



(11) **EP 3 061 271 B1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
04.04.2018 Patentblatt 2018/14

(21) Anmeldenummer: **14781270.5**

(22) Anmeldetag: **12.09.2014**

(51) Int Cl.:
H04S 7/00 (2006.01) H04R 5/02 (2006.01)

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/IB2014/001806

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2015/036845 (19.03.2015 Gazette 2015/11)

(54) **WELLENFELDSYNTHESE-SYSTEM**

WAVE FIELD SYNTHESIS SYSTEM

SYSTÈME DE SYNTHÈSE DE CHAMP D'ONDES

(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

(30) Priorität: **10.08.2013 DE 102013013377**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
31.08.2016 Patentblatt 2016/35

(73) Patentinhaber: **HOLOPLOT GmbH**
12099 Berlin (DE)

(72) Erfinder:
• **SCHMIDT, Frank, Stefan**
14089 Berlin (DE)
• **OELLERS, Helmut**
99092 Erfurt (DE)

(74) Vertreter: **Zimmermann & Partner**
Patentanwälte mbB
Josephspitalstr. 15
80331 München (DE)

(56) Entgegenhaltungen:
WO-A1-96/14723 WO-A2-2011/119401
DE-A1-102005 008 366

- **Helmut Wittek: "Wellenfeldsynthese", Artikel für das VDT-Magazin Juni 2004, 1. Juli 2004 (2004-07-01), XP055154284, Gefunden im Internet:
URL:http://www.hauptmikrofon.de/HW/VDT-Magazin_WFS_Stuttgart.pdf [gefunden am 2014-11-21]**
- **MAUER STEPHAN ET AL: "Design and Realization of a Reference Loudspeaker Panel for Wave Field Synthesis", AES CONVENTION 130; MAY 2011, AES, 60 EAST 42ND STREET, ROOM 2520 NEW YORK 10165-2520, USA, 13. Mai 2011 (2011-05-13), XP040567369,**
- **PELLEGRINI R S ET AL: "Wave field synthesis with synchronous distributed signal processing", MULTIMEDIA SIGNAL PROCESSING, 2004 IEEE 6TH WORKSHOP ON SIENA, ITALY SEPT. 29 - OCT. 1, 2004, PISCATAWAY, NJ, USA, IEEE, 29. September 2004 (2004-09-29), Seiten 227-230, XP010802127, DOI: 10.1109/MMSP.2004.1436534 ISBN: 978-0-7803-8578-8**

EP 3 061 271 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Vorrichtung aus Schallwandlern nach dem Prinzip der Wellenfeldsynthese.

Hintergrund der Erfindung

[0002] Mit dem von Prof. Berkhout 1988 erstmals beschriebenen Verfahren der Wellenfeldsynthese für die Reproduktion von Audiosignalen [1] können die von einer natürlichen Schallquelle ausgehenden Wellenfronten nach Huygens Prinzip physikalisch rekonstruiert werden. Aus den Elementarwellen einer großen Anzahl einzeln angesteuerter Schallwandler entsteht an der Position der natürlichen Schallquelle eine virtuelle Schallquelle. Wenn diese Schallwandler auf einer zweidimensionalen Fläche aufgebaut sind, verwirklicht das Prinzip der Wellenfeldsynthese den "akustischen Vorhang". In seinem Bereich lassen sich alle Schallquellen und auch die Reflexionen dieser Schallquellen im Aufnahmeraum in allen drei Raumdimensionen physikalisch rekonstruieren, so dass in einem quellfreien Wiedergabebereich wieder die Akustik des Aufnahmegebietes entsteht.

[0003] Um die Akustischen Verhältnisse im Aufnahmegebiet vollständig zu rekonstruieren wäre es notwendig, den akustischen Vorhang rings um den Zuhörer aufzubauen, damit auch alle Reflexionen des Aufnahmegebietes an ihrem korrekten Ausgangspunkt erzeugt werden können. In der Praxis ist eine solche "Akustische Kabine" bis heute nicht realisiert. Die Zahl der Schallwandler würde sehr groß, weil sie wegen der sonst auftretenden Aliasingeffekte in geringem Abstand zueinander angeordnet sein müssen.

[0004] In der Praxis wird das Verfahren der Wellenfeldsynthese deshalb meist auf eine horizontale Reihe von Schallwandlern, die rings um den Zuhörer angeordnet werden, reduziert. Damit reduziert sich auch die Wiedergabe auf diese horizontale Ebene, korrekte räumliche Wiedergabe ist nicht mehr möglich. Zudem bedingt die zylinderförmige Ausbreitung der Wellenfronten dann, dass die Akustik des Wiedergabebereiches vollständig unterdrückt werden muss. Ein solches System ist zum Beispiel aus Helmut Wittek: "Wellenfeldsynthese", Artikel für das VDT-Magazin (Juni 2004) bekannt. Ein Modul zum Aufbau eines Systems zur Wellenfeldsynthese ist aus MAUER STEPHAN ET AL: "Design and Realization of a Reference Loudspeaker Panel for Wave Field Synthesis", AES CONVENTION 130 (Mai 2011) bekannt.

[0005] In den letzten Jahren ist es einigen Forschungseinrichtungen aber gelungen, einen zweidimensionalen akustischen Vorhang aufzubauen. Für den Fall, dass nicht alle Reflexionen des Aufnahmegebietes an ihrem korrekten Ausgangspunkt rekonstruiert werden, sondern nur die psychoakustisch bedeutsamen direkten Wellenfronten und die ersten schallstarken Reflexionen, ist in [3] eine Lösung beschrieben, die in einem modellbasie-

renden Ansatz die rings um den Zuhörer anzuordnenden Schallwandler durch gezielt erzeugte Reflexionen des Wiedergabebereiches ersetzt.

