

Kompakte 16-Kanal-Kugellautsprecheranordnung

Michael Kerscher¹, Franz Zotter²

¹ Technische Universität Graz, 8010 Graz, Österreich, Email: viechmich@googlemail.com

² Institut für Elektronische Musik und Akustik, 8010 Graz, Österreich, Email: zotter@iem.at

Einleitung

Kompakte kugelförmige Lautsprecheranordnungen werden nicht nur zur omnidirektionalen Schallabgabe, sondern auch zur kontrolliert richtungsabhängigen Schallabgabe verwendet. Derzeit übliche Systeme basieren auf den Platonischen Körpern. Sie sind wegen ihrer Symmetrie einfach zu konstruieren, sind jedoch auf fünf bestimmte Anordnungen beschränkt, die bei Ansteuerung mit begrenzter Richtungsauflösung oftmals eine höhere Anzahl von Lautsprechern verwenden, als unbedingt nötig.

Dieser Beitrag präsentiert deshalb eine kompakte Kugelanordnung mit 16 Lautsprechern, deren Anordnung "Hyperinterpolation" erlaubt. Hyperinterpolation gewährleistet eine Richtungssteuerung mit gleichmäßiger Auflösung und kleinstmöglichem Hardwareaufwand. Es werden folglich genauso viele Lautsprecher wie steuerbare Kugelharmonische (Kugelflächenfunktionen) verwendet.

Wir zeigen die Konstruktion und Übertragungseigenschaften eines Prototyps. Um die Überlastung zu vermeiden, die typischerweise bei tiefen Frequenzen auftreten können, schlagen wir eine Filterbank zur Auflösungsreduktion in diesem Bereich vor.

Konstruktion des Gehäuses

Zur Steuerung von N Kugelharmonischen sind

$$L \geq (N + 1)^2 \quad (1)$$

Lautsprecher notwendig [1]. Am unteren Limit sind für ein System 3. Ordnung bereits 16 Treiber ausreichend. Allerdings gibt es keine typischen bekannten geometrischen Körper mit 16 Flächen. Deshalb muss eine Alternative für die vorgeschlagene Anordnung gefunden werden. In der Mathematik wurden speziell für die sog. "Hyperinterpolation" optimal auf der Kugeloberfläche verteilte Punkte vorgeschlagen. Die von Womersley et al berechneten Koordinaten, welche wir als Zentren der Lautsprechermembranen auf unserer Anordnung annehmen, finden sich auf [2]. Um einen Polyeder zu erhalten, auf dessen Flächen die Lautsprecher montiert werden können, wurde der Algorithmus *stripak* von Robert Renka zur Berechnung der sog. Voronoi-Parzellierung verwendet [3]. Das erhaltene Matlab-Modell zeigt Abbildung 1 links.

Ausgehend von diesem Modell wurde ein 3D-CAD-Modell erstellt, mit dessen Hilfe zwölf Fünf- und vier Sechsecke für die Konstruktion aus einer MDF-Platte mit einer CNC-Maschine gefräst wurden. Anschließend wurden die Einzelteile zum Polyeder verleimt, dieser wurde

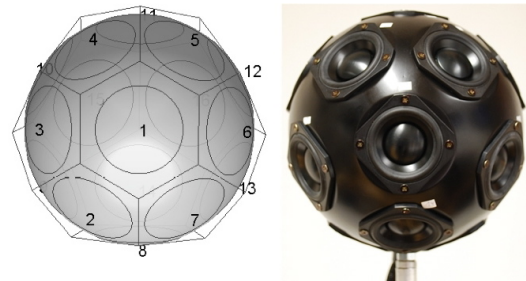


Abbildung 1: links: Matlab-Modell des Lautsprecher-Gehäuses mit Blick auf den Nordpol; rechts: Der fertige Lautsprecher von vorne gesehen

lackiert (unser Dank gilt der Tischlerei Deutscher in Pichelsdorf bei Weiz) und Peerless 830983 Breitbandlautsprecher eingebaut. Abbildung 1 rechts zeigt den fertigen Kugellautsprecher.

