

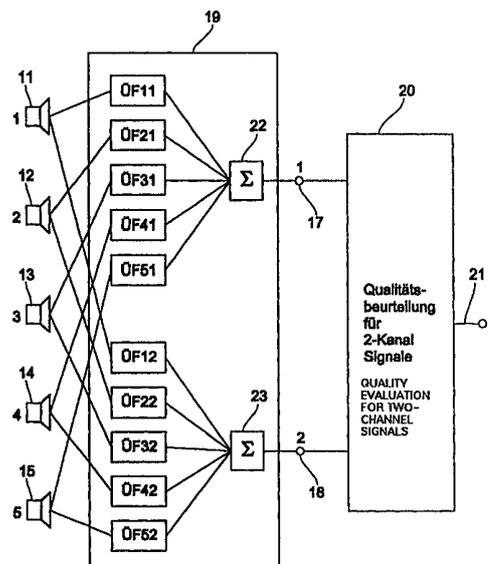
<p>(51) Internationale Patentklassifikation <sup>7</sup> : <b>H04R</b></p>	<b>A2</b>	<p>(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: <b>WO 00/44196</b></p> <p>(43) Internationales Veröffentlichungsdatum: 27. Juli 2000 (27.07.00)</p>
<p>(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP99/09979</p> <p>(22) Internationales Anmeldedatum: 15. Dezember 1999 (15.12.99)</p> <p>(30) Prioritätsdaten: 199 02 317.4      21. Januar 1999 (21.01.99)      DE</p> <p>(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten ausser US): FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V. [DE/DE]; Leonrodstrasse 54, D-80636 München (DE).</p> <p>(72) Erfinder; und (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): SPORER, Thomas [DE/DE]; Wilhelmshavenerstrasse 15, D-90766 Fürth (DE). BITTO, Roland [DE/DE]; Alfons-Stauder-Strasse 77, D-90453 Nürnberg (DE). BRANDENBURG, Karlheinz [DE/DE]; Haagstrasse 32, D-91054 Erlangen (DE).</p> <p>(74) Anwalt: SCHOPPE, Fritz; Schoppe, Zimmermann &amp; Stöckeler, Postfach 71 08 67, D-81458 München (DE).</p>	<p>(81) Bestimmungsstaaten: US, europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).</p> <p><b>Veröffentlicht</b> <i>Ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts.</i></p>	

(54) Title: SYSTEM AND METHOD FOR EVALUATING THE QUALITY OF MULTI-CHANNEL AUDIOSIGNALS

(54) Bezeichnung: VORRICHTUNG UND VERFAHREN ZUR QUALITÄTSBEURTEILUNG VON MEHRKANALIGEN AUDIOSIGNALEN

(57) Abstract

The invention relates to a system for evaluating the quality of an audio test signal derived from an audio reference signal by coding and decoding. The audio test signal and the audio reference signal each present a plurality of channels. The system comprises a device (19) for converting the audio reference signal into a first audio reference sum signal at a first reference point (17) and into a second audio reference sum signal at a second reference point (18) and for converting the audio test signal into a first audio test sum signal at the first reference point (17) and into a second audio test sum signal at the second reference point (18). The audio reference sum signals and the audio test sum signals at the first and second reference points (17, 18) consist of an overlay of the corresponding channels which can be emitted by most loudspeakers (11-15) and are weighted by a transmission function (UF11 - UF52) between each loudspeaker and its corresponding reference point. The invention also relates to a device (20) for evaluating the quality of the audio test sum signals by taking into consideration the audio reference sum signals so as to indicate the quality of the audio test signal. The system provided for by the invention makes it possible to take into consideration actual spaces and any number of channels of the audio test signal in an evaluation of the quality of a hearing-adapted coding/decoding method.



### (57) Zusammenfassung

Eine Vorrichtung zur Qualitätsbeurteilung eines Audiotestsignals, das durch Codierung und Decodierung von einem Audioreferenzsignal abgeleitet ist, wobei das Audiotestsignal und das Audioreferenzsignal jeweils eine Mehrzahl von Kanälen aufweisen, umfaßt eine Einrichtung (19) zum Umwandeln des Audioreferenzsignals in ein erstes Audioreferenzsummensignal an einem ersten Bezugspunkt (17) und in ein zweites Audioreferenzsummensignal an einem zweiten Bezugspunkt (18) und zum Umwandeln des Audiotestsignals in ein erstes Audiotestsummensignal an dem ersten Bezugspunkt (17) und in ein zweites Audiotestsummensignal an dem zweiten Bezugspunkt (18), wobei die Audioreferenzsummensignale und die Audiotestsummensignale an dem ersten und dem zweiten Bezugspunkt (17, 18) eine Überlagerung der jeweiligen Kanäle, die von der Mehrzahl von Lautsprechern (11 – 15) ausgebar sind, gewichtet mit einer jeweiligen Übertragungsfunktion (ÜF11 – ÜF52) zwischen dem jeweiligen Lautsprecher und dem entsprechenden Bezugspunkt sind, und eine Einrichtung (20) zur Qualitätsbeurteilung der Audiotestsummensignale unter Berücksichtigung der Audioreferenzsummensignale, um eine Anzeige der Qualität des Audiotestsignals zu liefern. Die erfindungsgemäße Vorrichtung erlaubt die Berücksichtigung realer Räume und die Berücksichtigung beliebig vieler Kanäle des Audiotestsignals, um ein bestimmtes Codier/Decodierverfahren gehörangepaßt in seiner Qualität zu beurteilen.

### LEDIGLICH ZUR INFORMATION

Codes zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

AL	Albanien	ES	Spanien	LS	Lesotho	SI	Slowenien
AM	Armenien	FI	Finnland	LT	Litauen	SK	Slowakei
AT	Österreich	FR	Frankreich	LU	Luxemburg	SN	Senegal
AU	Australien	GA	Gabun	LV	Lettland	SZ	Swasiland
AZ	Aserbaidschan	GB	Vereinigtes Königreich	MC	Monaco	TD	Tschad
BA	Bosnien-Herzegowina	GE	Georgien	MD	Republik Moldau	TG	Togo
BB	Barbados	GH	Ghana	MG	Madagaskar	TJ	Tadschikistan
BE	Belgien	GN	Guinea	MK	Die ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien	TM	Turkmenistan
BF	Burkina Faso	GR	Griechenland	ML	Mali	TR	Türkei
BG	Bulgarien	HU	Ungarn	MN	Mongolei	TT	Trinidad und Tobago
BJ	Benin	IE	Irland	MR	Mauretanien	UA	Ukraine
BR	Brasilien	IL	Israel	MW	Malawi	UG	Uganda
BY	Belarus	IS	Island	MX	Mexiko	US	Vereinigte Staaten von Amerika
CA	Kanada	IT	Italien	NE	Niger	UZ	Usbekistan
CF	Zentralafrikanische Republik	JP	Japan	NL	Niederlande	VN	Vietnam
CG	Kongo	KE	Kenia	NO	Norwegen	YU	Jugoslawien
CH	Schweiz	KG	Kirgisistan	NZ	Neuseeland	ZW	Zimbabwe
CI	Côte d'Ivoire	KP	Demokratische Volksrepublik Korea	PL	Polen		
CM	Kamerun	KR	Republik Korea	PT	Portugal		
CN	China	KZ	Kasachstan	RO	Rumänien		
CU	Kuba	LC	St. Lucia	RU	Russische Föderation		
CZ	Tschechische Republik	LI	Liechtenstein	SD	Sudan		
DE	Deutschland	LK	Sri Lanka	SE	Schweden		
DK	Dänemark	LR	Liberia	SG	Singapur		
EE	Estland						

## Vorrichtung und Verfahren zur Qualitätsbeurteilung von mehrkanaligen Audiosignalen

### Beschreibung

Seit der Standardisierung gehörangepaßter digitaler Codierverfahren werden dieselben in steigendem Maße eingesetzt. Beispiele hierfür sind die digitale Kompaktkassette, die Minidisk, der digitale terrestrische Rundfunk und die digitale Videodisk. Bei der Codierung mittels gehörangepaßter Codierverfahren können jedoch Kunstprodukte oder Artefakte auftreten, die in der analogen Tonsignalverarbeitung nicht aufgetreten sind.

