Erfindung ein Verfahren zur Bestimmung von Ansteuerungssignalen zur Wiedergabe eines gewünschten Schallfelds innerhalb eines lokalen Zuhörerbereichs mittels mehrerer Lautsprecher an Positionen außerhalb des lokalen Zuhörerbereichs bereit, das die folgenden Schritte aufweist: Zunächst wird ein virtuelles Schallfeld außerhalb des lokalen Zuhörerbereichs bestimmt, das durch Streuung des gewünschten Schallfelds an einem virtuellen Streukörper mit einer Geometrie entsteht, die der Geometrie des lokalen Zuhörerbereichs entspricht, und die Signale dieses virtuellen Schallfeldes an den Positionen der Lautsprecher werden bestimmt. Die Ansteuerungssignale für die Lautsprecher werden durch Zeitumkehren der Signale des virtuellen Schallfelds an den entsprechenden Lautsprecherpositionen bestimmt. Zur Wiedergabe des gewünschten Schallfelds innerhalb des lokalen Zuhörerbereichs werden nach Bestimmen der Ansteuerungssignale für die Lautsprecher vorzugsweise die zu verwendenden Lautsprecher unter den mehreren Lautsprechern ausgewählt und diese werden mit den zeitumgekehrten Signalen angesteuert.

[0021] Bei der Berechnung des gestreuten Feldes wird

in der Regel davon ausgegangen, dass das Feld innerhalb des Streukörpers dem einfallenden Feld entspricht. Weiterhin wird angenommen, dass dieses Feld aus dem Streukörper nach außen propagieren kann. Diese Anteile des Schallfelds sollen aber vorzugsweise bei der Ansteuerung der Lautsprecher nicht berücksichtigt werden. Weiterhin wird bei der Theorie der Zeitumkehr-Akustik nicht die Ausbreitungsrichtung der Wellenfronten berücksichtigt. Diese ist aber für einen Zuhörer zum Beispiel bei der Lokalisation von Schallquellen ausschlaggebend. Beides kann durch eine räumliche Fensterung (Selektion) bei der Auswahl der zu verwendenden, also der aktiven Lautsprecher erfolgen.

[0022] Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren sind die Lautsprecher vorzugsweise kreisförmig oder linear oder rechteckig oder oval oder kugelförmig angeordnet.

[0023] Es ist ferner bevorzugt, dass die Amplituden der Lautsprechersignale korrigiert werden, wie auch im Folgenden noch kurz erläutert wird.

[0024] Der virtuelle Streukörper kann schallweiche oder schallharte oder auch gemischte Randbedingungen haben.

[0025] Gemäß einer weiter bevorzugten Ausführungsform wird das virtuelle Schallfeld als durch eine virtuelle Quelle erzeugt beschrieben. Vorzugsweise ist die virtuelle Quelle eine Punktquelle oder eine ebene Welle. Gemäß einer anderen Ausführungsform ist die virtuelle Quelle eine Quelle mit komplexer Richtcharakteristik.

[0026] Weiter bevorzugt weist das Verfahren den Schritt des Auswählens von zu benutzenden Lautsprechern aus den mehreren Lautsprechern auf. Dabei können Lautsprecher ausgewählt werden, die sich nicht in der Ausbreitungsrichtung des virtuellen Schallfelds befinden. Es ist auch möglich, bei der Auswahl der Lautsprecher Lautsprecher auszuwählen, deren Ausbreitungsrichtung bezogen auf die lokale Zuhörerzone mit der Ausbreitungsrichtung des virtuellen Schallfelds übereinstimmen.

[0027] Bevorzugt wird das virtuelle Schallfeld mit der 2,5-dimensionalen Wellenfeldsynthese bestimmt.

[0028] Es ist ferner bevorzugt, dass der Zuhörerbereich dynamisch innerhalb der Lautsprecheranordnung platziert wird. Dabei kann der Zuhörerbereich an die Position eines bewegten Zuhörers angepasst werden.

[0029] Das virtuelle Schallfeld ist vorzugsweise ein mittels Mikrofonen außerhalb des Zuhörerbereichs gemessenes Schallfeld.

[0030] Mit dem Berechnungsverfahren gemäß der Erfindung für die Ansteuerungssignale können auch Impulsantworten berechnet werden. Mit diesen kann dann das Signal der virtuellen Quelle gefaltet werden, um das gewünschte virtuelle Schallfeld innerhalb der lokalen Zonen zu erzeugen. Dazu muss bei der Berechnung des Schallfeldes, welches vom virtuellen Streukörper gestreut wird, angenommen werden, dass das einfallende Schallfeld der virtuellen Quelle für einen zeitlichen (Dirac) Impuls als Quellensignal berechnet wird. Das heißt, in diesem Fall wird dann die raum-zeitliche Impulsantwort

vom virtuellen Streukörper zu den Lautsprecherpositionen berechnet. Diese muss bei der Anwendung der Zeitumkehr und gegebenenfalls auch bei der Auswahl der Lautsprecher berücksichtigt werden.

[0031] Das erfindungsgemäße Verfahren kann auch auf gemessene Schallfelder angewendet werden. Hierzu muss das Schallfeld mit einem Mikrofonarray vermessen werden, welches sich außerhalb des virtuellen Streukörpers befindet. Aus der Analyse des Schallfeldes kann das einfallende Schallfeld auf dem virtuellen Streukörper und damit das gestreute Feld an den Lautsprecherpositionen berechnet werden.

[0032] Die Randbedingungen für den virtuellen Streukörper können gemäß den obigen Ausführungen als schallweich angesetzt werden, oder alternativ auch als schallhart.