Übertragungseigenschaften

Zur Ermittlung der Übertragungseigenschaften wurden die aktiven und passiven Übertragungspfade mit einem Laser Doppler Vibrometer (LDV) gemessen. Dieser misst die Schnelle der Lautsprechermembranen. Als Messmethode wurde die Messung mit einem exponentiellen Sinus-Sweep-Signal nach Farina [4] gewählt.

Der LDV zeigt auf die Mitte einer Lautsprechermembran, während alle Lautsprecher der Reihe nach das Sweepsignal wiedergeben. Dies erfolgt für jeden Lautsprecher. So entstehen 16x16 Messungen.

Abbildung 2 zeigt die durchschnittliche Dämpfung der passiven Übertragungspfade gegenüber des durchschnittlichen aktiven Übertragungspfad. Im Bereich bis ca. 800 Hz werden die Membranen von der Luftbewegung des aktiven Lautsprechers mitbewegt. Bei 1381 und 1822 Hz liegen die Hauptresonanzen des Gehäuses. Über etwa 3 kHz ist praktisch kein Übersprechen mehr vorhanden.

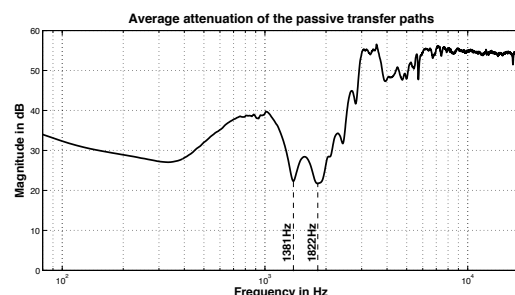


Abbildung 2: durchschnittliche Dämpfung der passiven Übertragungspfade

Filterentwurf zur Begrenzung der radialen Ansteuerungsfilter

Die Wellengleichung gelöst für sphärische Koordinaten (siehe [5]) ist günstig zur Beschreibung des entstehenden Schallfeldes auf einem gewünschten Radius r . Wendet man eine Transformation in Kugelharmosische an, erhält man laut [6]:

$$\psi_{nm}(r) = i\rho_0 c \cdot \frac{h_n(kr)}{h'_n(kr_0)} \cdot \nu_{nm}|_{r_0}. \quad (2)$$

Nach dieser Vorschrift lässt sich die Ansteuerung des Kugellautsprechers in anguläre und radiale Ansteuerungsfilter trennen. Die anguläre Steuerung erzeugt die gewünschte Schnelleverteilung ν_{nm} auf der Oberfläche r_0 der Anordnung, wie in [1] nachgelesen werden kann. Die radialen Filter projizieren ν_{nm} in eine Schalldruckverteilung $\psi_{nm}(r)$ auf dem Zielradius r . Durch den Ausbreitungsterm $i\rho_0 c \cdot \frac{h_n(kr)}{h'_n(kr_0)}$ werden die Kugelharmosichen auf Ihrem Weg von der Kugeloberfläche auf den Projektionsradius abgeschwächt.

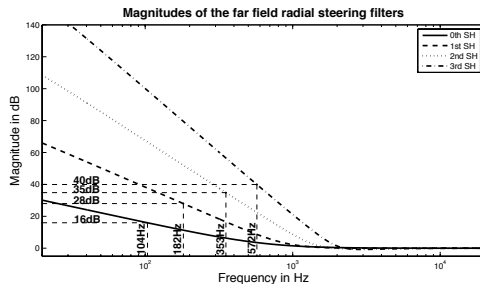


Abbildung 3: RSF mit den verwendeten Limits und Grenzfrequenzen

Um einen glatten Frequenzgang für alle Kugelharmosichen zu erhalten, muss die Dämpfung mittels inverser Filter ausgeglichen werden, den sog. "Radial Steering Filters" (RSF). Diese Filter nehmen jedoch vorallem bei tiefen Frequenzen und hohen Ordnungen Werte an, die nicht realisierbar sind (siehe Abbildung 3). Es wird deshalb hier eine Begrenzung auf ein 40dB-Limit vorgeschlagen. Von hohen Frequenzen kommend fällt jedes Mal, wenn eine Strahlerordnung ausgeblendet wird, diese zur Formung eines Schallstrahls weg. Die Amplitude eines Strahls ist von der maximalen Strahlerordnung N abhängig und beträgt laut [7] $b_N = \frac{(N+1)^2}{4\pi}$.