Zur Bewertung bzw. Beurteilung eines bestimmten Codierers sind in der Vergangenheit Hörtests mit Testpersonen durchgeführt worden. Obwohl die Hörtests im Mittel relativ zuverlässige Ergebnisse liefern, besteht dennoch eine subjektive Komponente. Weiterhin sind Hörtest mit einer bestimmten Anzahl von Testpersonen relativ aufwendig und daher relativ teuer. Daher wurden Meßverfahren zur gehörangepaßten Bewertung von Audiosignalen entwickelt.

Ein solches Meßverfahren ist beispielsweise in der DE 196 47 399 C1 beschrieben. Das darin beschriebene Verfahren zur gehörangepaßten Qualitätsbeurteilung modelliert alle nicht-linearen Gehöreffekte sowohl auf ein Referenzsignal als auch auf ein Testsignal. Die gehörangepaßte Qualitätsbeurteilung wird mittels eines Vergleichs in dem Gehörschneckenbereich ("Cochlear Domain") durchgeführt. Dabei werden die Erregungen im Ohr durch das Testsignal bzw. durch das Referenzsignal verglichen. Zu diesem Zweck werden sowohl das Audioreferenzsignal als auch das Audiotestsignal durch eine Filterbank in ihre Spektralzusammensetzungen zerlegt. Durch eine große Anzahl von Filtern, welche sich frequenzmäßig überlappen, wird eine ausreichende sowohl zeitliche als auch frequenzmäßige Auflösung sichergestellt. Somit kann ein

Mono-Audiotestsignal, das durch Codierung und anschließende Decodierung von einem Audioreferenzsignal abgeleitet ist, in seiner Qualität beurteilt werden.

Das in der DE 196 47 399 D1 beschriebene Meßverfahren erlaubt ferner die Qualitätsbeurteilung von Stereosignalen, d. h. zweikanaligen Signalen. Hierzu wird eine nichtlineare Vorverarbeitung, die Transienten frequenzselektiv hervorhebt und stationäre Signale verringert, mit dem linken und rechten Kanal des Audiotestsignals bzw. des Audioreferenzsignals durchgeführt. Insbesondere werden verschiedene Detektionen der Fehlerwahrscheinlichkeit mit dem linken Kanal des Audioreferenzsignals und mit dem linken Kanal des Audiotestsignals als Eingangssignale, mit dem rechten Kanal des Audioreferenzsignals und mit dem rechten Kanal des Audiotestsignals als Eingangssignale, mit dem linken Kanal des vorverarbeiteten Audioreferenzsignals und mit dem linken Kanal des vorverarbeiteten Audiotestsignals als Eingangssignale und mit dem rechten Kanal des vorverarbeiteten Audioreferenzsignals und mit dem rechten Kanal des vorverarbeiteten Audiotestsignals als Eingangssignale durchgeführt, um ein Maß für die Qualität des stereophonen Audiotestsignals zu erhalten.

Nachteilig an dem bekannten Verfahren zur gehörangepaßten Qualitätsbeurteilung von Audiosignalen ist die Tatsache, daß die Stereofähigkeit lediglich auf die Kopfhörerwiedergabe begrenzt ist. Anders ausgedrückt wird das Audiotestsignal, das in das Ohr einer Hörers eintritt, mit dem Audioreferenzsignal, das in das Ohr eines Hörers eintritt, verglichen. Dies bedeutet, daß Effekte, die durch einen Raum hervorgerufen werden, wie z. B. Reflexionen an Wänden, Decke und Boden, Mehrfachreflexionen, Dämpfungen, usw. nicht berücksichtigt werden. Ferner können bekannte Verfahren zur Qualitätsbeurteilung keine Richtungscharakteristik des menschlichen Ohrs berücksichtigen, d. h. es spielt keine Rolle, ob ein Signal von hinten, vorne oder der Seite kommt. Bekannte Meßverfahren arbeiten lediglich für Kopfhörerwiedergabe, bei der das Schallsignal aus dem Kopfhörerlautsprecher, der

üblicherweise direkt am Ohr angeordnet ist, austritt und in das Ohr bzw. in das Verfahren zur Qualitätsbeurteilung eintritt.

Ein weiterer Nachteil des bekannten Verfahrens besteht darin, daß bisher die gehörangepaßte Qualitätsbeurteilung von immer mehr aufkommenden Mehrkanalsignalen, wie z. B. 5-Kanal-Signalen, die unter dem Stichwort "Dolby Surround" bekannt sind, gänzlich unmöglich ist.

Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein verbessertes Konzept zur Qualitätsbeurteilung von Audiosignalen zu schaffen, das Raumeffekte mitberücksichtigt.

Diese Aufgabe wird durch eine Vorrichtung zur Qualitätsbeurteilung nach Patentanspruch 1 und durch ein Verfahren zur Qualitätsbeurteilung nach Patentanspruch 14 gelöst.

Der vorliegenden Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, daß dem menschlichen Hörer, um den es letztendlich geht, trotz des Vorhandenseins von Signalen mit beliebig vielen Kanälen immer nur zwei Ohren zur Verfügung stehen. Das Richtungshören wird aufgrund der unterschiedlichen Impulsantworten für unterschiedliche Einfallrichtungen von Schallsignalen in das menschliche Ohr bewirkt. Die unterschiedlichen Impulsantworten für unterschiedliche Einfallrichtungen werden in der Technik als Kopf-bezogene Übertragungsfunktionen oder "Head Related Transfer Functions" bezeichnet. Im realen Fall treten nicht nur die direkten Schallwege zwischen Ohr und Lautsprecher sondern zusätzlich auch Reflexionen an den Wänden, der Decke und dem Boden auf. Dies kann als Raumimpulsantwort zusammengefaßt werden. Die HRTFs und die Raumimpulsantwort zusammen führen zu einer Klangveränderung, die erfindungsgemäß auch von Meßsystemen ausgewertet werden können, welche keine explizite Modellierung binauraler Effekte, wie z. B. unterschiedliche Maskierungsschwellen für binaurale Signale im Vergleich zu monoauralen Signalen, Wahrnehmung von Phasen-Verschiebungen, Präzedenzeffekte usw., auf-

weisen.

Bei der Bewertung von Audiosignalen mittels Hörtests werden in der Regel standardisierte Abhörräume, die beispielsweise nach ITU-R BS.1116 standardisiert sind, verwendet. Dabei ist die Größe, die Lautsprecheranordnung und die Nachhallzeit weitgehend festgelegt. Erfindungsgemäß können bei der erweiterten Qualitätsbeurteilung von Audiosignalen sowohl die Kopf-bezogenen Übertragungsfunktionen (HRTFs) als auch Raumimpulsantworten berücksichtigt werden. Ferner ist es für die erfindungsgemäße gehörangepaßte Qualitätsbeurteilung unerheblich, ob ein Signal ein Stereosignal ist, das von zwei Lautsprechern für den linken bzw. rechten Kanal ausgestrahlt wird, oder ob das Signal ein mehrkanaliges Signal ist, das beispielsweise fünf Kanäle aufweist und von fünf Lautsprechern ausgestrahlt wird, die z. B. derart bezüglich eines Hörers positioniert sind, daß die Lautsprecher links hinten, links vorne, rechts hinten, rechts vorne bzw. vorne angeordnet sind.

