

# Entwurf und Aufbau eines variablen sphärischen Mikrofonarrays für Forschungsanwendungen in Raumakustik und Virtual Audio

Benjamin Bernschütz<sup>1,3</sup>, Christoph Pörschmann<sup>1</sup>, Sascha Spors<sup>2</sup>, Stefan Weinzierl<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*FH Köln, Institut für Nachrichtentechnik, Email: benjamin.bernschuetz@fh-koeln.de, christoph.poerschmann@fh-koeln.de*

<sup>2</sup>*Deutsche Telekom Laboratories / Technische Universität Berlin, Email: sascha.spors@telekom.de*

<sup>3</sup>*Technische Universität Berlin, Fachgebiet Audiokommunikation, Email: stefan.weinzierl@tu-berlin.de*

## Einleitung

Im Rahmen von Forschungsarbeiten im Bereich richtungsabhängiger akustischer Eigenschaften von Räumen, sowie der Gewinnung extrapolierbarer Messdatensätze für 3D-Audio Wiedergabesysteme (z.B. WFS, Binaural-synthese), wurde das VariSphear Array (VSA), ein flexibles und präzises sphärische Mikrofonarraymesssystem entworfen und aufgebaut. Sphärische Mikrofonarrays eignen sich aufgrund ihrer Rotationssymmetrie für eine gleichmäßige Erfassung des Schallfeldes. Bei dem VSA handelt es sich um einen vollautomatischen Messroboter, der sequentiell ein bzw. zwei Mikrofon(e) auf beliebige Punkte einer (imaginären) Kugeloberfläche positioniert und dort Raumimpulsantworten aufzeichnet. Das VSA kann bezüglich Anzahl und Positionierung der Abtastpunkte, Radius, Messhöhe und Mikrofonie frei parametrisiert werden. Aufgrund der sequentiellen Abtastung ist das System nicht echtzeitfähig.

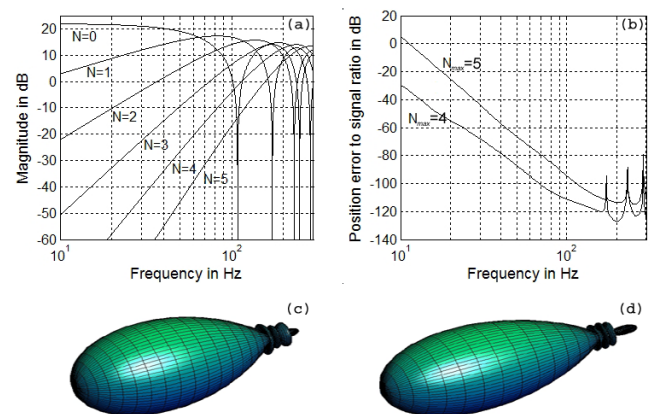
## Processing

Das Arrayprocessing wird auf Basis einer Schallfeldzerlegung in sphärisch Harmonische durchgeführt [1][2][3]. Dieses Verfahren ermöglicht beispielsweise dreidimensional drehbares und hochdirektives Beamforming [2], das sich für eine selektive Untersuchung von Richtungskomponenten des Schallfeldes eignet. Alternativ lässt sich das lediglich auf der Sphäre abgetastete Schallfeld durch Extrapolation rekonstruieren [1]. So können Datensätze für 3D-Audio Wiedergabesysteme generiert werden. Die Extrapolation lässt zudem eine Visualisierung des Schallfeldes zu.

## Dimensionierung und Genauigkeit

Die nutzbare Frequenzbandbreite eines Arrays hängt maßgeblich mit seiner Dimensionierung zusammen. Die Beziehungen sind stets relativ und beziehen sich auf  $kr$ , das Produkt aus Wellenzahl  $k$  und Radius  $r$ . Die untere Grenzfrequenz wird im Wesentlichen von auflösender Ordnung  $N_{max}$ , Radius  $r$ , Positionsfehlern  $\Delta\Omega$  und Signal zu Rauschverhältnis (SNR) der Messungen bestimmt.  $N_{max}$  beschreibt die Anzahl der einbezogenen Moden und bestimmt, mit welcher Genauigkeit die auf der abgetasteten Sphäre auftretende Druckverteilung nach der Schallfeldzerlegung approximiert wird. Je höher  $N_{max}$ , desto besser wird u.a. die Winkelauflösung der Messung. Die Moden erscheinen dabei erst nach und nach mit entsprechendem Nutzpegel im  $kr$ -Spektrum.