[0006] Jedoch ist auch ein solcher, frontal vor dem Zuhörer aufgebauter akustischer Vorhang kaum praktikabel, wenn er als gesamte Einheit aufgebaut wird. Er muss ausreichend groß sein, um die direkten Wellenfronten in seinem Bereich zu reproduzieren. Der Aufwand dafür wird enorm, abgesehen davon ließe er sich als fertig montierte Einheit kaum noch in den Wiedergabebereich transportieren.

[0007] Für eine begrenzte Zahl fix positionierter virtueller Schallquellen bleibt der Rechenaufwand für die Wellenfeldsynthese auch für den Aufbau eines zweidimensionalen akustischen Vorhanges beherrschbar, wenn mehrere Systeme gekoppelt werden. Wenn sich aber eine Schallquelle im Aufnahmegebiet bewegt, müssen auch alle Laufzeiten und alle Pegel aller davon abhängigen Reflexionen zu jedem einzelnen Schallwandler neu berechnet werden. Diese Operation für alle Schallwandler eines akustischen Vorhanges so schnell auszuführen, das die Bewegung einer Schallquelle kontinuierlich dargestellt werden kann, stößt selbst im modellbasierten Ansatz der Wellenfeldsynthese und beschränkt auf die Reflexionen 1. Ordnung noch heute an die Grenze der technischen Möglichkeiten.

[0008] Noch weit höher ist der Rechenaufwand, wenn eine Ortsveränderung des Zuhörers im Aufnahmegebiet dargestellt werden soll. Dann ändern sich alle Laufzeiten aller direkten Wellenfronten und aller Reflexionen zu jedem einzelnen Schallwandler. Die neu berechneten Daten müssten mindestens acht Mal in der Sekunde eingelesen werden um eine einigermaßen fließende Bewegung darzustellen [4].

[0009] Wegen der verfügbaren Rechenleistung wird im Datenbasierenden Ansatz der Wellenfeldsynthese deshalb darauf zurückgegriffen, die Impulsantworten für jeden Schallwandler für diskrete Quellpositionen vorauszuberechnen und abzuspeichern, um die virtuellen Schallquellen dann sprunghaft von einer Position zur nächsten zu verschieben [5].

[0010] Jedoch werden bei sprunghaften Bewegungen der virtuellen Schallquellen nicht die Dopplereffekte erzeugt, die bei der Ortsveränderung einer realen Schallquelle entstehen.

[0011] Die Aufgabenstellung der Erfindung besteht deshalb darin, eine Vorrichtung zu beschreiben, die aus praktischen Gründen transportabel ist und in der die Rechenleistung in der Zentraleinheit nicht mit der Anzahl der Schallwandler wächst.

[0012] So soll es auch möglich werden, die Positionen der virtuellen Schallquellen so schnell zu verändern, dass schnelle Bewegungen einer Schallquelle im dreidimensionalen Raum die natürlichen Dopplereffekte der Ortsveränderung einer realen Schallquelle hervorrufen.

Beschreibung der Erfindung

[0013] Die vorstehenden Aufgaben sowie Weitere, der Beschreibung zu entnehmende Aufgaben werden von einer Vorrichtung gemäß den Merkmalen des Patentanspruch 1 gelöst. Weitere vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben. Eine bevorzugte Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist in nachfolgenden Zeichnungen und in einer detaillierten Beschreibung dargestellt, soll aber die vorliegende Erfindung nicht darauf begrenzen.

[0014] Erfindungsgemäß ist die Vorrichtung aus Schallwandlern nach dem Prinzip der Wellenfeldsynthese nicht als geschlossene Einheit, wie sie zum Beispiel in [6] beschrieben ist, auszuführen, sondern dezentral aufzubauen. Die einzelnen Baugruppen werden in der Regel gleich ausgeführt. Ein umschließendes Gehäuse kann einen modularen Aufbau ermöglichen. Das hat den Vorteil, dass die Module austauschbar sind und das sie erst im Setupprozess des Systems einer Position im Koordinatensystem zugeordnet werden müssen. Zudem können sie für Livebeschallungen in Gruppen vormontiert und verkabelt werden, um einen schnellen Aufbau des Systems zu gewährleisten.

[0015] Alle Audiosignale können dann in einer gemeinsamen Leitung zu jedem Modul geführt werden. Mit einem seriellen Übertragungsprotokoll lassen sich bei dem dezentralen Aufbau des Systems auch die Daten für die Verzögerungszeiten und Pegel für jeden einzelnen Schallwandler sehr effektiv übertragen, wenn der modellbasierende Ansatz der Wellenfeldsynthese zur Anwendung kommt. Dabei werden dann alle Audiokanäle des Systems in einem Datenstrom zu allen Baugruppen geleitet.

[0016] Die zusätzlich zu übertragende Datenmenge, die zur Berechnung der Signale für jeden einzelnen Schallwandler in einem zweiten Datenstrom zu den Baugruppen geführt wird, ist vergleichsweise sehr gering. Die Synthese aus Inhalt, also den Audiosignalen selbst, und Form, also den zugehörigen Daten, wird dann erfindungsgemäß nicht mehr in einer Zentraleinheit ausgeführt, sondern autark in jeder modularen Einheit. Wegen des modularen Aufbaus müssen nicht mehr differenzierte Daten oder einzelne Audiosignale für jeden einzelnen Schallwandler übertragen werden. Der Datenstrom, der von der Zentraleinheit zu allen Baugruppen geführt wird, enthält nur noch den Vektor jeder darzustellenden virtuellen Schallquelle zu einem einzigen Bezugspunkt im System.

[0017] In den Baugruppen selbst ist nach dem Setup Prozess der Vektor eines, in allen Baugruppen gleichen, Bezugspunktes des betreffenden Moduls zu diesem gemeinsamen Bezugspunkt bekannt, weil er sich aus den Kantenlängen der Baugruppen oder Module und deren Position innerhalb der Anordnung aus Schallwandlern ergibt. In der Baugruppe oder Modul selbst sind dann die Vektoren jedes einzelnen Schallwandlers zu diesem Bezugspunkt gespeichert. Die Vektoraddition des Bezugs-

punktes der Anordnung aus Schallwandlern zum Koordinatenursprung plus Vektor des Bezugspunktes des Moduls zum Bezugspunkt der Anordnung aus Schallwandlern plus Vektor des jeweiligen Schallwandlers zum Bezugspunkt des Moduls ergibt die exakte Position des betreffenden Schallwandlers zum Koordinatenursprung des Systems.