Soll die Amplitude des Strahls über den gesamten Frequenzbereich konstant gehalten werden, müssen die verbleibenden Kugelharmosichen nach Wegfall einer Ordnung um den Faktor $g_N = \frac{b_3}{b_N}$ verstärkt werden. Da dies frequenzabhängig ist, wird eine Filterbank verwendet, welche jede Kugelharmosiche gemäß der Grenzfrequenzen jedes Filters verstärkt.

Die Filterbank dient dem Amplitudenabgleich jeder Strahlerordnung. Deshalb kann die 40dB-Grenze nicht verwendet werden, sondern die Grenze der entzerrten Amplituden muss bereits um die jeweilige Verstärkung unter der 40 dB-Grenze tiefer angesetzt werden, also bei

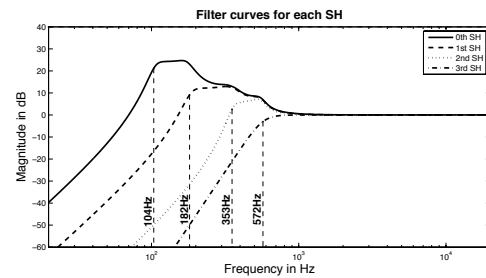


Abbildung 4: Filterkurven für die Kugelharmosichen

einer 16, 28, 35 bzw. 40 dB-Grenze. Dies ergibt Grenzfrequenzen von 104 Hz, 182 Hz, 353 Hz und 572 Hz, wie in Abbildung 3 dargestellt. Verwendet man für die Filterbank Butterworth-Bandpass-Filter 3. Ordnung und ein Butterworth-Hochpass-Filter 5. Ordnung, ergeben sich Filterkurven, wie in Abbildung 4.

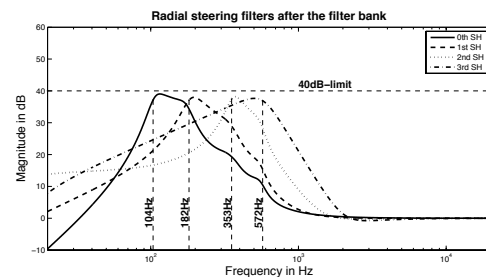


Abbildung 5: Die begrenzten RSF nach der Filterbank

Abbildung 5 zeigt die gefilterten RSF. Man sieht, dass sie auf 40dB begrenzt werden. Der erhaltene Frequenzgang für die Strahlamplitude ist ab 700 Hz komplett flach. Zwischen 200 und 700 Hz ist eine leichte Welligkeit zu erkennen und unter 200 Hz sinkt die Kurve stark ab.

Literatur

- [1] Pomberger, Hannes.: Angular and radial directivity control for spherical loudspeaker arrays. Master Thesis, KU Graz, 2008
- [2] Womersley, Robert: Extremal (maximum determinant) points on the sphere, URL: <http://web.maths.unsw.edu.au/~rsw/Sphere/Extremal/index.html>, aufgerufen am 01.03.2011
- [3] Renka, Robert, URL: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=275329>, aufgerufen am 20.03.2011
- [4] Farina, Angelo: Simultaneous measurement of impulse response and distortion with the swept-sine technique, 2000
- [5] Williams, Earl G.: Fourier Acoustics. Academic Press, 1999
- [6] Zotter, Franz und Noisternig, Markus: Near- and far-field beamforming using spherical loudspeaker arrays, 2007
- [7] Kerscher, Michael: Compact Spherical Loudspeaker Array For Variable Sound Radiation, Diploma Thesis, technische Universität Graz, 2010