[0033] Bei einer 2,5-dimensionalen Synthese mittels Wellenfeldsynthese kann eine Korrektur der Amplituden der Lautsprechersignale nötig werden. Im Vergleich zu einer dreidimensionalen Wellenfeldsynthese verwendet die 2,5-dimensionale Synthese Sekundärquellen an der Umgrenzung des (planaren) Hörbereichs. Werden dazu Punktschallquellen als Sekundärquellen verwendet, wird von einer 2,5-dimensionalen Synthese gesprochen. Die 2,5-dimensionale Synthese leidet jedoch unter dem Auftreten von Artefakten, insbesondere Amplitudenabweichungen zwischen den gewünschten virtuellen Quellen und dem synthetisierten Schallfeld. Dies wird durch eine Korrektur der Amplituden der Lautsprechersignale berücksichtigt.

[0034] Aufgrund des typischerweise klein gewählten Zuhörerbereichs und der somit kleinen Apertur ist es oft nicht sinnvoll, das beschriebene Verfahren zur lokalen Schallfeldsynthese bei tiefen Frequenzen zu nutzen. Für tiefe Frequenzen können die normalen Verfahren zur Schallfeldsynthese genutzt werden, da hier die typische physikalische Genauigkeit der herkömmlichen Verfahren ausreichend ist. Das Überblenden zwischen den beiden Verfahren kann durch eine Fensterfunktion im Frequenzbereich geschehen.

[0035] Die virtuelle Quelle kann neben dem typischen Punktquellenmodell auch als Quelle mit komplexer Richtcharakteristik modelliert werden. Hierzu kann beispielsweise das in J. Ahrens and S. Spors. Implementation of directional sources in wave field synthesis. In IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, New Paltz, USA, October 2007 beschriebene Verfahren verwendet werden. Auch hier bietet die Kombination mit der lokalen Schallfeldsynthese gemäß der Erfindung einen wesentlichen Vorteil, da die gewünschte Richtcharakteristik nicht durch die Artefakte der räumlichen Abtastung verfälscht wird.

[0036] Das erfindungsgemäße Verfahren erlaubt auch die Synthese von Ruhezeiten innerhalb eines Systems zur Schallfeldsynthese durch die Überlagerung eines im gesamten Bereich synthetisierten Schallfeldes und eines lokalen Schallfeldes. Falls das Schallfeld innerhalb des lokalen Zuhörerbereichs gegenüber dem globalen

Schallfeld eine umgekehrte Phase aufweist, gibt es innerhalb des lokalen Zuhörerbereichs Auslöschung bzw. Dämpfung des globalen Schallfeldes, und es bildet sich eine Ruhezone innerhalb des lokalen Zuhörerbereichs aus.

[0037] Gemäß diesem Aspekt stellt die Erfindung ein Verfahren zur Erzeugung einer Ruhezone oder einer Zone mit vermindertem Schalldruck innerhalb eines Schallfeldes bereit, mit den Schritten: a) Bestimmen von ersten Ansteuerungssignalen zur Wiedergabe des gewünschten Schallfeldes innerhalb des Zuhörerbereichs für die Lautsprecher gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren; b) Bestimmen von zweiten Ansteuerungssignalen zur Wiedergabe des gewünschten Schallfeldes innerhalb des durch die Lautsprecher umfassten Bereiches; c) Ansteuern der Lautsprecher mit den zeitumgekehrten Signalen; und d) phasenumgekehrtes Überlagern der Ansteuerungssignale gemäß Schritt c) mit Ansteuerungssignalen für die Lautsprecher gemäß Schritt b).

[0038] Vorzugsweise erfolgt Schritt b) durch Wellenfeldsynthese oder near-field compensated higher-order Ambisonics.

[0039] Prinzipiell ist das erfindungsgemäße Verfahren unabhängig von der Technik, die für die Berechnung des gestreuten Schallfeldes des virtuellen Streukörpers verwendet wird. Die Streuung des virtuellen Schallfeldes an einen Körper kann zum Beispiel mittels der in N.A. Gumerov and R. Duraiswami, Fast Multipole Methods for the Helmholtz Equation in three Dimensions, Elsevier, 2004 beschriebenen analytischen Berechnungsvorschriften erfolgen oder auch mittels numerischer Verfahren wie zum Beispiel der, boundary element method (BEM) oder, finite element method (FEM).

[0040] Das Verfahren gemäß der vorliegenden ermöglicht die Synthese eines Schallfeldes in einer lokalen Zuhörerzone, wobei innerhalb der lokalen Zone mit einer gegebenen Anzahl von Lautsprechern eine höhere Genauigkeit erzielt wird. Der gewünschte lokale Wiedergabebereich kann dynamisch und frei innerhalb bzw. vor der Lautsprecheranordnung platziert werden und so z.B. dynamisch an die Hörerposition angepasst werden, insbesondere durch eine geeignete Wahl der Position und der Geometrie des virtuellen Streukörpers. Das Verfahren kann auch als Ersatz für ein anderes Verfahren der lokalen Synthese bei der Extrapolation bzw. Synthese von Außenohrübertragungsfunktionen verwendet werden. Weiterhin ist auch die Erzeugung von Ruhezeiten oder Zonen mit vermindertem Schalldruck bzw. verminderter Energie innerhalb des synthetisierten Schallfeldes möglich.

[0041] Die Erfindung wird im Folgenden anhand von Ausführungsbeispielen unter Verweis auf die beigefügten Figuren näher beschrieben.

Fig. 1 zeigt ein Beispiel eines von einem kugelförmigen Streukörper mit schallweichen Randbedingungen gestreuten Feldes für eine ebene Welle als einfallendes Schallfeld;

Fig. 2 zeigt das Schallfeld bei der Synthese einer monofrequenten ebenen Welle mit einer Frequenz (a) von 1 kHz und (b) von 5 kHz mittels traditioneller Wellenfeldsynthese durch eine kreisförmige Lautsprecheranordnung;

Fig. 3 zeigt die Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens auf das Szenario aus Fig. 2(b);

Fig. 4 zeigt das Schallfeld bei der Synthese einer monofrequenten ebenen Welle mit einer Frequenz (a) von 1 kHz und (b) von 4 kHz mittels traditioneller Wellenfeldsynthese durch eine lineare Lautsprecheranordnung;

Fig. 5 zeigt die Anwendung des beschriebenen Verfahrens zur lokalen Synthese für die Synthese einer ebenen Welle mit einer Frequenz von 4 kHz entsprechend dem in Fig. 4(b) gezeigten Aufbau;

Fig. 6 zeigt die Ausbildung einer Ruhezone in dem Aufbau gemäß Fig. 2 mittels traditioneller Wellenfeldsynthese und

Fig. 7 zeigt die Ausbildung einer Ruhezone im Aufbau nach Fig. 6 mittels der vorliegenden Erfindung.