[0018] Im modellbasierten Ansatz der Wellenfeldsynthese ist auch der Vektor jeder virtuellen Schallquelle zum Koordinatenursprung bekannt. Deshalb lässt sich innerhalb eines jeden Modules auch die Distanz zwischen jeder virtuellen Schallquelle zu jedem Schallwandler berechnen. Daraus lässt sich leicht die Laufzeit des Schalls von dieser virtuellen Schallquelle zum betreffenden Schallwandler ableiten, wenn die korrekte, von der Temperatur des Ausbreitungsmediums vor dem akustischen Vorhang abhängige, aktuelle Schallgeschwindigkeit bekannt ist.

[0019] Die Zahl der virtuellen Schallquellen für die Darstellung der Quellen selbst und ihrer ersten schallstarken Reflexionen ist im modellbasierenden Ansatz der Wellenfeldsynthese überschaubar. Unter Beachtung des direktionalen Auflösungsvermögens des menschlichen Gehörs wird allgemein davon ausgegangen, dass es keinen wahrnehmbaren Vorteil bringt, wenn mehr als 32 separate Positionen von direkten Schallquellen darstellbar sind [7].

[0020] Werden nur die ersten schallstarken Reflexionen dieser Quellen korrekt synthetisiert, so entstehen für jeden Audiokanal sieben virtuelle Ausgangspunkte von virtuellen Schallquellen. Im digitalen System ist es naheliegend, eine achte Position für eine zusätzliche schallstarke Reflexion zu reservieren.

[0021] So entstehen in dem gemeinsamen Datenstrom, der zu den Baugruppen geführt wird, nur $32 \times 8 = 256$ Quellpositionen für direkte Wellenfronten und erste schallstarke Reflexionen als vektorielle Größe zu dem Bezugspunkt der Anordnung aus Schallwandlern. Im Vergleich wären bei einem komplett in einer Einheit aufgebauten akustischen Vorhang, beispielsweise mit 1024 einzelnen Schallwandlern, $32 \times 8 \times 1024$ Ausgangspunkte von virtuellen Schallquellen in allen drei Raumpositionen zu definieren, das sind 262144 vektorielle Größen. Noch höher würde die Datenmenge im Datenbasierenden Ansatz. Hier sind in den Impulsantworten nicht nur die Positionen von Quelle und ersten schallstarken Reflexion enthalten, sondern alle Ausgangspunkte aller Reflexionen werden in der Faltung in die Impulsantwort wiederhergestellt. Diese Datenmenge für viele einzelne Positionen von Schallwandlern auf einer Leitung zu übertragen wäre nur möglich, wenn viel Zeit für die Übertragung zur Verfügung stehen würde. Dann wären aber schnelle Ortsveränderungen der Schallquelle nicht möglich.

[0022] Deshalb werden die Audiosignale im Datenbasierenden Verfahren der Wellenfeldsynthese in einer Zentralen Verarbeitungseinheit in die entsprechenden Impulsantworten gefaltet und das Ausgangssignal dieser

Faltung wird an die einzelnen Endverstärker geleitet.

[0023] Je größer die Zahl der einzelnen Schallwandler wird, umso größer wird der in der Zentraleinheit zu verarbeitende Rechenaufwand. Das hat in der Vergangenheit dazu geführt, dass das Prinzip der Wellenfeldsynthese fast immer auf eine einzelne horizontale Reihe aus Schallwandlern reduziert wurde.

[0024] Fundamentalere Vorzug des erfindungsgemäßen, modularen Aufbaus der Anordnung aus Schallwandlern nach dem Prinzip der Wellenfeldsynthese ist es, dass die zentral zu verarbeitende Rechenleistung und die zu den Baugruppen zu übertragende Datenmenge unabhängig von der Zahl der Schallwandler im Gesamtsystem ist. Sie ist für einen beliebig großen akustischen Vorhang nicht höher als für einen einzelnen Schallwandler.

[0025] Das macht die Darstellung sehr schneller Bewegungen der Schallquelle mitsamt der zugehörigen Positionsänderungen ihrer ersten schallstarken Reflexionen im modellbasierenden Ansatz möglich. Die acht mal drei Distanzwerte aus der zentralen Berechnung ergeben selbst bei einer extrem hohen Auflösung der Einzelwerte mit 24 Bit nur eine Datenmenge von 576 Bit für jede Schallquelle und ihre ersten schallstarken Reflexionen. Für 32 Audiokanäle ergibt sich dann nur eine Datenrate von 2,304 kByte für alle Positionsdaten. Dieser Wert ist so klein, dass auch die nach [6] geforderten 8 Updates pro Sekunde für einen flüssigen Bewegungsablauf der Quelle problemlos weit überschritten werden können.

[0026] Bisher war es wegen der begrenzten Updatefähigkeit der Quellpositionen selbst bei den auf die horizontale Ebene reduzierten Ausführungen von Wellenfeldsynthesesystemen üblich, Impulsantworten für vordefinierte Quellpositionen zu definieren und im System zu speichern, um die virtuelle Schallquelle dann von einer vordefinierten Position zur anderen springen zu lassen. Solange die Quelle nur von einem Punkt zum anderen springt, ist sie an dem jeweiligen Punkt ortsfest und beim sprunghaften Wechsel der Position entstehen zwangsläufig nicht die natürlichen Dopplereffekte einer kontinuierlichen Bewegung, die unser Ohr sehr sensitiv auswertet, sondern Artefakte.