Hierzu umfaßt die Vorrichtung zur Qualitätsbeurteilung gemäß der vorliegenden Erfindung eine Einrichtung zum Umwandeln des Audioreferenzsignals in ein erstes Audioreferenzsummensignal an einem ersten Bezugspunkt und in ein zweites Audioreferenzsummensignal an einem zweiten Bezugspunkt und eine Einrichtung zum Umwandeln des Audiotestsignals in ein erstes Audiotestsummensignal an dem ersten Bezugspunkt und in ein zweites Audiotestsummensignal an dem zweiten Bezugspunkt, wobei die Audioreferenzsummensignale und die Audiotestsummensignale an dem ersten und dem zweiten Bezugspunkt eine Überlagerung der jeweiligen Kanäle, die von der Mehrzahl von Lautsprechern ausgebar sind, gewichtet mit einer jeweiligen Übertragungsfunktion zwischen dem jeweiligen Lautsprecher und dem entsprechenden Bezugspunkt sind. Die Audioreferenzsummensignale und die Audiotestsummensignale werden schließlich in eine Einrichtung zur Qualitätsbeurteilung eingespeist, um eine Anzeige für die Qualität des Audiotestsignals zu erhalten. Die Einrichtung zur Qualitätsbeurteilung

kann eine beliebige bekannte Einrichtung sein, wie sie beispielsweise in der DE 196 47 399 C1 offenbart ist, oder wie sie in dem internationalen Standard ITU-R BS 1387 (PEAQ) festgelegt worden ist.

Vorteilhaft an dem erfindungsgemäßen Verfahren ist die Tatsache, daß, wenn das Audiosignal ein Stereosignal ist, die Einflüsse des Abhörraums auf die Signalausbreitung von jedem Lautsprecher zu jedem Bezugspunkt, d. h. jedem Ohr, berücksichtigt werden können.

Weiterhin vorteilhaft ist die Tatsache, daß das Verfahren für Audiosignale mit einer beliebigen Anzahl von Kanälen anwendbar ist, da die Kanäle über entsprechende Übertragungsfunktionen, die die Ausbreitung eines Signals von einem Lautsprecher zu einem Ohr modellieren, auf zwei Summensignale umgewandelt werden, derart, daß ein beliebiges Verfahren zur Qualitätsbeurteilung, das für zwei Kanäle geeignet ist, eingesetzt werden kann.

Üblicherweise können die einzelnen Übertragungsfunktionen durch Messung unter Verwendung von eingebauten Mikrofonen mit einem Kunstkopf oder von Sondenmikrofonen mit einem menschlichen Hörer gewonnen werden. Besonders vorteilhaft ist das erfindungsgemäße Verfahren jedoch dann, wenn die Kopf-bezogenen Übertragungsfunktionen beliebiger Personen bereits bekannt sind und beispielsweise über das Internet von einem entsprechenden Server heruntergeladen werden können. In diesem Fall kann die Raumimpulsantwort eines Abhörraums, die gemessen bzw. simuliert werden kann, mit einer bestimmten vorliegenden HRTF gefaltet werden, um eine Übertragungsfunktion zu erhalten. Dies ist besonders dort vorteilhaft, wo der Abhörraum noch gar nicht existiert, d. h. wo die Schalleigenschaften eines Raums simuliert werden, bevor der Raum überhaupt gebaut wird, um beispielsweise bei der Planung von Konzertsälen oder Tonstudios die Schalleigenschaften zu simulieren und bereits vor dem Bau des Abhörraums denselben zu optimieren.

Bevorzugte Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung werden nachfolgend beziehend auf die beiliegenden Zeichnungen detailliert erläutert. Es zeigen:

- Fig. 1 ein schematisches Blockdiagramm einer erfindungsgemäßen Vorrichtung;
- Fig. 2 ein schematisches Diagramm zur Ermittlung der Kopf-bezogenen Übertragungsfunktionen (HRTFs); und
- Fig. 3 ein schematisches Blockdiagramm zur Darstellung der Situation in einem realen Abhörraum.

Fig. 1 zeigt ein schematisches Blockdiagramm einer Vorrichtung zur Qualitätsbeurteilung eines Audiotestsignals, das durch Codierung und Decodierung von einem Audioreferenzsignal abgeleitet ist. Das Audiotestsignal und das Audioreferenzsignal weisen jeweils eine Mehrzahl von Kanälen auf, wobei jeder Kanal durch einen Lautsprecher einer Mehrzahl von Lautsprechern 11 bis 15, die an unterschiedlichen Positionen in einem zumindest fiktiven Raum positioniert sind, hörbar gemacht werden kann, und wobei zwei Bezugspunkte 17, 18 zur Simulation des Gehörs bezüglich der Positionen der Mehrzahl von Lautsprechern 11 bis 15 definiert sind. Die Vorrichtung zur Qualitätsbeurteilung umfaßt eine Einrichtung 19 zum Umwandeln des Audioreferenzsignals in ein erstes Audioreferenzsummensignal an dem ersten Bezugspunkt 17 und in ein zweites Audioreferenzsummensignal an dem zweiten Bezugspunkt 18 und zum Umwandeln des Audiotestsignals in ein erstes Audiotestsummensignal an dem ersten Bezugspunkt 17 und in ein zweites Audiotestsummensignal an dem zweiten Bezugspunkt 18, wobei die Audioreferenzsummensignale und die Audiotestsummensignale an dem ersten und dem zweiten Bezugspunkt 17, 18 eine Überlagerung der jeweiligen Kanäle, die von der Mehrzahl von Lautsprechern 11 bis 15 abgebar sind, gewichtet mit einer jeweiligen Übertragungsfunktion ÜF11 bis ÜF52 zwischen dem jeweiligen Lautsprecher 11 bis 15 und dem ent-

sprechenden Bezugspunkt 17, 18 sind. Die Vorrichtung zur Qualitätsbeurteilung umfaßt ferner eine Einrichtung 20 zur Qualitätsbeurteilung der Audiotestsummensignale unter Berücksichtigung der Audioreferenzsummensignale, um eine Anzeige der Qualität des Audiotestsignals an einem Ausgang 21 zu liefern.

Im nachfolgenden wird auf die Einrichtung 19 zum Umwandeln eingegangen. Dieselbe umfaßt die Mehrzahl von Übertragungsfunktionen ÜF11 bis ÜF52, die entweder die HRTFs sind, wenn ein schalltoter Raum, d. h. ein Raum, in dem keine Reflexionen auftreten, betrachtet wird, oder die die gesamte Übertragungsfunktion des Raums von einem der Lautsprecher 1 bis 5 zu einem Bezugspunkt 1, 2 sind. Wie es in Fig. 1 gezeigt ist, werden die Ausgangssignale der Lautsprecher mit den entsprechenden Übertragungsfunktionen gewichtet. Die Ausgangssignale, die bei einer Gewichtung der Eingangssignale mit den entsprechenden Übertragungsfunktionen entstehen, werden mittels eines ersten Summierers 22 summiert, um erste Audiosummensignale zu erhalten. Analog dazu ist für den zweiten Bezugspunkt 18 ein zweiter Summierer 23 vorgesehen, um die Ausgangssignale der Übertragungsfunktionen von den jeweiligen Lautsprechern 11 bis 15 zu dem zweiten Bezugspunkt 18 zu summieren, um die zweiten Audiosummensignale zu liefern. Selbstverständlich wird sowohl das Audiotestsignal als auch das Audioreferenzsignal der Verarbeitung mittels der Umwandlungseinrichtung 19 unterzogen, derart, daß für das Audioreferenzsignal und das Audiotestsignal gleiche Verhältnisse herrschen, derart, daß die Einrichtung 20 zur Qualitätsbeurteilung für 2-Kanal-Signale lediglich die Qualität der Codierung/Decodierung mißt und keine andere Effekte das Meßergebnis stören.