[0042] Bei einem ersten Beispiel wird die lokale Synthese innerhalb einer kreisförmigen Anordnung mit einem Durchmesser von 3 m bestehend aus 60 Lautsprechern betrachtet. Die lokale Zuhörerzone ist kreisförmig mit einem Durchmesser von 60 cm und befindet sich im Zentrum der Lautsprecheranordnung. Figur 2(a) zeigt das Schallfeld bei der Synthese einer monofrequenten ebenen Welle mit einer Frequenz von 1 kHz mittels traditioneller Wellenfeldsynthese. Figur 2(b) zeigt das gleiche Szenario, für eine Frequenz von 5 kHz. Aufgrund der höheren Frequenz und des endlichen Lautsprecherabstandes sind deutliche Artefakte der räumlichen Abtastung im synthetisierten Schallfeld zu beobachten. Figur 3 zeigt die Anwendung des beschriebenen Verfahrens zu lokaler Synthese. Als virtueller Streukörper wurde eine Kugel mit schallweichen Randbedingungen angenommen. Die Kugel ist ebenfalls in den Figuren eingezeichnet. Figur 3 zeigt deutlich, dass bei einer Frequenz der ebenen Welle von 5 kHz eine akkurate Synthese innerhalb des lokalen Zuhörerbereiches möglich ist. Außerhalb des lokalen Zuhörerbereiches entstehen Artefakte.

[0043] Im zweiten Ausführungsbeispiel wird eine lineare Anordnung von insgesamt 60 Lautsprechern betrachtet, wobei der Abstand zwischen den Lautsprechern 15 cm beträgt. Figur 4(a) zeigt die Synthese einer monofrequenten ebenen Welle mit einer Frequenz von 1 kHz. Figur 4(b) das gleiche Szenario mit einer Frequenz von 4 kHz. Auch hier sind wieder deutliche Artefakte der räumlichen Abtastung innerhalb des gesamten Zuhörerbereiches zu beobachten. Figur 5 zeigt die Anwendung

des beschriebenen Verfahrens zur lokalen Synthese für die Synthese einer ebenen Welle mit einer Frequenz von 4 kHz. Die Verbesserung in dem lokalen Zuhörerbereich, im Gegensatz zu Figur 4(b), ist deutlich ersichtlich.

[0044] Im dritten Ausführungsbeispiel wird die Synthese eines Schallfeldes betrachtet, innerhalb welchem sich eine Ruhezone ausbildet. Die Geometrie entspricht dem ersten Beispiel. Figur 6 zeigt die Synthese einer monofrequenten ebenen Welle mit einer Frequenz von 1 kHz bei Verwendung der traditionellen Wellenfeldsynthese. Figur 7 zeigt die Ausbildung einer Ruhezone im Zentrum der Lautsprecheranordnung. Dies wurde durch phasenumgekehrte Überlagerung der Ansteuerungssignale der traditionellen Wellenfeldsynthese und der vorge-schlagenen lokalen Synthese realisiert.

[0045] Obwohl die Erfindung mittels der Figuren und der zugehörigen Beschreibung dargestellt und detailliert beschrieben ist, sind diese Darstellung und diese detaillierte Beschreibung illustrativ und beispielhaft zu verstehen und nicht als die Erfindung einschränkend. Es versteht sich, dass Fachleute Änderungen und Abwandlungen machen können, ohne den Umfang der folgenden Ansprüche zu verlassen. Insbesondere umfasst die Erfindung ebenfalls Ausführungsformen mit jeglicher Kombination von Merkmalen, die vorstehend zu verschiedenen Aspekten und/oder Ausführungsformen genannt oder gezeigt sind.

[0046] Die Erfindung umfasst ebenfalls einzelne Merkmale in den Figuren auch wenn sie dort im Zusammenhang mit anderen Merkmalen gezeigt sind und/oder vorstehend nicht genannt sind.

[0047] Im Weiteren schließt der Ausdruck "umfassen" und Ableitungen davon andere Elemente oder Schritte nicht aus. Ebenfalls schließt der unbestimmte Artikel "ein" bzw. "eine" und Ableitungen davon eine Vielzahl nicht aus. Die Funktionen mehrerer in den Ansprüchen aufgeführter Merkmale können durch eine Einheit erfüllt sein. Die Begriffe "im Wesentlichen", "etwa", "ungefähr" und dergleichen in Verbindung mit einer Eigenschaft beziehungsweise einem Wert definieren insbesondere auch genau die Eigenschaft beziehungsweise genau den Wert. Alle Bezugszeichen in den Ansprüchen sind nicht als den Umfang der Ansprüche einschränkend zu verstehen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung von Ansteuerungssignalen zur Wiedergabe eines gewünschten Schallfelds innerhalb eines lokalen Zuhörerbereichs mittels mehrerer Lautsprecher an Positionen außerhalb des Zuhörerbereichs, mit den Schritten:

- Bestimmen eines virtuellen Schallfelds außerhalb des Zuhörerbereichs, das durch Streuung des gewünschten Schallfelds an einem virtuellen Streukörper mit einer Geometrie, die der