[0027] Wenn aber die jeweils zu verarbeitende Datenmenge im modellbasierten Ansatz der Wellenfeldsynthese wegen der Aufteilung auf einzelne Module gering ist und die Quellpositionen sehr schnell den natürlichen Ortsveränderungen der originären Schallquellen und ihrer ersten schallstarken Reflexionen folgen können, so ist die Darstellung von Dopplereffekten bei bewegten virtuellen Schallquellen ohne Artefakte möglich, weil eine kontinuierliche Bewegung der virtuellen Schallquellen im Raum entsteht.

[0028] Aus dem modularen Aufbau des Wellenfeldsynthesystems entsteht ein weiterer fundamentaler Vorteil. Weil die Menge der zu übertragenden Daten und der Rechenaufwand in der Zentraleinheit unabhängig von der Anzahl der angeschlossenen Baugruppen oder Mo-

dule ist, wird das System frei skalierbar. So kann nicht nur die übliche Reduktion des Verfahrens auf die horizontale Ebene des Zuhörers leicht überwunden werden. Auch sehr große akustische Vorhänge mit Richtwirkungen bis in den Bassbereich und eng fokussierten konkaven Wellenfronten werden realisierbar.

[0029] Selbst die "akustische Kabine", die dem theoretischen, im Kirchhoff-Helmholtz-Integral beschriebenen Ansatz der Wellenfeldsynthese zu einer vollständigen physikalischen Rekonstruktion des Ausgangsschallfeldes in einem quellfreien Volumen nahe kommt, wäre wegen der freien Skalierbarkeit des modular aufgebauten Systems realisierbar.

[0030] Dazu wäre es auch möglich, in dem modularen Aufbau Subsysteme unterschiedlicher Leistungsfähigkeit aufzubauen, beispielsweise hinter dem Zuhörer einen größeren Abstand zwischen den Schallwandlern zu wählen. Die Module könnten auch zu einer körperlichen Struktur, beispielsweise einem Würfel oder Quader, zusammengefügt werden, in denen virtuelle Schallquellen nach außen strahlen.

[0031] Mit dem dezentralen Aufbau lassen sich so auch sehr viele sehr kleine Schallwandler ansteuern. Zukünftig könnten sich der Anwendung von MEMs [8] in Verbindung mit Wellenfeldsystemen neue Perspektiven eröffnen. Die integrierten Schallwandler lassen sich in großer Zahl auf einer gemeinsamen Trägerbasis mit anderen integrierten Bauelementen aufbauen. Diese Fläche könnte dann tatsächlich wie ein Vorhang Wellenfronten erzeugen, die völlig frei von den Aliasingeffekten ist, die bei den vom theoretischen Ansatz der Wellenfeldsynthese abweichenden, relativ großen Elementarwellen herkömmlicher Schallwandler unvermeidlich sind.

[0032] Auf dem Träger der Bauelemente wären dann wieder, analog zum modularen Aufbau, Gruppen von Schallwandlern zu bilden, die von einem verteilten System aus Ansteuereinheiten versorgt werden. Zukünftig könnten solche Mikrostrukturen für eine kombinierte Reproduktion von auditiven und visuellen Informationen genutzt werden.

Detaillierte Beschreibung eines Ausführungsbeispiels

[0033] Die Vorrichtung ist in Fig. 1 und 2 dargestellt. Sie soll anhand dieser Zeichnungen erläutert werden.

[0034] Fig. 1 zeigt eine modular aufgebaute Vorrichtung aus Schallwandlern nach dem Prinzip der Wellenfeldsynthese (1). Mit ihr sollen virtuelle Schallquellen (2) dargestellt werden, deren Position in einem Koordinatensystem bezüglich des Koordinatenursprungs (3) gegeben ist. Der Koordinatenursprung kann an der Position eines Zuhörers im Wiedergaberaum sein, sie kann aber auch beliebig festgelegt werden. In jedem Fall muss der Vektor eines Bezugspunktes (4) der Vorrichtung aus Schallwandlern zu diesem Koordinatenursprung bekannt sein. Dann ist der jeweilige Bezugspunkt in den einzelnen der Module (5) in der Vorrichtung aus Schallwandlern durch die Platzierung des Moduls im System

und die Kantenlänge der Module gegeben. Im Modul ist die Position jedes einzelnen Schallwandlers (6) zu jedem einzelnen Schallwandler gegeben.

[0035] Weil in dem Koordinatensystem dann die Positionen der virtuellen Schallquellen zum Koordinatensprung (3) und alle Vektoren der Bezugspunkte bis hin zu jedem einzelnen Schallwandler bekannt sind, kann durch Addition der einzelnen Vektoren die Position jeder einzelnen virtuellen Schallquelle zu jedem einzelnen Schallwandler bestimmt werden.

[0036] In Fig.2 ist dargestellt, dass alle Audiosignale und Daten zu jedem Modul geführt werden. Das kann über separate Leitungen (1) und (2) geschehen oder alle Informationen können auch über ein gemeinsames Protokoll zu den Baugruppen übertragen werden. Die Datenmenge ist vergleichsweise gering, weil nur die Position der virtuellen Quellen im Koordinatensystem und ihre Zuordnung zu den Audiosignalen übertragen werden muss. Das ermöglicht ein Update der Positionen in sehr kurzen Zeitintervallen. Entsprechend schnell können für die wenigen Schallwandler im Modul die aus allen entsprechend der Modulposition in der Anordnung aus Schallwandlern verzögerten und aufaddierten Signale aller Eingangsquellen an den entsprechenden Endverstärker geführt werden.

[0037] Bei den hier beschriebenen Vorrichtungen aus Schallwandlern nach dem Prinzip der Wellenfeldsynthese zur Reproduktion von Schallereignissen muss nicht auf die psychoakustisch bedingte Bildung von Phantom-schallquellen zwischen Lautsprechern zurückgegriffen werden, sondern das Schallfeld wird physikalisch rekonstruiert. Aus dem Audiosignal selbst (Inhalt) und Daten zu seiner Gestalt (Form) werden nach Huygens Prinzip Wellenfronten aus Elementarwellen rekonstruiert. Es entstehen virtuelle Schallquellen, die sich physikalisch nicht von der Wellenfront der realen Schallquelle unterscheiden.