Obwohl in Fig. 1 die Situation für ein 5-Kanal-Audiosignal dargestellt ist, ist die erfindungsgemäße Vorrichtung ebenfalls auf Stereosignale mit nur zwei Kanälen oder auf Signale mit drei, vier oder mehr als fünf Kanälen anwendbar. In diesem Fall müssen lediglich entsprechende Übertragungsfunk-

tionen hinzugefügt bzw. weggelassen werden. Ferner sei darauf hingewiesen, daß die Positionierung der Lautsprecher in Fig. 1 lediglich schematisch ist. Eine korrekte Positionierung der Lautsprecher bezüglich der Bezugspunkte ist in den Fig. 2 und 3 für das Beispiel von 5-Kanal-Signalen dargestellt.

Bezüglich der Notation der einzelnen Übertragungsfunktionen sei festgestellt, daß sich die erste Ziffer immer auf den Lautsprecher bezieht, während sich die zweite Ziffer auf den Bezugspunkt, d. h. Bezugspunkt Nr. 1 (17) oder Bezugspunkt Nr. 2 (18), bezieht.

Fig. 2 zeigt eine mögliche Anordnung der fünf Lautsprecher 11 bis 15 bezüglich eines Hörers 24, dessen Kopf in Fig. 2 schematisch in der Draufsicht dargestellt ist. Alternativ könnte der Kopf 24 ein Kunstkopf sein. Auf jeden Fall umfaßt der Kopf 24 den ersten Bezugspunkt 17 und den zweiten Bezugspunkt 18, d. h. die Ohren 17, 18 im Falle eines menschlichen Hörers oder die eingebauten Mikrophone 17, 18 bei einem Kunstkopf 18. In Fig. 2 sind Übertragungswege im schalltoten Raum von jedem der Lautsprecher 11 bis 15 zu jedem Bezugspunkt 17, 18 eingetragen. Die Kopf-bezogenen Übertragungsfunktionen (HRTFs) werden durch Abschattung beispielsweise des Kopfes oder der Schultern der Hörperson und durch unterschiedliche Übertragungszeiten bestimmt. So stellt beispielsweise der Pfeil 31a die Übertragungsstrecke von dem ersten Lautsprecher 11 zu dem ersten Bezugspunkt 17 dar. Der Pfeil 31b, der im Bereich des Kopfes 24 gestrichelt gezeichnet ist, stellt die HRTF von dem ersten Lautsprecher 11 zu dem zweiten Bezugspunkt 18 dar. Analog dazu stellt der Pfeil 32a die Übertragungsfunktion von dem zweiten Lautsprecher 12 zu dem ersten Bezugspunkt, d. h. ÜF21 in Fig. 1, dar. Entsprechend stellt der Pfeil 32b die Übertragungsfunktion von dem zweiten Lautsprecher 12 zu dem zweiten Bezugspunkt 18, d. h. ÜF22 in Fig. 1, dar. Durch Summation der Teilsignale der mit der entsprechenden Übertragungsfunktion gewichteten Lautsprecher Ausgangssignale an den Bezugspunkten

17, 18 ergeben sich dann die ersten bzw. zweiten Audiotestsummensignale bzw. Audioreferenzsummensignale, die in eine beliebige Einrichtung 22 zur Qualitätsbeurteilung für 2-Kanal-Signale eingespeist werden können, um ein Maß für die Qualität des Audiotestsignals, das bei dem in Fig. 2 gezeigten Fall ein 5-Kanal-Signal ist, zu erhalten.

Wie es bereits erwähnt wurde, stellt das Szenario in Fig. 2 die Gewinnung der Kopf-bezogenen Übertragungsfunktionen im schalltoten Raum dar. Dies bedeutet, daß, wenn die HRTFs durch Messung gewonnen werden, der Raum derart beschaffen sein muß, daß sich keine Schallreflektoren innerhalb des Raumes befinden, d. h. daß der Raum vollständig schallabsorbierend ausgekleidet sein muß.

Fig. 3 zeigt eine schematische Darstellung von Übertragungswegen in einem Abhörraum 30, in dem die Lautsprecher 11, 12, 13, 14, 15 ebenso wie in Fig. 2 angeordnet sind. Zusätzlich zum Direktschall ist hier jeweils ein indirekter Weg von jedem Lautsprecher zum linken Ohr 17 dargestellt. Es sei darauf hingewiesen, daß das Szenario in Fig. 3 lediglich teilweise die Realität widerspiegelt, da hier Reflexionen an allen Wänden, dem Boden und der Decke auftreten und ferner auch Mehrfachreflexionen existieren. Im einzelnen gibt der erste Lautsprecher 11 ferner Schall aus, der, wie es durch eine Linie 31c dargestellt ist, an der vorderen Wand des Raums 30 reflektiert wird und von dort zu dem ersten Bezugspunkt 17 gelangt. Die Übertragungsfunktion von dem ersten Lautsprecher 11 zu dem linken Ohr 17, d. h. ÜF11 in Fig. 1, modelliert daher nicht nur die Direktschallausbreitung 31a von dem Lautsprecher zu dem Ohr sondern auch die Schallausbreitung mittels Reflexion 31c von dem ersten Lautsprecher 11 zu dem ersten Ohr 17. Analog dazu existiert auch ein indirekter Weg von dem zweiten Lautsprecher 12, der durch einen Pfeil 32c angedeutet ist, zu dem ersten Ohr 17. Dies bedeutet, daß die Übertragungsfunktion ÜF21 in Fig. 1 von dem zweiten Lautsprecher 12 zu dem ersten Bezugspunkt 17 nicht nur die Direktschallausbreitung 32a sondern auch die Schall-

ausbreitung mittels Reflexion zu dem ersten Ohr 17 modelliert.

Im nachfolgenden wird auf die Ermittlung der einzelnen Übertragungsfunktionen ÜF11 bis ÜF52 (Fig. 1) eingegangen. Dazu existieren verschiedene Möglichkeiten.

Die erste Möglichkeit besteht darin, eine, wie in Fig. 3 dargestellte, Positionierung der Lautsprecher 11 bis 15 zu den Bezugspunkten 17 und 18 zu wählen. Anschließend wird der erste Lautsprecher 11 mittels eines Anregungssignals angeregt, woraufhin an dem ersten Bezugspunkt 17 das dort ankommende Schallsignal gemessen wird, das eine Überlagerung der Signale 31a, 31c, wenn Fig. 3 betrachtet wird, ist. Außerdem wird das Schallsignal an dem zweiten Bezugspunkt 18 gemessen, das eine Überlagerung des Signals 31b und eines in Fig. 3 nicht gezeigten Signals sein könnte, das von dem ersten Lautsprecher 11 ausgegeben wird und an irgendeiner Wand derart reflektiert wird, daß es am zweiten Bezugspunkt 18 ankommt.