- Geometrie des Zuhörerbereichs äquivalent ist, entsteht,
 - Bestimmen der Signale des gestreuten virtuellen Schallfelds an den Positionen der Lautsprecher und
 - Zeitumkehren der Signale des virtuellen Schallfelds.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Lautsprecher kreisförmig oder linear oder rechteckig oder oval oder kugelförmig angeordnet sind. 10
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei die Amplituden der Lautsprechersignale korrigiert werden. 15
4. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei der virtuelle Streukörper schallweiche/schallharte/gemischte Randbedingungen hat.
5. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei das virtuelle Schallfeld als durch eine virtuelle Quelle erzeugt beschrieben wird. 20
6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei die virtuelle Quelle eine Punktquelle/ebene Welle ist. 25
7. Verfahren nach Anspruch 5, wobei die virtuelle Quelle eine Quelle mit komplexer Richtcharakteristik ist.
8. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, ferner mit dem Schritt des Auswählens von zu benutzenden Lautsprechern aus den mehreren Lautsprechern. 30
9. Verfahren nach Anspruch 8, wobei Lautsprecher ausgewählt werden, die sich nicht in der Ausbreitungsrichtung des virtuellen Schallfelds befinden. 35
10. Verfahren nach Anspruch 8, wobei bei der Auswahl der Lautsprecher Lautsprecher ausgewählt werden, deren Ausbreitungsrichtung bezogen auf die lokale Zuhörerzone mit der Ausbreitungsrichtung des virtuellen Schallfelds übereinstimmen. 40
11. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei das virtuelle Schallfeld mit einer 2,5-dimensionalen Wellenfeldsynthese bestimmt wird. 45
12. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei der Zuhörerbereich dynamisch innerhalb der Lautsprecheranordnung platziert wird. 50
13. Verfahren nach Anspruch 12, wobei der Zuhörerbereich an die Position eines bewegten Zuhörers angepasst wird. 55
14. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei das virtuelle Schallfeld ein mittels Mikropho-
- nen außerhalb des Zuhörerbereichs gemessenes Schallfeld ist.
15. Verfahren zur Wiedergabe eines gewünschten Schallfelds innerhalb eines lokalen Zuhörerbereichs mittels mehrerer Lautsprecher an Positionen außerhalb des Zuhörerbereichs, mit den Schritten:
 - Bestimmen von Ansteuerungssignalen zur Wiedergabe des gewünschten Schallfeldes innerhalb des Zuhörerbereichs für die Lautsprecher gemäß dem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, und
 - Ansteuern der Lautsprecher mit den zeitumgekehrten Signalen.
16. Verfahren zur Erzeugung einer Ruhezone oder einer Zone mit vermindertem Schalldruck innerhalb eines Schallfeldes, mit den Schritten:
 a) Bestimmen von ersten Ansteuerungssignalen zur Wiedergabe des gewünschten Schallfeldes innerhalb des Zuhörerbereichs für die Lautsprecher gemäß dem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14;
 b) Bestimmen von zweiten Ansteuerungssignalen zur Wiedergabe des gewünschten Schallfeldes innerhalb des durch die Lautsprecher umfassten Bereiches;
 c) Ansteuern der Lautsprecher mit den zeitumgekehrten Signalen; und
 d) phasenumgekehrtes Überlagern der Ansteuerungssignale gemäß Schritt c) mit Ansteuerungssignalen für die Lautsprecher gemäß Schritt b).
17. Verfahren nach Anspruch 16, wobei Schritt b) durch Wellenfeldsynthese oder near-field compensated higher-order Ambisonics erfolgt.

Fig. 1

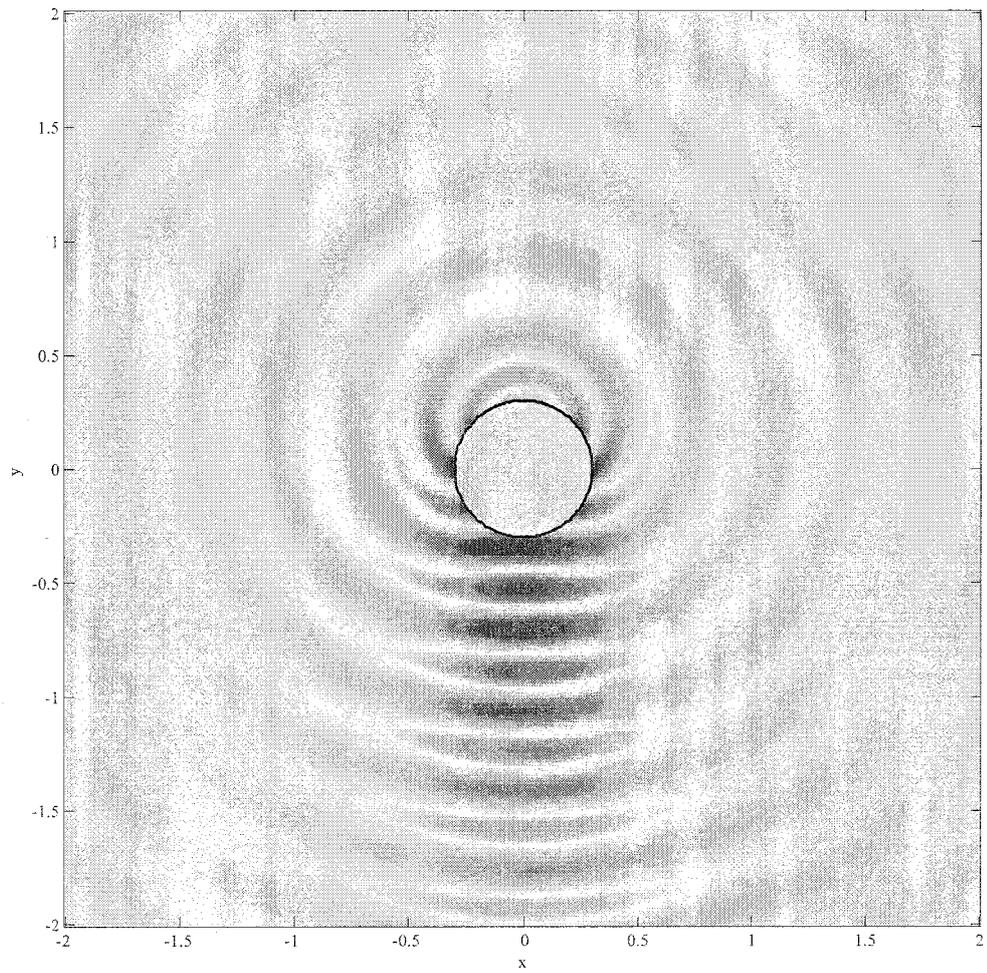
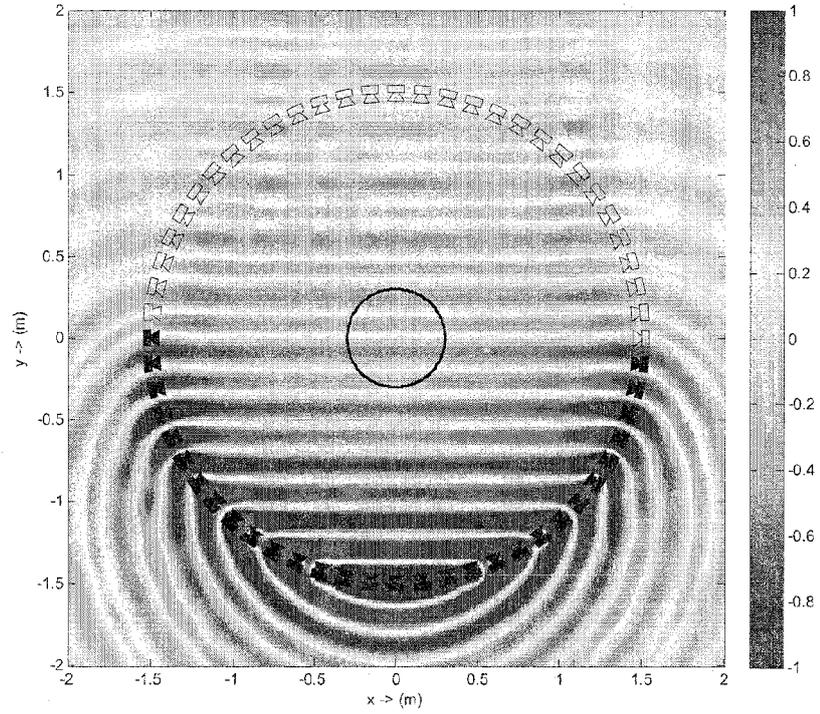