[0038] Das Audiosignal wird dabei auf der Wiedergabeseite in einem Renderer für jede Elementarwelle in die räumliche Impulsantwort des Aufnahmeraumes gefaltet [2].

[0039] Für eine korrekte Reproduktion sollten die Ausgangspunkte der Elementarwellen eng beieinander liegen. Die virtuellen Schallquellen können nur im Bereich der Anordnung aus Schallwandlern entstehen. Deshalb wird ihre Zahl sehr groß, wenn eine zweidimensionale Schallwandlerfläche aufgebaut wird.

[0040] Damit steigen die Anforderungen an den Renderer vorbekannte Systeme, die Ansteuerung einer großen Zahl von Schallwandlern bedingt einen hohen Rechenaufwand. In der Praxis wurde das Prinzip der Wellenfeldsynthese deshalb in der Regel auf eine horizontale Schallwandler-Reihe reduziert. In diesen Systemen wird die Wellenfeldsynthese meist auf die horizontale Ebene des Zuhörers reduziert, die dritte Dimension geht in der Reproduktion der Schallereignisse verloren.

[0041] Mit der erfindungsgemäßen Lösung kann die notwendige Rechenleistung jedoch dezentral verteilt

werden, weil die zwischen den Teilsystemen zu übertragende Datenmenge nicht mit der Zahl der Schallwandler ansteigt. Das System wird damit frei skalierbar.

[0042] Dies ermöglicht sogar beliebig große, zweidimensionale Vorrichtungen aus Schallwandlern nach dem Prinzip der Wellenfeldsynthese aufzubauen, die schnelle Ortsveränderungen der virtuellen Schallquellen mit den damit verbundenen Dopplereffekten ohne Artefakte realisieren können.

[0043] Gemäß einem Ausführungsbeispiel einer dezentral aufgebaute Vorrichtung aus Schallwandlern nach dem Prinzip der Wellenfeldsynthese wird die Synthese der Wellenfronten aus den Audiosignalen und den dazugehörigen Daten für die in einzelnen Baugruppen enthaltenen Schallwandler innerhalb der jeweiligen Baugruppe ausgeführt, wobei die geometrische Position eines Bezugspunktes innerhalb des Koordinatensystems für den modellbasierten Ansatz der Wellenfeldsynthese für jede einzelne Baugruppe durch ihre Platzierung in der Anordnung aus Schallwandlern und die Kantenlänge der einzelnen Baugruppen bestimmt ist und die Position jedes einzelnen Schallwandlers in diesem Koordinatensystem durch seine Anordnung zu diesem Bezugspunkt der Baugruppe definiert ist, so dass sich allein aus der Anordnung der Baugruppen in der Anordnung aus Schallwandlern die Position jedes einzelnen Schallwandlers im Koordinatensystem aus der Vektoraddition zum jeweils übergeordneten Bezugspunkt bestimmen lässt.

[0044] Gemäß einer Weiterbildung sind die Baugruppen von einem Modulgehäuse umschlossen oder werden aus gleich großen Segmenten in einer Struktur von Bauelementen gebildet.

[0045] Typischerweise ist die Anordnung aus Schallwandlern in ihrer Größe frei skalierbar, weil die Rechenleistung in der Zentraleinheit nicht mit der Zahl der Schallwandler im System steigt.

[0046] Gemäß noch einer Weiterbildung werden alle Audiosignale und die Daten für die Synthese der Wellenfronten zu allen Baugruppen der Vorrichtung geführt, wobei in jeder Baugruppe die Daten verarbeitet werden, die sich aus der Position der jeweiligen Baugruppe innerhalb der Anordnung aus Schallwandlern ergeben.

[0047] Typischerweise ist die Position der einzelnen Schallwandler innerhalb einer Baugruppe in Bezug auf einen festen Bezugspunkt der Baugruppe in der Baugruppe gespeichert.

[0048] Gemäß noch einer Weiterbildung wird die Position eines festen Bezugspunktes jeder Baugruppe zu der Position eines Bezugspunktes der Vorrichtung aus Schallwandlern dadurch ermittelt, dass der Baugruppe mitgeteilt wird an welcher Position sie innerhalb der Vorrichtung aus Schallwandlern eingebaut ist und dass sie daraus mit Hilfe der gespeicherten Abmessungen der einzelnen Baugruppen, die auch als Modul ausgeführt sein können, die Position ihres Bezugspunktes zu dem zentralen Bezugspunkt der Vorrichtung aus Schallwandlern ermitteln kann.

[0049] Gemäß der erfindungsgemäßen Lösung sind die Baugruppen unterschiedlich dicht mit Schallwandlern bestückt. Damit lässt sich in den für die menschliche Wahrnehmung von Schallereignissen weniger wichtigen Reproduktionsbereichen der Aufwand reduzieren.

[0050] Die Baugruppen können in einer geschlossenen Ebene, geschlossenen Reihe aufgebaut sein.

[0051] Die Baugruppen können aber auch so aufgebaut sein, dass sie nicht in einer geschlossenen Ebene oder geschlossenen Reihe angeordnet sind.

[0052] Gemäß noch einer Weiterbildung sind die Schallwandler Teilflächen zugeordnet, die einen Körper bilden können, der die Wellenfronten in einem gemeinsamen System in verschiedene Richtungen abstrahlen kann.

[0053] Gemäß noch einer Weiterbildung ist auf dem gleichen Trägersystem, das die Schallwandler trägt, auch ein System zur Bildreproduktion aufgebracht.