Soll beispielsweise die Frequenz  $f=60\text{Hz}$  auf  $r_{max}=1.2\text{m}$  ( $kr \approx 1.3$ ) bis  $N_{max}=4$  aufgelöst werden, so muss z.B. die Mode  $N=4$  dabei bereits um 20dB verstärkt werden (vgl. Abb.1a). Dies erfordert ein entsprechend hohes SNR der Messungen. Ist das SNR nicht hinreichend, so ist der White Noise Gain (WNG) [3] des Arrays zu gering. Damit wird die Arrayantwort unbrauchbar.



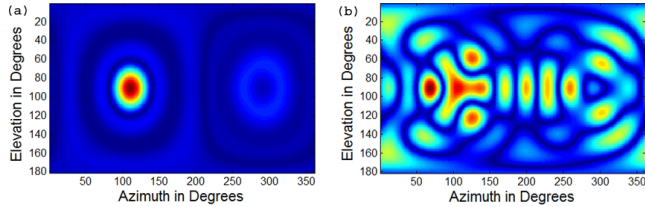
**Abbildung 1:** (a) Amplituden der sphärisch harmonischen Moden  $N=\{0-5\}$  (b) Beispiel einer Positionsfehlersimulation mit gleichverteilt randomisierten Fehlern  $\Delta\Omega \in \pm 0.01^\circ$  für  $N_{max}=\{4,5\}$  auf einem Lebedev Grid,  $L=17$ . (a), (b) je bei  $r_{max} = 1.2\text{m}$ , Druckempfänger im *Open Sphere* Array. Ideale, nicht gewichtete Array Beams für (c)  $N_{max}=4$ ,  $\varphi_{-3dB}=40^\circ$  und (d)  $N_{max}=5$ ,  $\varphi_{-3dB}=34^\circ$ .

Der Fehlerbeitrag aufgrund statistischer Positionsungenauigkeiten der Mikrofone steigt bei fallendem  $kr$  für  $kr < N$  erheblich an. Das VSA weist eine mechanische Positioniergenauigkeit von  $|\Delta\Omega| < 0.01^\circ$  auf, so dass für das obige Beispiel nur sehr geringe Fehlerbeiträge von  $< -90\text{dB}$  entstehen (vgl. Abb.1b).

## Räumliche Aliasartefakte

Bei diskreter räumlicher Abtastung ist die maximal auflösbare modale Ordnung der Abtastquadratur  $N_q$  stets begrenzt. Da aber das natürliche Schallfeld typischerweise nicht modal begrenzt ist, kommt es zu Aliasartefakten, abhängig von  $kr/N$ , die sich in Form von räumlichen Fehleranteilen bemerkbar machen. Aliasanteile nehmen mit steigendem  $kr/N$  zu, sind für  $kr < N$  verhältnismäßig gering und wachsen dann aber für  $kr > N$  dramatisch an, vgl. Abb.2. So kann mit der Forderung  $kr < N_q$  ein oberer Grenzfrequenzbereich definiert werden [4].  $N_q$  hängt dabei von der Art der Quadratur

und Anzahl der Abtastpunkte  $M$  ab:  $N_q = \lfloor \sqrt{M/c_q} - 1 \rfloor$ , mit dem quadraturspezifischen Faktor  $c_q$ . Es gilt zudem  $N_{max} \leq N_q$ . Es dürfen nur Moden einbezogen werden, für die das Quadraturschema noch eine ausreichend stabile Orthogonalität der sphärischen Harmonischen liefert. Für  $N_{max} > N_q$  nimmt der WNG stark ab und die Arrayantwort bricht schlagartig zusammen.



**Abbildung 2:** Beispielantworten des Arrays auf eine ebene Welle aus  $90^\circ$ EL/ $110^\circ$ AZ mit  $N_{max}=7$ . Simulation auf einem Lebedev Grid,  $L=15$ ,  $N_q=7$ . Es gilt  $N_{max}=N_q$ . (a) Im Arbeitsbereich  $kr < N_q$ ,  $kr/N_q \approx 0.6$  (b) Deutliche Aliasartefakte für  $kr > N_q$ ,  $kr/N_q \approx 1.5$ .

Das VSA kann auf Radien von ca. 0.1-1.2m betrieben werden und beliebig viele Abtastpunkte einbeziehen. So kann theoretisch z.B. mit  $r=0.1m$  und einem Lebedev Grid ( $c_q=1.3$ ) mit  $L=23$  ( $M=590$ ),  $N_q=20$  bis zu  $f \approx 10kHz$  die Forderung  $kr < N$  erfüllt werden. Die obere Grenzfrequenz hängt also insbesondere von Abtastdichte ( $M, r$ ) und Art der Quadratur ab.