Fig. 2

(a)



(b)

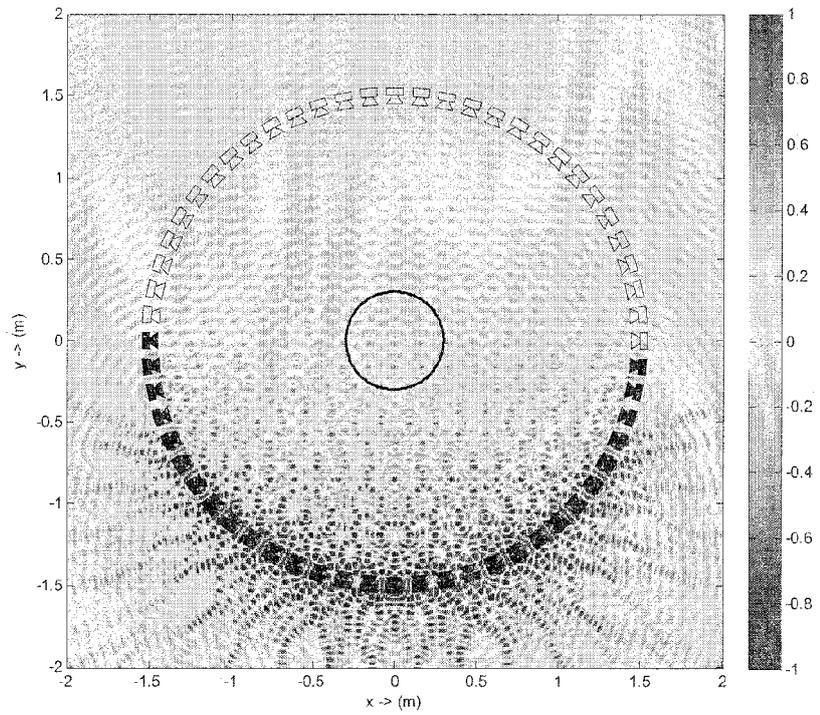


Fig. 3

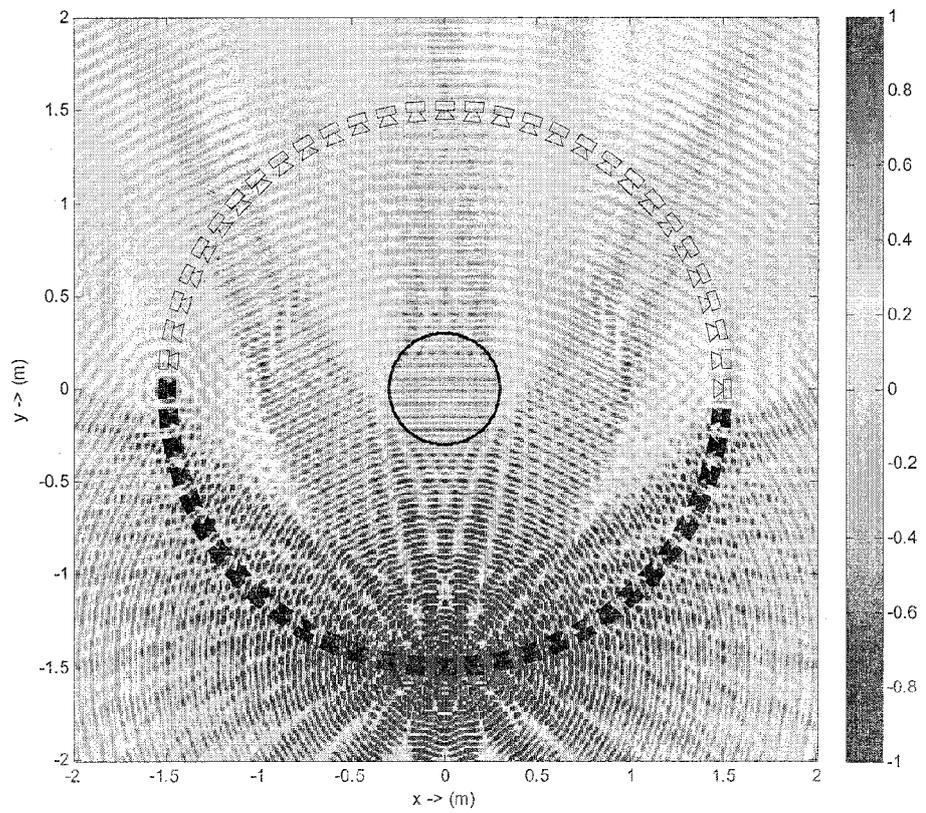
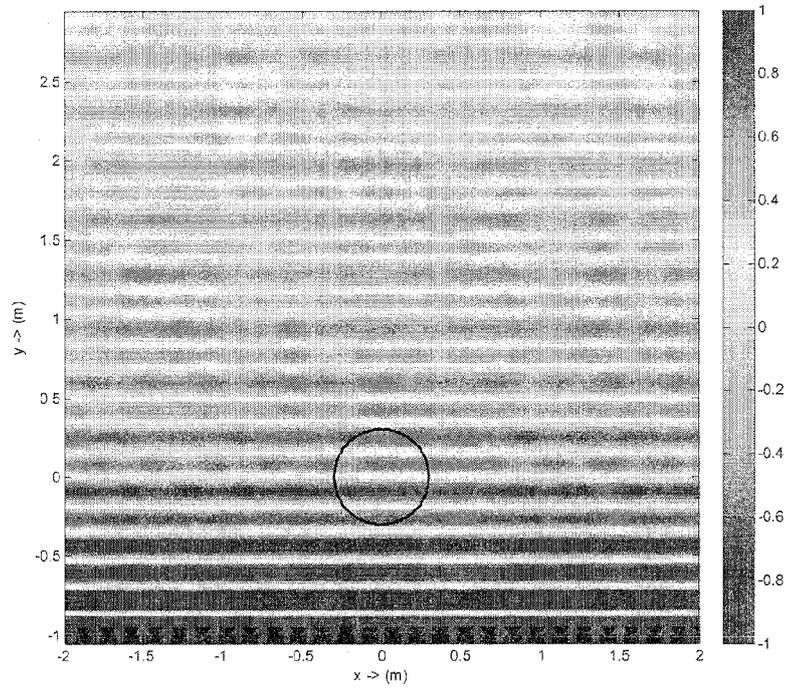


Fig. 4

(a)



(b)