[0054] Gemäß noch einer Weiterbildung sind die Baugruppen oder Module in vormontierten Einheiten zusammengefasst. Dies ermöglicht einen schnelleren Aufbau des Systems. Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel weist eine dezentral aufgebaute Vorrichtung aus Schallwandlern nach dem Prinzip der Wellenfeldsynthese mehrere Baugruppen auf, die jeweils mehrere Schallwandler und eine Baugruppensteuerung aufweisen,

[0055] wobei jede Baugruppensteuerung eingerichtet ist, Ansteuersignale für die Schallwandler ihrer Baugruppe aus Audiosignalen und dazugehörigen Daten zur Form für die Synthese der Wellenfronten zu erzeugen.

[0056] Dieser Aufbau ermöglicht auch, dass auf einem Trägersystem, das die Schallwandler trägt, auch ein System zur Bildreproduktion aufgebracht ist.

[0057] Die Merkmale der hierin beschriebenen verschiedenen Ausführungsformen können auch miteinander kombiniert werden.

Literaturliste

[0058]

[1] Berkhout, A.J. (1988): A holographic approach to acoustic control'. Journal of the Audio Engineering Society, Vol.36, No.12, December 1988, pp.977-995.

[2] http://www.hauptmikrofon.de/theile/WFS_Theile_VDT-Magazin_2_2005.pdf

[3] DE 10 2005 001 395 A1

[4] William Francis Wolcott IV: Wave Field Synthesis with Real-time Control

[5] Dipl. Ing (FH) Rene Rodigast, Fraunhofer - Institut für Digitale Medientechnologie IDMT: Sprachwiedergabe oder Konzertakustik - Akustische Raumsimulation in der 3D-Beschallung, 8.0 E 37

Messe Frankfurt/ Prolight+Sound 2013

[6] http://iosono-sound.com/assets/files/IOSONO_IPC100_brochure.pdf

[7] <http://wfsynth.sourceforge.net/Thesis.pdf>

[8] John J. Neumann, Jr. and Kaigham J. Gabriel, CMOS-MEMS Membrane for Audio-Frequency Acoustic Acuation, Electrical and Computer Engineering Dept., Carnegie Mellon University, 2001, pp. 236-239, XP-002240602.

15 Patentansprüche

1. Dezentral aufgebaute Vorrichtung aus Schallwandlern nach dem Prinzip der Wellenfeldsynthese, aufweisend mehrere Baugruppen, die jeweils mehrere Schallwandler und eine Baugruppensteuerung aufweisen, wobei jede Baugruppensteuerung eingerichtet ist, mittels eines modellbasierten Ansatzes eine Synthese der Wellenfronten aus Audiosignalen und den dazugehörigen Daten zur Form für die in den Baugruppen enthaltenen Schallwandler innerhalb der jeweiligen Baugruppe auszuführen und die Schallwandler innerhalb der jeweiligen Baugruppe mit Ansteuersignalen anzusteuern, die der Synthese entsprechen, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Baugruppen unterschiedlich dicht mit den Schallwandlern bestückt sind.
2. Dezentral aufgebaute Vorrichtung aus Schallwandlern nach Anspruch 1, wobei die Baugruppensteuerungen eine jeweilige geometrische Position (6) eines Bezugspunktes (5) der Baugruppe innerhalb eines Koordinatensystems für den modellbasierten Ansatz der Wellenfeldsynthese verwendet, die geometrische Position (6) für jede einzelne Baugruppe durch ihre Platzierung in der Anordnung aus Schallwandlern und die Kantenlänge der einzelnen Baugruppen bestimmt ist und / oder die geometrische Position (6) jedes einzelnen Schallwandlers in diesem Koordinatensystem durch seine Anordnung zu diesem Bezugspunkt (5) der Baugruppe definiert ist, so dass sich allein aus der Anordnung der Baugruppen in der Anordnung aus Schallwandlern die Position jedes einzelnen Schallwandlers im Koordinatensystem aus einer Vektoraddition zum jeweiligen übergeordneten Bezugspunkt (6) bestimmen lässt.
3. Dezentral aufgebaute Vorrichtung aus Schallwandlern nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Baugruppen von einem jeweiligen Modulgehäuse umschlossen sind und / oder dass sie aus gleich großen Segmenten in einer Struktur von Bau-

elementen gebildet werden.

4. Dezentral aufgebaute Vorrichtung aus Schallwandlern nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Anordnung aus Schallwandlern in ihrer Größe frei skalierbar ist. 5
5. Dezentral aufgebaute Vorrichtung aus Schallwandlern nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** alle Audiosignale und die dazugehörigen Daten für die Synthese der Wellenfronten zu allen Baugruppen der Vorrichtung geführt werden, wobei in jeder Baugruppe die Daten verarbeitet werden, die sich aus der Position der jeweiligen Baugruppe innerhalb der Anordnung aus Schallwandlern ergeben. 10
6. Dezentral aufgebaute Vorrichtung aus Schallwandlern nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Position der einzelnen Schallwandler innerhalb einer Baugruppe in Bezug auf einen festen Bezugspunkt der Baugruppe in der Baugruppe gespeichert ist. 15
7. Dezentral aufgebaute Vorrichtung aus Schallwandlern nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie die Position eines festen Bezugspunktes jeder Baugruppe zu der Position eines Bezugspunktes der Vorrichtung aus Schallwandlern dadurch ermitteln kann, das der Baugruppe mitgeteilt wird an welcher Position sie innerhalb der Vorrichtung aus Schallwandlern eingebaut ist und das sie daraus mit Hilfe der gespeicherten Abmessungen der einzelnen Baugruppen, die auch als Modul ausgeführt sein können, die Position ihres Bezugspunktes zu dem zentralen Bezugspunkt der Vorrichtung aus Schallwandlern ermitteln kann. 20
8. Dezentral aufgebaute Vorrichtung aus Schallwandlern nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Baugruppen auch in einer nicht-geschlossenen Ebene oder in einer nicht-geschlossenen Reihe anordenbar sind. 25
9. Dezentral aufgebaute Vorrichtung aus Schallwandlern nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Schallwandler Teilflächen zugeordnet werden können, die die Wellenfronten jeweils in eine verschiedene Richtung abstrahlen können. 30
10. Dezentral aufgebaute Vorrichtung aus Schallwandlern einem der vorhergehenden Ansprüche, 35

dadurch gekennzeichnet, dass Baugruppe oder Module in vormontierten Einheiten zusammengefasst sind. 40

