

institut für elektronische musik und akustik



IEM Report 35/06:

Zwischenreport zum Projekt „Virtual Gamelan Graz (VGG)“

Verfasser:

Franz Zotter, Alois Sontacchi

Kooperationspartner:

Institut für Musikethnologie (IME)

Zukunftsfonds Steiermark (GZ: A3-25R9-05/19)

Stand Oktober, 2006

IEM - INSTITUT FÜR ELEKTRONISCHE MUSIK UND AKUSTIK

Vorstand: O.Univ.-Prof. Mag. DI Dr. Robert HÖLDRICH

A-8010 Graz, Inffeldgasse 10/3, Tel.:+43/(0)316/389 – 3170, FAX:+43/(0)316/389 – 3171

office@iem.at

<http://iem.at/>

Zusammenfassung

Gamelan ist die Bezeichnung für Ensembles in Südostasien, die vorwiegend aus gestimmten Idiophonen (Gongs, Gongspiele, Metallophone) sowie weiteren Instrumenten bestehen. In Zentraljava (Indonesien) wird mit solchen Orchestern die an lokalen Fürstenhöfen entstandene klassische Musik gespielt, die heute auch an örtlichen Musikhochschulen gelehrt wird. Um ihre Gestaltungsprinzipien genauer untersuchen zu können, die zwar bereits seit vielen Jahren Gegenstand musikethnologischer Forschung sind, uns jedoch immer noch vor eine Reihe bisher ungelöster Probleme stellen, soll ein interdisziplinär ausgerichtetes Projekt, in dem Künstler, Geistes- und Naturwissenschaftler zusammenarbeiten, neue Möglichkeiten entwickeln, die auch den gegenwärtigen Stand der Entwicklung im Hinblick auf Klangsynthese und algorithmische Verfahren zur Generierung von musikalischen Parts nutzen. Das Projekt Virtual Gamelan Graz (VGG) setzt genau hier an eine Schnittstelle zwischen westlichen und javanesischen Musikern bzw. ein Tool für Musikethnologische Feldforschungen zu realisieren.

1 Einleitung

Gamelan - „der Ursprung des Gongs“ - hat auch bei westlichen Musiker, Künstler und Musikwissenschaftler schon seit Jahrzehnten für Interesse und Auseinandersetzung gesorgt, wobei eine Reihe von Problemen nach wie vor ungelöst sind. Gamelan ist die Bezeichnung für Ensembles in Südostasien, die vorwiegend aus gestimmten Idiophonen (Gongs, Gongspiele, Metallophone) sowie weiteren Instrumenten bestehen (siehe dazu Abb. 1). In Zentraljava (Indonesien) wird mit solchen Orchestern die an lokalen Fürstenhöfen entstandene klassische Musik gespielt, die heute auch an örtlichen Musikhochschulen gelehrt wird. Virtual Gamelan Graz (VGG) soll im Hinblick auf musikethnologische Forschung neue Möglichkeiten bieten, welche auch den gegenwärtigen Stand der Entwicklung im Bereich der spektralen und spatialen Klangsynthese sowie der algorithmischen Verfahren zur Generierung von musikalischen Strukturen nutzen. Ziel des Projektes ist ein steuerbares virtuelles Gamelan-Orchester, welches selbständig Kompositionen der klassischen Musik Zentraljasas in verschiedenen Stimmungen und modifizierbaren Klangfarben generiert und wodurch das Spiel auf unterschiedlichen Sets von Instrumenten simuliert werden kann. Dieses interdisziplinäre Forschungsprojekt erfolgt in Zusammenarbeit mit dem Institut für Musikethnologie (IME) der Kunstuniversität Graz (KUG). Die Gesamtprojektleitung obliegt Prof. Gerd Gruppe. Das Projekt VGG startet mit Oktober 2005 und wird für den Zeitraum von 2 Jahren durch Fördermittel des Zukunftsfonds Steiermark ermöglicht.



Abbildung 1: Bildausschnitt eines typischen Gamelanorchesters (Quelle: IME Homepage)

2 Ziele

In der Einleitung wurde bereits das Aufgabenfeld des Projektes in einem großen Bogen umrissen. Dieser Zwischenbericht beschränkt sich auf einzelne Teilaspekte deren Ergebnis- und Kenntnisstand dokumentiert werden soll. Eine Aufgabenstellung im Bereich der algorithmischen Komposition wird von Gerhard Nierhaus am IEM durchgeführt[Nierhaus06]. Es wird versucht mit nichtwissensbasierten Methoden automatisch Kernmelodien (*ba-*

lungan) des javanesischen Gamelans zu erzeugen. Im Folgenden werden die drei Aspekte: Klanganalyse, Analyse der räumlichen Abstrahleigenschaften und Ansätze für die Wiedergabe d.h. Klang- und Abstrahlsynthese dokumentiert. Die Ergebnisse werden anhand ausgewählter Instrumente (siehe dazu Abb. 2) des Gamelanorchesters diskutiert.