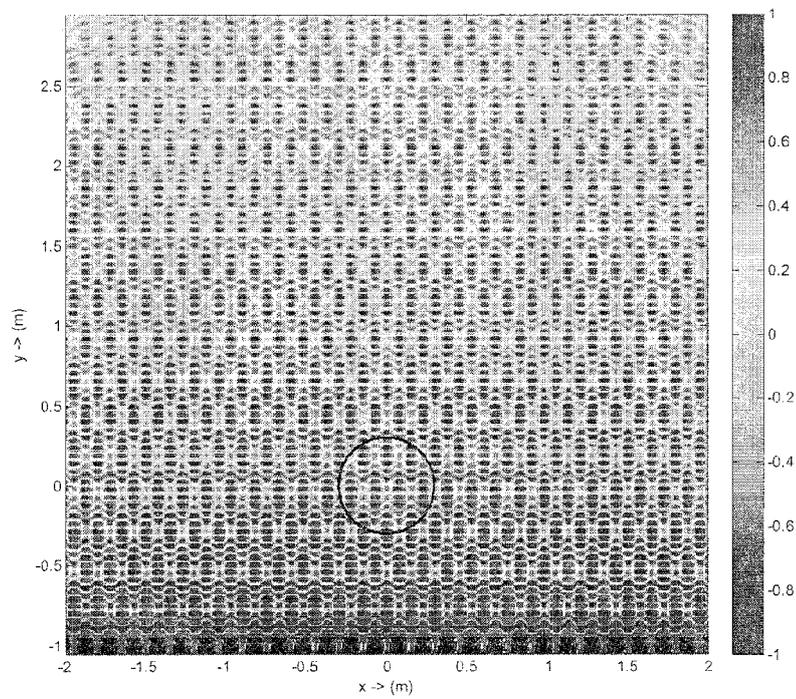


Fig. 5

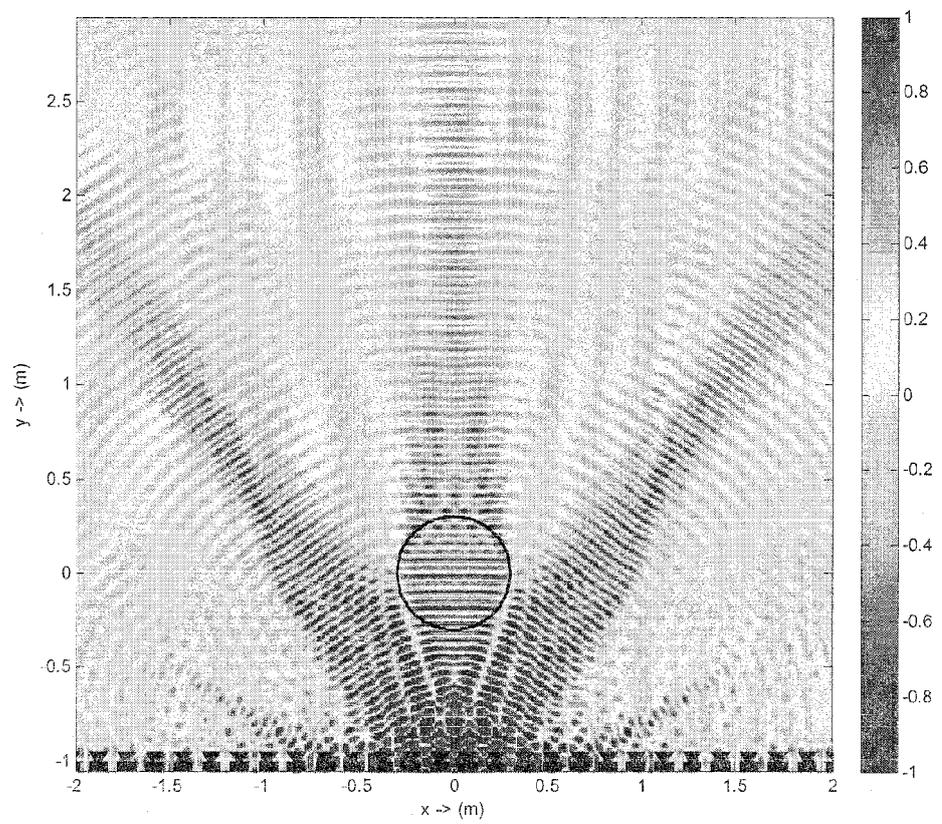