Claims

1. A decentrally structured device comprising sound transducers and operable according to the principle of wave field synthesis, comprising a plurality of assembly units each comprising a plurality of sound transducers and an assembly control unit, wherein each assembly control unit is configured to use a model-based approach to carry out, within the respective assembly unit, a synthesis of wave fronts for the sound transducers in the assembly unit from audio signals and associated data for their form, and to drive the sound transducers within the respective assembly unit with control signals corresponding to the synthesis, **characterised in that** a density with which the assembly units are equipped with sound transducers varies. 45
2. The decentrally structured device according to claim 1, wherein the assembly control units use a respective geometric position (6) of a reference point (5) of the assembly unit within a coordinate system for the model-based approach of the wave field synthesis, wherein the geometric position (6) for each individual assembly unit is determined by its position in the arrangement of the sound transducers and the edge length of the individual assembly units, and / or wherein the geometric position (6) of each individual sound transducer in the coordinate system is defined by its arrangement relative to the reference point (5) of the assembly unit, so that the position of each individual sound transducer in the coordinate system can be determined solely from the arrangement of the assembly units in the arrangement of the sound transducers by a vector addition to a respective superordinate reference point (6). 50
3. The decentrally structured device according to any preceding claim, **characterised in that** the assemblies are enclosed by a respective module housing and / or that they are formed from segments of the same size in a structure of components. 55
4. The decentrally structured device according to any preceding claim, **characterised in that** the arrangement of sound transducers is freely scalable in size.
5. The decentrally structured device according to any preceding claim, **characterised in that** all audio signals and the as-

sociated data for the synthesis of the wavefronts are delivered to all assembly units of the device, each assembly unit processing the data derived from the position of the respective assembly unit within the arrangement of the sound transducers.

6. The decentrally structured device according to any preceding claim,
characterised in that the position of the individual sound transducers is stored within an assembly unit with respect to a fixed reference point of the assembly unit.
7. The decentrally structured device according to any preceding claim,
characterised in that the device can determine the position of a fixed reference point of each assembly unit relative to the position of a central reference point of the device comprising sound transducers by communicating to the assembly unit the position in which it was installed in the device comprising sound transducer and the assembly unit is able to determine the position its reference point relative to a central reference point of the device comprising sound transducers using the position in which it was installed and stored dimensions of the individual assembly units, which may also be designed as modules.
8. The decentrally structured device according to any preceding claim,
characterised in that the assembly units can also be arranged in a non-closed plane or in a non-closed row.
9. The decentrally structured device according to any preceding claim,
characterised in that the sound transducers can be allocated to partial surfaces, wherein each of the partial surfaces can radiate wavefronts in a different direction.
10. The decentrally structured device according to any preceding claim,
characterised in that the assembly units or modules are combined in pre-assembled units.

Revendications

1. Dispositif à structure décentralisée composé de transducteurs acoustiques selon le principe de la synthèse de champ d'ondes, comprenant plusieurs ensembles qui comprennent respectivement plusieurs transducteurs acoustiques et un dispositif de commande d'ensemble, dans lequel chaque dispositif de commande d'ensemble est agencé pour réaliser, au moyen d'une approche par modèle, une synthèse des fronts d'on-

de à partir de signaux audio et des données de forme associées pour les transducteurs acoustiques contenus dans les ensembles à l'intérieur de l'ensemble respectif et pour commander les transducteurs acoustiques à l'intérieur de l'ensemble respectif avec des signaux de commande qui correspondent à la synthèse,

caractérisé en ce

que les ensembles sont équipés des transducteurs acoustiques selon une densité variable.

2. Dispositif à structure décentralisée composé de transducteurs acoustiques selon la revendication 1, dans lequel le dispositif de commande d'ensemble utilise une position géométrique respective (6) d'un point de référence (5) de l'ensemble dans un système de coordonnées pour l'approche par modèle de la synthèse de champ d'ondes, la position géométrique (6) de chaque ensemble individuel est déterminée par son placement dans l'agencement de transducteurs acoustiques et la longueur de bord des différents ensembles et/ou la position géométrique (6) de chaque transducteur acoustique individuel est définie dans ce système de coordonnées par son agencement par rapport à ce point de référence (5) de l'ensemble, de sorte que, rien qu'à partir de l'agencement des ensembles dans l'agencement composé de transducteurs acoustiques, la position de chaque transducteur acoustique individuel dans le système de coordonnées se détermine à partir d'une addition vectorielle au point de référence (6) supérieur respectif.
3. Dispositif à structure décentralisée composé de transducteurs acoustiques selon l'une des revendications précédentes,
caractérisé en ce
que les ensembles sont entourés d'un boîtier de module respectif et/ou sont formés de segments de mêmes dimensions dans une structure de composants.
4. Dispositif à structure décentralisée composé de transducteurs acoustiques selon l'une des revendications précédentes,
caractérisé en ce
que la taille de l'agencement composé de transducteurs acoustiques est librement modulable.
5. Dispositif à structure décentralisée composé de transducteurs acoustiques selon l'une des revendications précédentes,
caractérisé en ce
que tous les signaux audio et les données associées sont acheminés vers tous les ensembles du dispositif pour la synthèse des fronts d'onde, dans lequel, dans chaque ensemble, sont traitées les données résultant de la position de l'ensemble respectif au sein de l'agencement composé de transducteurs

acoustiques.