Die Übertragungsfunktion von dem ersten Lautsprecher zu dem ersten Bezugspunkt 17 (ÜF11 in Fig. 1) kann aus dem Anregungssignal und dem an dem ersten Bezugspunkt 17 gemessenen Schallsignal berechnet werden. Wird der Lautsprecher 11 mit einem idealen Impuls angeregt, so ergibt sich an den Bezugspunkten direkt die jeweilige Impulsantwort, die die Übertragung des Schallsignals im Zeitbereich beschreibt. Dies ist jedoch aufgrund praktischer Begrenzungen lediglich eine theoretische Methode. In der Praxis wird der Lautsprecher 11 hingegen mit einem Pseudoranschsignal angeregt. Dieses Verfahren wird für die weiteren Lautsprecher 12 bis 15 wiederholt, derart, daß sich alle weiteren Übertragungsfunktionen ÜF21 bis ÜF52 aus dem gemessenen Schallsignal an dem jeweiligen Bezugspunkt und dem Anregungssignal an dem jeweiligen Lautsprecher ermitteln lassen.

Finden, wie es ausgeführt worden ist, derartige Messungen in

einem realen Raum mit nicht-absorbierenden Wänden usw. statt, so wird direkt die gesamte Übertragungsfunktion, die aus der Raumimpulsantwort und den Kopf-bezogenen Übertragungsfunktionen (HRTFs) für die einzelnen Lautsprecherpositionen bestehen, ermittelt. Werden derartige Messungen in einem schalltoten Raum, d. h. einem vollständig schallabsorbierenden Raum, durchgeführt, so können dadurch die HRTFs direkt ermittelt werden, die dann die Übertragungsfunktionen ÜF11 bis ÜF52 sind.

Solche Schallmessungen sind unabhängig von der Tatsache, ob die Messung mittels zweier eingebauter Mikrophone und eines Kunstkopfes oder mittels zweier Sondenmikrophone und einer Testperson durchgeführt werden, allein schon aufgrund der sehr teuren Sondenmikrophone aufwendig und teuer.

Sind jedoch Kopf-bezogene Übertragungsfunktionen (HRTFs) für bestimmte Personen oder auch für eine "Durchschnittsperson" bekannt, so können dieselben verwendet werden, um mit der Impulsantwort eines Raums, die auch simuliert werden kann, gefaltet zu werden. In diesem Fall werden keine Messungen benötigt, um die Übertragungsfunktionen ÜF11 bis ÜF52 zu ermitteln. Ein wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, daß damit auch Räume simuliert werden können, die noch gar nicht gebaut sind, um vor dem tatsächlichen Bau eines Tonstudios beispielsweise dasselbe für eine optimale Schallausbreitung für bestimmte Lautsprecherkonfigurationen zu entwerfen. In diesem Fall kann daher nicht mehr davon gesprochen werden, daß der Raum, in dem die Qualität eines codierten und wieder decodierten Audiotestsignals bewertet werden soll, tatsächlich existiert. Stattdessen ist der Raum lediglich in der Simulation vorhanden und somit ein fiktiver Raum.

Unabhängig davon, ob der Raum tatsächlich existiert oder lediglich aufgrund einer Simulation als fiktiver Raum vorhanden ist, wird üblicherweise davon ausgegangen, daß Testpersonen in solch einem Abhörraum, der beispielsweise ein stan-

standardisierter Abhörraum sein kann, am optimalen Abhörplatz sitzen bzw. stehen. Viele Testpersonen bewegen jedoch während des Tests ihren Kopf nach vorne, hinten, links oder rechts, was auch als Translation bezeichnet wird. Darüberhinaus bewegen sich Personen üblicherweise geringfügig aus der optimalen Abhörposition heraus, d. h. die Personen drehen ihren Kopf nach links und rechts, was auch als Peilbewegungen oder Rotation bezeichnet wird. Somit wird sich ein eventuell vorhandener Mittenlautsprecher, d. h. der Lautsprecher 13, nicht mehr genau in der Mitte befinden. Dies erfolgt, weil die Richtungswahrnehmung genau vorne oft unsicher ist. Insbesondere wird häufig vorne und hinten verwechselt. Dies wird in der Technik auch als "Front-Back Confusion" bezeichnet. Wenn auf die Fig. 2 und 3 Bezug genommen wird, ist zu sehen, daß sich bei jeder Bewegung des Kopfes der erste Bezugspunkt 17 und der zweite Bezugspunkt 18 bezüglich der festen Lautsprecherpositionen ändern.

Um dieser Situation gerecht zu werden, wird für mehrere Positionen der Bezugspunkte 17, 18 das durch die Vorrichtung zur Qualitätsbeurteilung, die in Fig. 1 dargestellt ist, durchgeführte Verfahren zur Qualitätsbeurteilung ausgeführt, woraufhin sich verschiedene Qualitätsanzeigen für die unterschiedlichen Positionen ergeben. Selbstverständlich müssen für jegliche unterschiedliche Positionen der Bezugspunkte 17, 18 unterschiedliche Übertragungsfunktionen ermittelt und bei der Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens verwendet werden. Als Ausgabe ergeben sich dann mehrere Qualitätsanzeigen für unterschiedliche Positionen der Bezugspunkte 17, 18, d. h. für unterschiedliche Kopfstellungen.

Für die Auswertung der unterschiedlichen Qualitätsanzeigen existieren verschiedene Möglichkeiten. Einerseits kann ein Mittelwert genommen werden, um allgemein eine Aussage darüber treffen zu können, daß ein bestimmtes Codier/Decodierverfahren vielleicht optimal ist, wenn die Position des Kopfs überhaupt nicht verändert wird, bzw. daß diese bei bestimmten Translationen oder Peilbewegungen oder Rotationen

des Kopfes nicht mehr so günstig ist wie ein anderes Codierverfahren.

Andererseits kann der "Worst-Case" der einzelnen Messungen herausgefunden werden, um eine Aussage darüber treffen zu können, ob ein bestimmtes Codier/Decodierverfahren bei einer bestimmten Position des Kopfes bezüglich der fünf Lautsprecher im Falle von 5-Kanal-Audiosignalen suboptimal ist. Vorteilhafterweise werden solche Qualitätsbeurteilungen einerseits für mehrere Positionen der Bezugspunkte 17, 18 nahe der optimalen Referenzabhörposition durchgeführt. Andererseits können solche Messungen auch für andere Plätze, die nicht an der Referenzabhörposition sind, durchgeführt werden, um beispielsweise bestimmte andere Sitzplätze in einem Tonstudio beurteilen zu können, um festzustellen, ob hier Codier/Decodierfehler hörbarer sind oder nicht.

Aus der vorangegangenen Beschreibung ist es klar geworden, daß die erfindungsgemäße Vorrichtung und das erfindungsgemäße Verfahren bestehende Vorrichtungen und Verfahren zur Qualitätsbeurteilung mit einem wesentlichen Anteil an Flexibilität versehen, derart, daß nicht nur eine Qualitätsbeurteilung von Audiosignalen mit mehr als zwei Kanälen ermöglicht wird, sondern daß eine Qualitätsbeurteilung für verschiedene Szenarien der Positionierung der Bezugspunkte 17, 18 bezüglich der Lautsprecher 11 bis 15 durchgespielt werden können, und daß die erfindungsgemäße Vorrichtung und das erfindungsgemäße Verfahren sogar beim Entwurf von Tonstudien oder anderen Abhörräumen, wie z. B. Kinos, eingesetzt werden können, um die Qualität bestimmter Codier/Decodierverfahren in einem bestimmten Raum gehörangepaßt beurteilen zu können. Ferner können das erfindungsgemäße Verfahren und die erfindungsgemäße Vorrichtung zum Entwurf von Abhörräumen eingesetzt werden, um für einen bestimmten Raum das optimale Codierverfahren unter einer Vielzahl von möglichen Codierverfahren auszuwählen.