Fig. 6

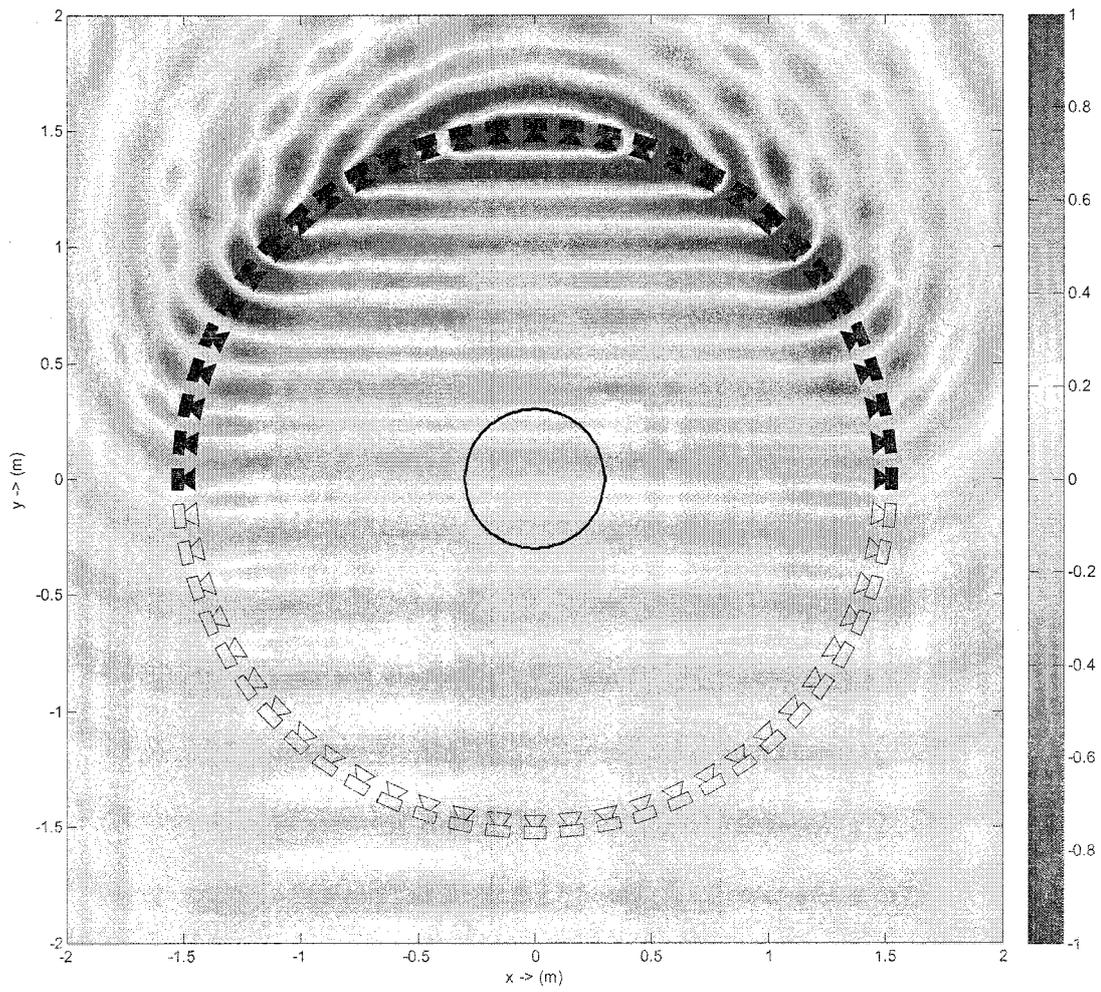
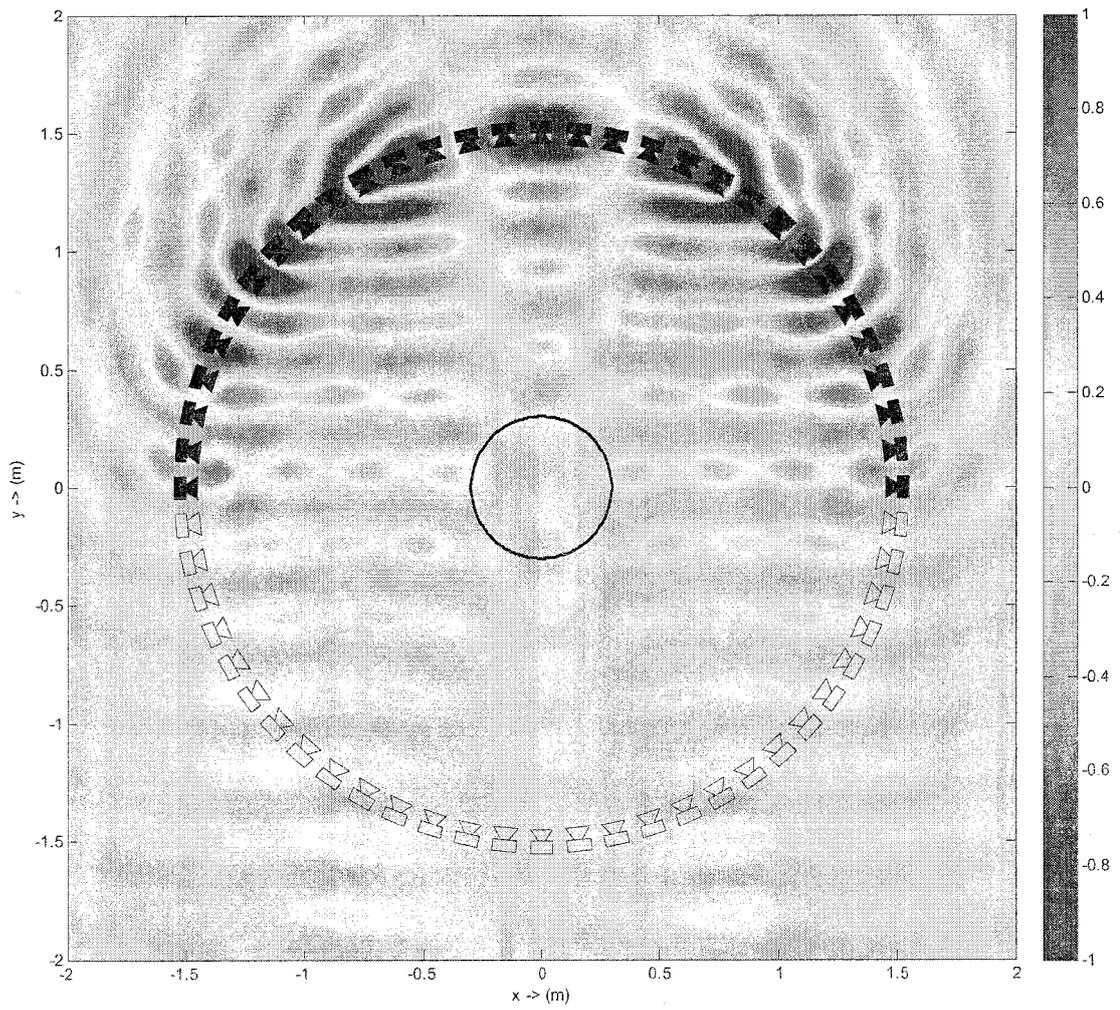