6. Dispositif à structure décentralisée composé de transducteurs acoustiques selon l'une des revendications précédentes, 5
caractérisé en ce
que la position des différents transducteurs acoustiques au sein d'un ensemble est mémorisée par rapport à un point de référence fixe de l'ensemble dans l'ensemble. 10
7. Dispositif à structure décentralisée composé de transducteurs acoustiques selon l'une des revendications précédentes, 15
caractérisé en ce
qu'il peut déterminer la position d'un point de référence fixe de chaque ensemble par rapport à la position d'un point de référence du dispositif composé de transducteurs acoustiques, en informant l'ensemble de la position à laquelle il est installé à l'intérieur du dispositif composé de transducteurs acoustiques et en déterminant à partir de là la position de son point de référence par rapport au point de référence central du dispositif composé de transducteurs acoustiques à l'aide des dimensions stockées des différents ensembles, qui peuvent également être mis en oeuvre sous forme de module. 20 25
8. Dispositif à structure décentralisée composé de transducteurs acoustiques selon l'une des revendications précédentes, 30
caractérisé en ce
que les ensembles peuvent également être disposés dans un plan non fermé ou dans une rangée non fermée. 35
9. Dispositif à structure décentralisée composé de transducteurs acoustiques selon l'une des revendications précédentes, 40
caractérisé en ce
que les transducteurs acoustiques peuvent être affectés à des surfaces partielles qui peuvent rayonner les fronts d'onde respectivement dans une direction différente. 45
10. Dispositif à structure décentralisée composé de transducteurs acoustiques selon l'une des revendications précédentes, 50
caractérisé en ce
que les ensembles ou modules sont regroupés dans des unités prémontées. 50

55

Figuren

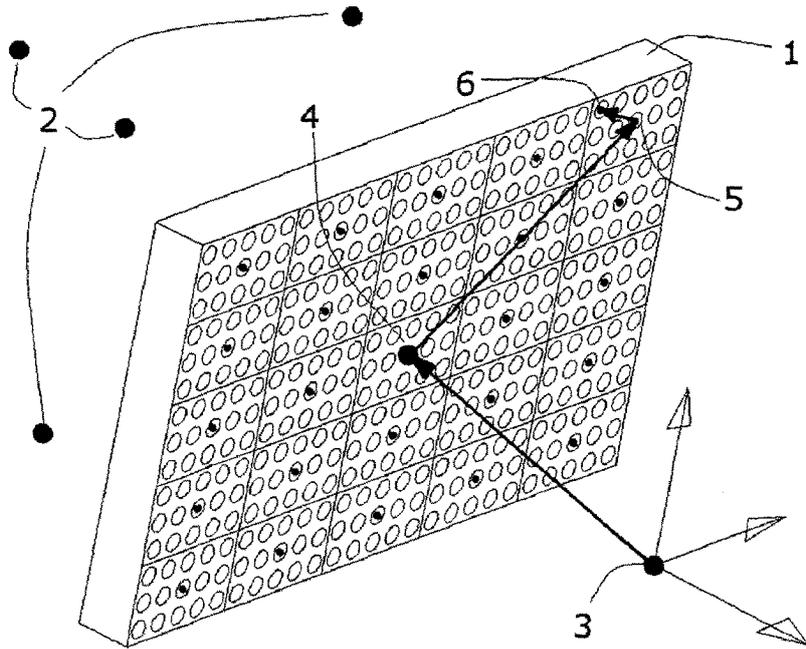


Fig.1

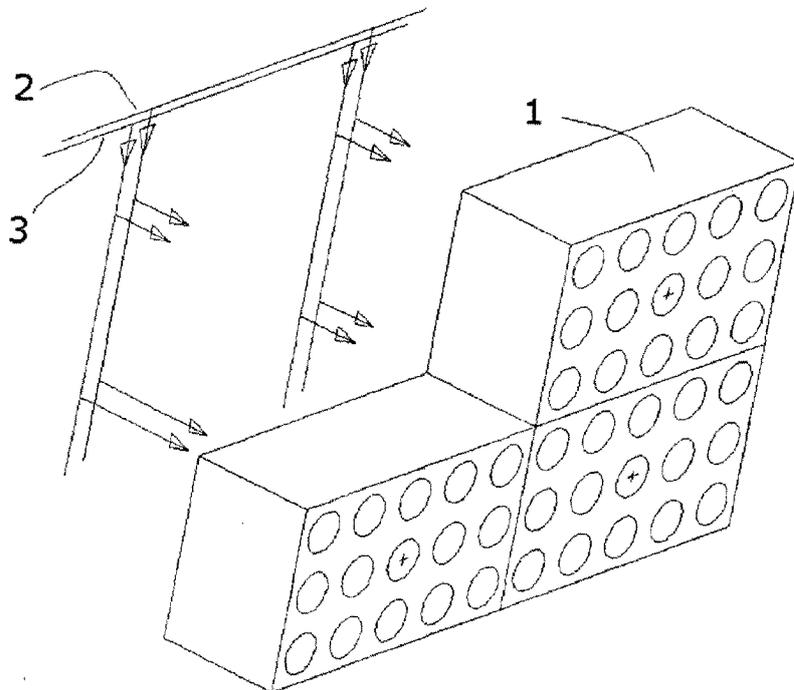


Fig.2

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 102005001395 A1 [0058]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **MAUER STEPHAN et al.** Design and Realization of a Reference Loudspeaker Panel for Wave Field Synthesis. *AES CONVENTION*, Mai 2011, vol. 130 [0004]
- **BERKHOUT, A.J.** A holographic approach to acoustic control. *Journal of the Audio Engineering Society*, Dezember 1988, vol. 36 (12), 977-995 [0058]
- CMOS-MEMS Membrane for Audio-Frequency Acoustic Acuation. **JOHN J. NEUMANN, JR ; KAI-GHAM J. GABRIEL.** Electrical and Computer Engineering Dept. Carnegie Mellon University, 2001, 236-239 [0058]