Die Übertragungsfunktionen ÜF11 - ÜF52 können auf verschie-

dene Arten und Weisen schaltungstechnisch realisiert werden. Bevorzugt wird eine Realisierung über ein FIR-Filter für jede Impulsantwort. Es sei darauf hingewiesen, daß für große Räume die FIR-Filter eine beachtliche Länge einnehmen können, die beispielsweise bei einer Abtastfrequenz von 48 kHz über 100.000 Abtastwerte lang sein können. Hierbei bietet sich an, die ersten Millisekunden dieser Länge, in der eher diskrete Reflexionen auftreten, genauer darzustellen als den Zeitbereich eher am Ende Filters, wo eher diffuse Reflexionen auftreten.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Qualitätsbeurteilung eines Audiotestsignals, das durch Codierung und Decodierung von einem Audioreferenzsignal abgeleitet ist, wobei das Audiotestsignal und das Audioreferenzsignal jeweils eine Mehrzahl von Kanälen aufweisen, wobei jeder Kanal durch einen Lautsprecher (11 - 15) einer Mehrzahl von Lautsprechern, die an unterschiedlichen Positionen in einem zumindest fiktiven Raum (30) positioniert sind, hörbar gemacht werden kann, und wobei zwei Bezugspunkte (17, 18) des Gehörs bezüglich der Positionen der Mehrzahl von Lautsprechern definiert sind, mit folgenden Merkmalen:

einer Einrichtung (19) zum Umwandeln des Audioreferenzsignals in ein erstes Audioreferenzsummensignal an dem ersten Bezugspunkt (17) und in ein zweites Audioreferenzsummensignal an dem zweiten Bezugspunkt (18) und zum Umwandeln des Audiotestsignals in ein erstes Audiotestsummensignal an dem ersten Bezugspunkt (17) und in ein zweites Audiotestsummensignal an dem zweiten Bezugspunkt (18), wobei die Audioreferenzsummensignale und die Audiotestsummensignale an dem ersten und an dem zweiten Bezugspunkt (17, 18) eine Überlagerung der jeweiligen Kanäle, die von der Mehrzahl von Lautsprechern (11 - 15) ausgebar sind, gewichtet mit einer jeweiligen Übertragungsfunktion (ÜF11 - ÜF52) zwischen dem jeweiligen Lautsprecher und dem entsprechenden Bezugspunkt sind; und

einer Einrichtung (20) zur Qualitätsbeurteilung der Audiotestsummensignale unter Berücksichtigung der Audioreferenzsummensignale, um eine Anzeige der Qualität des Audiotestsignals zu liefern.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei der die Übertragungsfunktionen (ÜF11 - ÜF52) zwischen den jeweiligen Laut-

- sprechern (11 - 15) und den entsprechenden Bezugspunkten (17, 18) individuelle Kopf-bezogene Übertragungsfunktionen (HRTF) sind, um die unterschiedlichen Impulsantworten für unterschiedliche Schalleinfallrichtungen in das menschliche Ohr (17, 18) zu berücksichtigen.
3. Vorrichtung nach Anspruch 2, bei der die Übertragungsfunktion (ÜF11 - ÜF52) zwischen den jeweiligen Lautsprechern (11 - 15) und den entsprechenden Bezugspunkten (17, 18) durch eine Mittelung über eine Vielzahl von Individuen gewonnene mittlere Kopf-bezogene Übertragungsfunktionen (HTRFs) sind.
  4. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der die Übertragungsfunktion (ÜF11 - ÜF52) zwischen dem jeweiligen Lautsprecher (11 - 15) und dem entsprechenden Bezugspunkt (17, 18) eine Übertragungsfunktion ist, die gleich der Faltung der Kopf-bezogenen Übertragungsfunktion mit einer Raumimpulsantwort ist, derart, daß die Schallreflexionen des Raums, in dem die Mehrzahl von Lautsprechern (11 - 15) und die beiden Bezugspunkte (17, 18) positioniert sind, berücksichtigt werden.
  5. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der die Übertragungsfunktion (ÜF11 - ÜF52) zwischen den jeweiligen Lautsprechern (11 - 15) und dem entsprechenden Bezugspunkt (17, 18) gemittelte Übertragungsfunktionen sind, die das Ergebnis einer Mittelung einzelner Übertragungsfunktionen zwischen festen Lautsprecherpositionen und variierten Positionen der Bezugspunkte (17, 18) sind.
  6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, bei der die Einrichtung (19) zum Umwandeln angeordnet ist, um für verschiedene Positionen des ersten und des zweiten Bezugspunkts (17, 18) bezüglich fester Lautsprecherpo-

sitionen Übertragungsfunktionen zu liefern, und bei der die Einrichtung zur Qualitätsbeurteilung (20) angeordnet ist, um für unterschiedliche Übertragungsfunktionen die Anzeige der Qualität des Audiotestsignals zu liefern und für die Anzeige der geringsten Qualität die Positionen der Bezugspunkte (17, 18) zu liefern.

7. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der der Raum (30) ein standardisierter Referenzabhörraum ist und die beiden Bezugspunkte (17, 18) die Gehörorgane einer Testperson an einer Referenzabhörposition simulieren.
8. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, bei der der Raum (30) ein Tonstudio ist und die beiden Bezugspunkte die Gehörorgane einer Testperson an einer beliebigen Sitz/Steh-Position in dem Raum simulieren.
9. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 5 bis 8, bei der die verschiedenen Positionen des ersten und des zweiten Bezugspunkts (17, 18) nur gering von einer Referenzposition abweichen, um eine Peilbewegung einer Testhörperson zu simulieren.
10. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 5 bis 8, bei der die verschiedenen Positionen des ersten und des zweiten Bezugspunkts stark von der Referenzposition abweichen, um eine Kopfdrehung einer Testhörperson zu simulieren.
11. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der das Audiotestsignal fünf Kanäle aufweist, die ein linker hinterer, ein rechter hinterer, ein linker vorderer, ein rechter vorderer und ein mittlerer vorderer Kanal sind.
12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 10, bei der das Audiotestsignal ein Stereosignal ist.

13. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der die Einrichtung (19) zum Umwandeln folgende Merkmale aufweist:

für jede Lautsprecher-Bezugspunkt-Kombination ein FIR-Filter, wobei die Filterkoeffizienten jedes FIR-Filters durch die Übertragungsfunktion der Übertragungsstrecke von dem entsprechenden Lautsprecher zu dem entsprechenden Bezugspunkt bestimmt sind;

einen ersten Summierer (22) für den ersten Bezugspunkt (17) zum Summieren der Ausgangssignale der FIR-Filter (ÜF11 - ÜF51), die Übertragungsstrecken zu dem ersten Bezugspunkt (17) darstellen, um das erste Audiotestsummensignal bzw. das erste Audioreferenzsummensignal zu liefern; und

einen zweiten Summierer (23) für den zweiten Bezugspunkt (18) zum Summieren der Ausgangssignale der FIR-Filter (ÜF12 - ÜF52), die eine Übertragungsstrecke zu dem zweiten Bezugspunkt (18) darstellen, um das zweite Audiotestsummensignal bzw. das zweite Audioreferenzsummensignal zu liefern.