Fig. 7





EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung
EP 11 18 1445

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
A,D	EP 2 182 744 A1 (DEUTSCHE TELEKOM AG [DE]; UNIV BERLIN TECH [DE] DEUTSCHE TELEKOM AG [D] 5. Mai 2010 (2010-05-05) * das ganze Dokument * -----	1-17	INV. H04S3/00
			RECHERCHIERTER SACHGEBIETE (IPC)
			H04S H04R
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort München		Abschlußdatum der Recherche 14. Februar 2012	Prüfer Kunze, Holger
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503_03.82 (P04C03) 2

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 11 18 1445

In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.
Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

14-02-2012

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
EP 2182744 A1	05-05-2010	AT 524029 T	15-09-2011
		EP 2182744 A1	05-05-2010

EPC FORM P 0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- DE 102005052904 A [0003]
- DE 10125229 A [0003]
- US 6633648 B [0003]
- EP 2182744 A [0011]
- DE 102007032272 A [0014]
- DE 102005003431 A [0014]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **A.J. BERKHOUT ; D. DEVRIES ; P. VOGEL.** Acoustic control by wave field synthesis. *Journal of the Acoustical Society of America*, Mai 1993, vol. 93 (5), 2764-2778 [0005]
- **S. SPORS ; R. RABENSTEIN ; J. AHRENS.** The Theory of Wave Field Synthesis Revisited. *proceedings of 124th Convention of the Audio Engineering Society*, 17. Mai 2008 [0005]
- **J. DANIEL.** Représentation de champs acoustiques, application à la transmission et à la reproduction de scènes sonores complexes dans un contexte multimedia. *PhD thesis*, 2001 [0006]
- **J. AHRENS ; S. SPORS.** Analytical driving functions for higher order Ambisonics. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, 30. März 2008 [0007]
- **F.M. FAZI ; P.A. NELSON ; R. POTTHAST.** Analogies and Differences between three Methods for Sound Field Reproduction. *Ambisonics Symposium*, Juni 2009 [0008]
- **E.G. WILLIAMS.** Fourier Acoustics: Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography. Academic Press, 1999 [0009]
- **S. SPORS ; J. AHRENS.** Local sound reproduction by virtual secondary sources. *AES 40th International Conference on Spatial Audio*, Oktober 2010 [0012]
- **J. AHRENS.** The single-layer potential approach applied on sound field synthesis and its extension to nonenclosing distributions of secondary sources. *Ph.D. dissertation*, 2010 [0013]
- **DIDIER CASSEREAU ; MATHIAS FINK.** Time-Reversal of Ultrasonic Fields-Part III: Theory of the Closed Time-Reversal Cavity. *IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS, FERROELECTRICS, AND FREQUENCY CONTROL*, September 1992, vol. 39 (S [0015]
- **J. AHRENS ; S. SPORS.** Implementation of directional sources in wave field synthesis. *IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, Oktober 2007 [0035]
- **N.A. GUMEROV ; R. DURAISWAMI.** Fast Multipole Methods for the Helmholtz Equation in three Dimensions. Elsevier, 2004 [0039]