## Einbrüche der Modalen Amplituden

*Open Sphere* Arrays (ohne schallharten Reflektor) mit Druckempfängern funktionieren nicht lückenlos auf ihrer gesamten  $kr$ -Bandbreite, soweit sie oben eingegrenzt wurde. Es kommt zu Einbrüchen der modalen Amplituden (vgl. Abb.1a). An diesen Stellen ist der WNG des Arrays sehr gering. Es existieren verschiedene Ansätze diese Instabilität zu vermeiden oder zu beheben [3]. Beispielsweise können Messungen auf zwei verschiedenen Radien günstig kombiniert werden (*Dual Sphere*). Ein anderer Ansatz ist die Verwendung von Druckgradientenempfängern mit Nierencharakteristik. Besonders vorteilhaft hinsichtlich dieser Problematik ist der Einsatz eines *Rigid Sphere* Arrays, bei dem die Mikrofone in eine schallharte Kugel eingelassen sind. Das VSA kann mit einem entsprechenden *Scatterer* versehen werden und als *Rigid Sphere* Array betrieben werden.

## Kombination von Messungen

Soll das Array auf einer großen Frequenzbandbreite eingesetzt werden, so müssen mehrere Messungen auf verschiedenen Radien und ggf. mit unterschiedlichen sphärischen Konfigurationen (*Open/Rigid Sphere*) kombiniert werden, was aus den obigen Abschnitten ersichtlich wird. Nur so kann ein hoher WNG für ein breites Frequenzspektrum erzielt werden.

## Hard- und Software

Das VSA basiert auf einer schlanken Aluminiumkonstruktion mit einstellbarer Messhöhe (ca. 1.20-1.70m),

die sehr geringen Einfluss auf das umgebende Schallfeld hat. Es kommen Präzisionsmotoren mit Magnetbremsen zum Einsatz, um den Messarm exakt positionieren und halten zu können. Der untere Aufbau kann zudem als Drehteller zur Polardatenerfassung verwendet werden. Das System wird via Ethernet angesprochen. Für die automatisierte Messung und Steuerung des Arrays wurde eine umfangreiche Softwareplattform mit GUI entwickelt. Sie umfasst u.a. diverse Quadraturen, Audiotestfunktionen, Sinussweepsynthese und automatisierte Messroutinen für Arraymessungen sowie Polardatenerfassung. Zur Detektion von Zeitinvarianzen während einer sequentiellen Abtastung werden Temperaturmessungen durchgeführt und die Impulsantworten auf Konsistenz geprüft. Die Software beinhaltet ein CAD Modul, das mit einem im VSA integrierten Lasersensor kommuniziert. So ist es möglich, den umgebenden Raum zu vermessen (z.B. Längen, Flächen, Volumen) und dreidimensional als Modell abzubilden, sowie die Position und Ausrichtung des Arrays darin zu verankern. Die akustischen Messdaten können so ohne großen Aufwand mit den geometrischen Raumdaten verbunden werden. Eine automatische Koordinatentransformation im CAD Modul erlaubt das Versetzen des VSA nach der Erfassung geometrischer Daten. Derzeit wird an einer Simulationsumgebung zur Prädiktion und Optimierung von Arraymessungen gearbeitet. Simulationen sowie insbesondere das Arrayprocessing erfordern erhebliche Rechenleistung. Um die Rechenzeit auf praktikable Dimensionen reduzieren zu können, wurde eine Grid-Software (*SciGrid*) entwickelt, die eine Verteilung der Rechenlast auf beliebig viele Clients erlaubt.

## Zusammenfassung

Mit dem VSA konnte ein leistungsfähiges Arraymesssystem entwickelt werden, das Messungen mit großer Frequenzbandbreite und hoher Ordnung ermöglicht. Durch seine Flexibilität eignet sich das System nicht nur für den Einsatz in Raumakustik und Virtual Audio, sondern insbesondere auch für die Grundlagenforschung im Bereich sphärischer Mikrofonarrays selbst, sowie deren optimaler Parametrisierung für verschiedene Anwendungen. So können z.B. Entwürfe für anwendungsspezifische Echtzeitarrays getestet werden.

## Literatur

- [1] William, E.G.: Fourier Acoustics. Academic Press, San Diego, 1999
- [2] Meyer, J. & Elko, G.: A Highly Scalable Spherical Microphone Array Based on an Orthonormal Decomposition of the Soundfield. IEEE ICASSP 2002, vol. 2, pp. 1781-1784
- [3] Rafaely, B.: Analysis and design of spherical microphone arrays. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing 2005, vol. 13, no. 1, pp. 135-143
- [4] Rafaely, B.: Spatial Aliasing in Spherical Microphone Arrays. IEEE Transactions on Signal Processing 2007, vol. 55, no. 3, pp. 1003 - 1010