14. Verfahren zur Qualitätsbeurteilung eines Audiotestsignals, das durch Codierung und Decodierung von einem Audioreferenzsignal abgeleitet ist, wobei das Audiotestsignal und das Audioreferenzsignal jeweils eine Mehrzahl von Kanälen aufweisen, wobei jeder Kanal durch einen Lautsprecher (11 - 15) einer Mehrzahl von Lautsprechern, die an unterschiedlichen Positionen in einem zumindest fiktiven Raum (30) positioniert sind, hörbar gemacht werden kann, und wobei zwei Bezugspunkte (17, 18) bezüglich der Positionen der Mehrzahl von Lautsprechern definiert sind, mit folgenden Schritten:

Umwandeln (19) des Audioreferenzsignals in ein erstes Audioreferenzsummensignal an dem ersten Bezugspunkt

(17) und in ein zweites Audioreferenzsummensignal an dem zweiten Bezugspunkt (18);

Umwandeln des Audiotestsignals in ein erstes Audiotestsummensignal an dem ersten Bezugspunkt (17) und in ein zweites Audiotestsummensignal an dem zweiten Bezugspunkt (18);

Gewichten der jeweiligen Kanäle, die von der Mehrzahl von Lautsprechern (11 - 15) ausgebar sind, mit einer jeweiligen Übertragungsfunktion (ÜF11 - ÜF52) zwischen dem jeweiligen Lautsprecher und dem entsprechenden Bezugspunkt;

Überlagern der gewichteten Kanäle an dem ersten bzw. an dem zweiten Bezugspunkt (17, 18), um die Audioreferenzsummensignale und die Audiotestsummensignale zu erhalten; und

Leiten der Audiotestsummensignale und der Audioreferenzsummensignale zu einer Einrichtung (20) zur Qualitätsbeurteilung der Audiotestsummensignale unter Berücksichtigung der Audioreferenzsummensignale, um eine Anzeige der Qualität des Audiotestsignals zu erhalten.

15. Verfahren nach Anspruch 14, bei dem dem Schritt des Umwandeln (19) folgender Schritt vorausgeht:

Erhalten der einzelnen Übertragungsfunktionen (ÜF11-ÜF52) zwischen jedem Lautsprecher (11 - 15) und jedem Bezugspunkt (17, 18).

16. Verfahren nach Anspruch 15, bei dem der Schritt des Erhaltens folgende Teilschritte aufweist:

Anregen eines Lautsprechers (11 - 15) mit einem Anregungssignal;

Messen des Signals an jedem Bezugspunkt (17, 18);

Ermitteln der Übertragungsfunktion zwischen dem ange-  
regten Lautsprecher und dem ersten Bezugspunkt (17);

Ermitteln der Übertragungsfunktion zwischen dem an-  
geregten Lautsprecher und dem zweiten Bezugspunkt (18);  
und

Wiederholen der Schritte des Anregens, des Messens und  
des Ermittelns, bis alle Lautsprecher (11 - 15) ange-  
regt worden sind, um die einzelnen Übertragungsfunktio-  
nen zu erhalten.

17. Verfahren nach Anspruch 16, bei dem der erste und der  
zweite Bezugspunkt (17, 18) die Ohren eines menschi-  
chen Hörers sind.
18. Verfahren nach Anspruch 16, bei dem der erste und der  
zweite Bezugspunkt die eingebauten Mikrophone eines  
Kunstkopfes sind.
19. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 bis 18, bei dem  
das Anregungssignal ein Pseudorauschsignal ist.
20. Verfahren nach Anspruch 15, bei dem der Schritt des Er-  
haltens folgende Teilschritte aufweist:

Zugreifen auf eine Kopf-bezogene Übertragungsfunktion  
(HRTF) für eine bestimmte Positionierung eines Laut-  
sprechers (11 - 15) zu dem ersten Bezugspunkt (17);

Ermitteln der Raumimpulsantwort für die Position des  
Lautsprechers in dem Raum;

Falten der Kopf-bezogenen Übertragungsfunktion (HRTF)  
mit der Raumimpulsantwort, um die Übertragungsfunktion  
von dem Lautsprecher zu dem ersten Bezugspunkt (17) zu

erhalten;

Wiederholen der Schritte des Zugreifens, des Ermitteln und des Faltens, um die Übertragungsfunktion (ÜF11 - ÜF52) von dem Lautsprecher zu dem zweiten Bezugspunkt zu erhalten; und

Durchführen der Schritte des Zugreifens, des Ermitteln, des Faltens und des Wiederholens für jeden weiteren Lautsprecher, um alle einzelnen Übertragungsfunktionen zu erhalten.

21. Verfahren nach Anspruch 19, bei dem die Raumimpulsantwort durch eine Simulation des Raumes ermittelt wird.

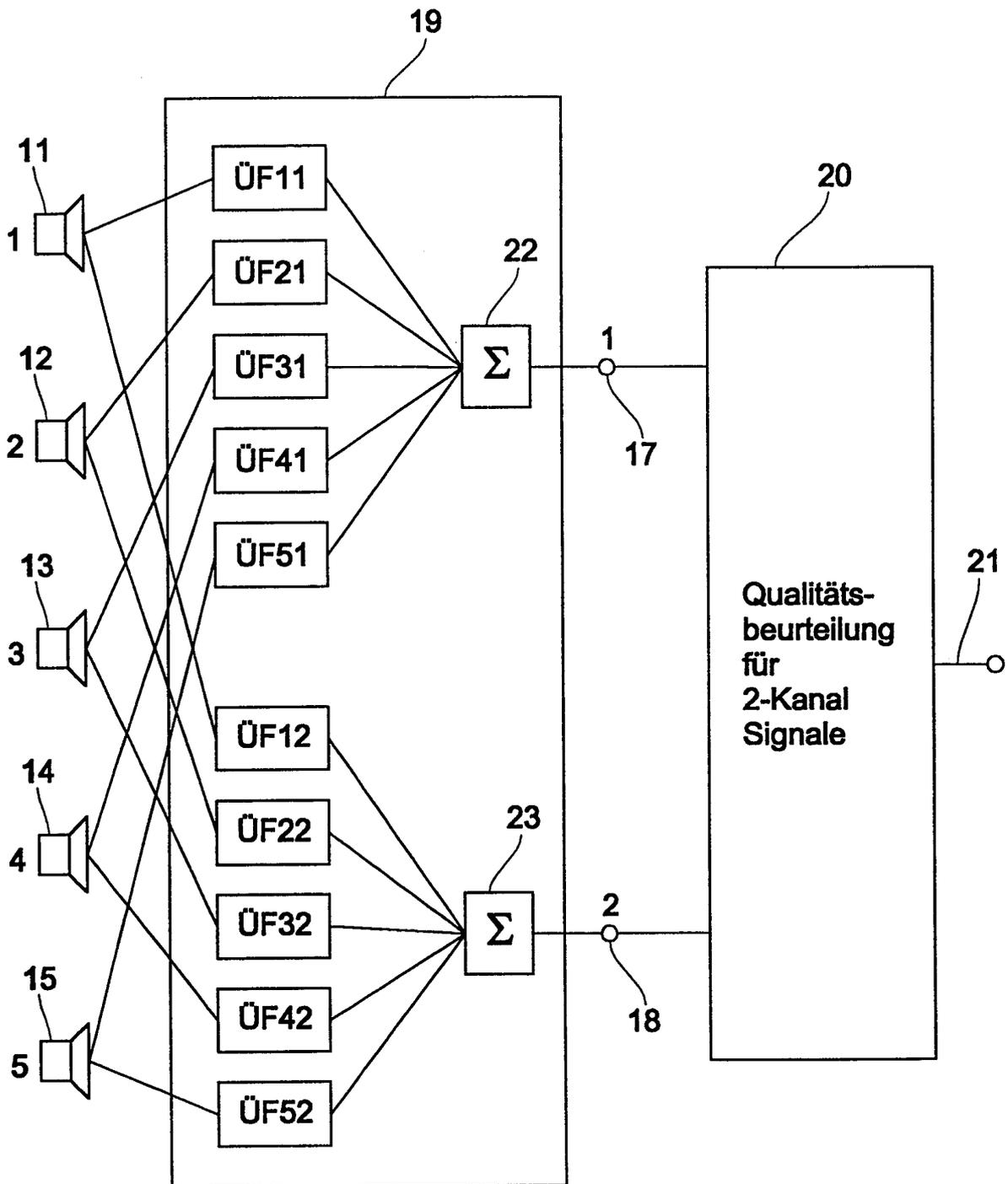


Fig. 1

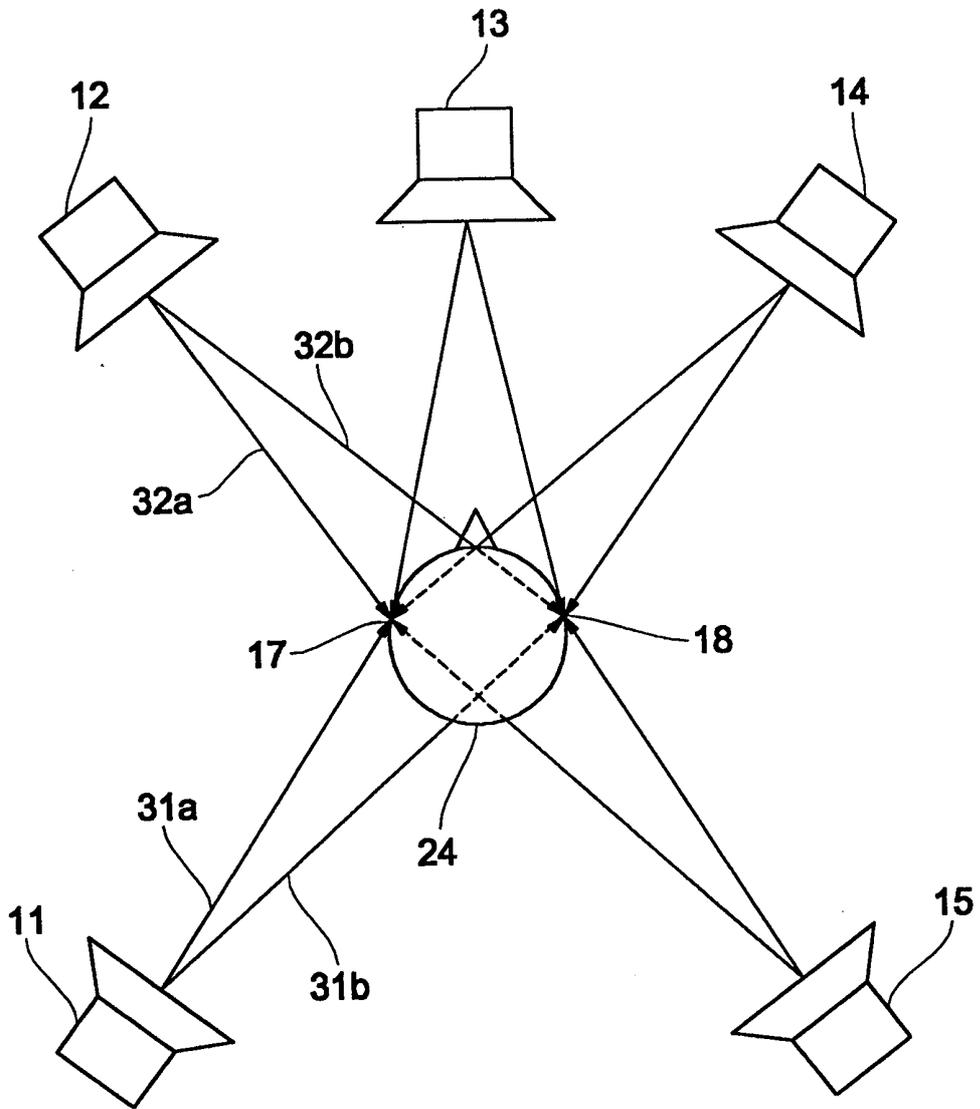


Fig. 2

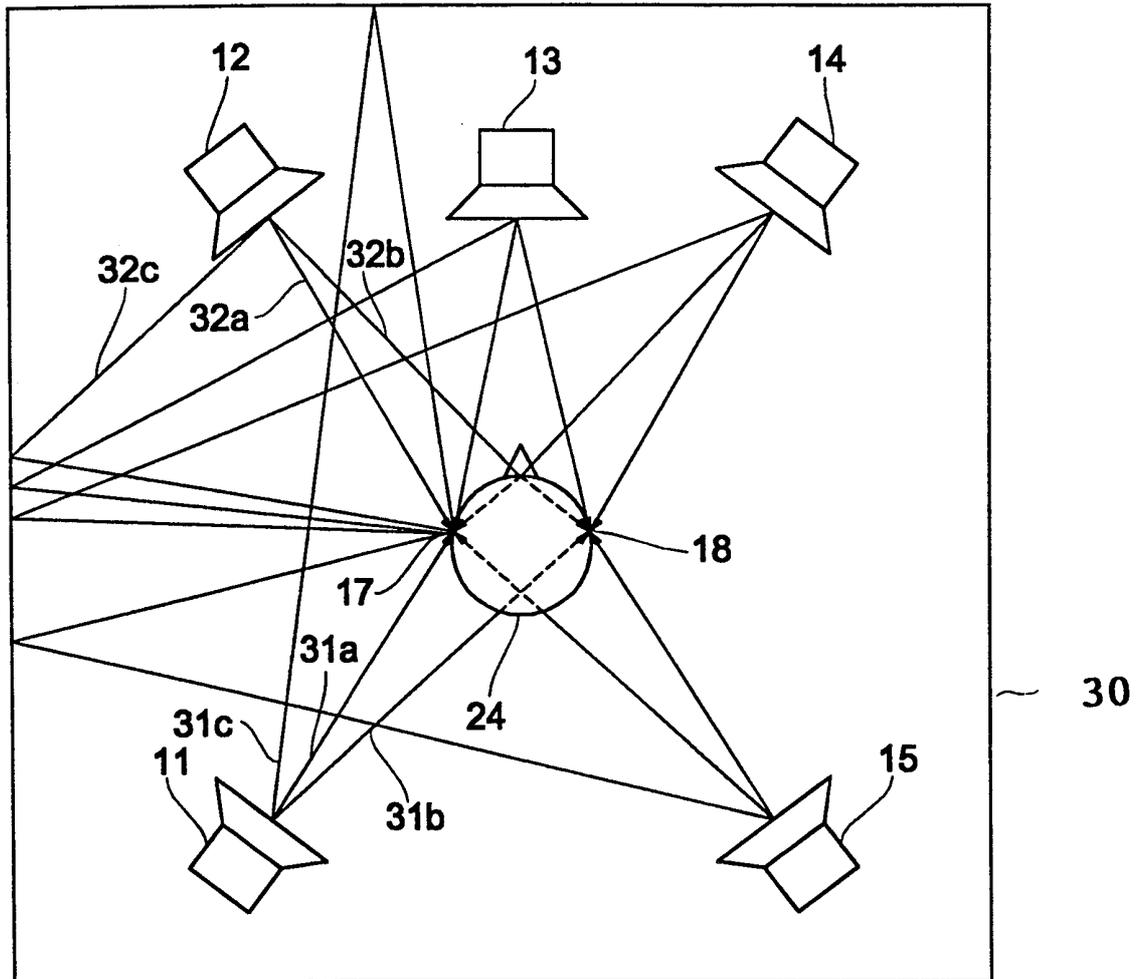


Fig. 3