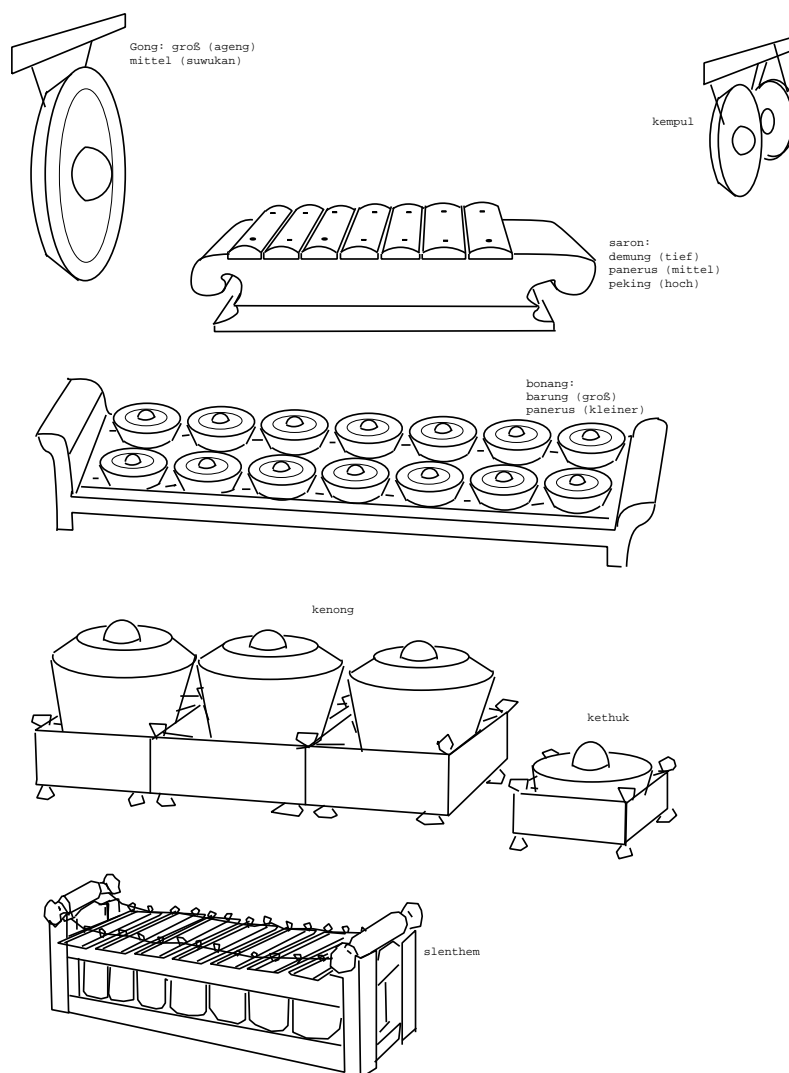


Abbildung 2: Die dargestellten Typen von Gamelan Instrumenten sind im Projekt VGG Forschungsgegenstand akustischer Untersuchungen.

3 Methodik

In Abb. 3 ist das Blockdiagramm einer angestrebten Analyse-Synthesekette abgebildet. Das abgestrahlte Schallfeld eines Instrumentes wird an mehreren Positionen gleichzeitig

erfasst und in klanglicher und räumlicher Hinsicht ausgewertet. Mit den erhaltenen Parametern kann eine vollsynthetische klangliche und akustisch-holographische Wiedergabe angesteuert werden.

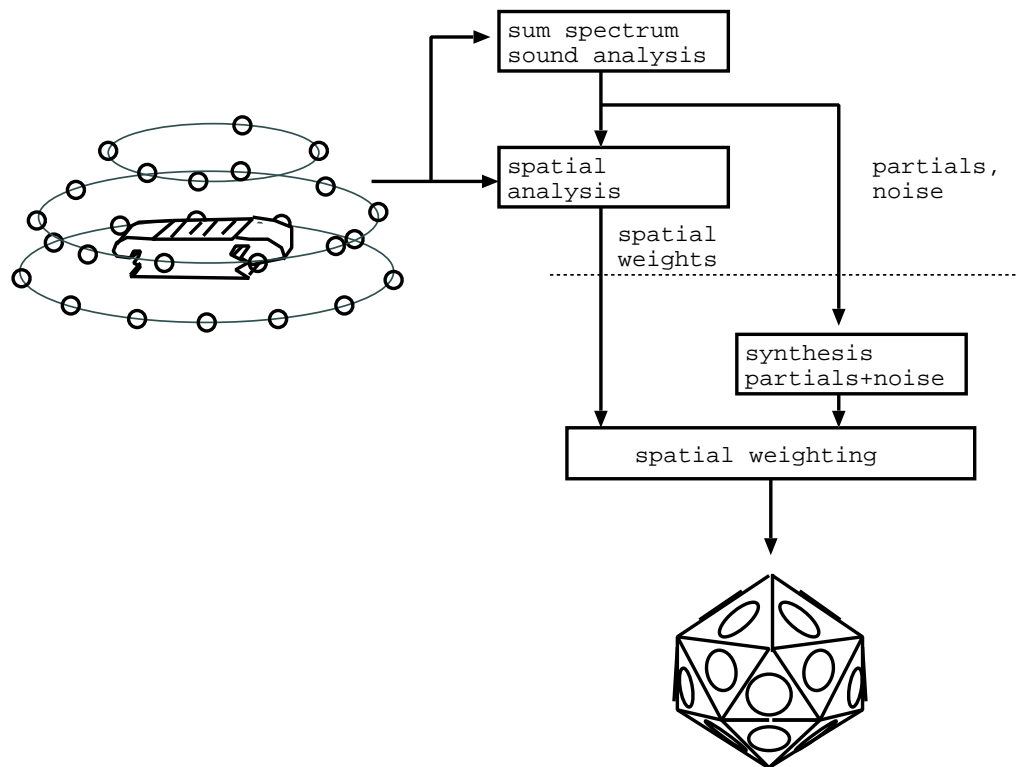


Abbildung 3: Blockdiagramm der gesamten Analyse-Synthese-Kette für Klang und Abstrahlung

3.1 Messumgebung

3.1.1 Messplatz

Seit geraumer Zeit existiert am IEM eine Messkoje, die für unterschiedliche akustische Messanwendungen zum Einsatz kommt. Dieser in-situ Messplatz sollte die Möglichkeit bieten folgende akustische Messaufgaben zu bewerkstelligen:

- Messungen von Außenohrübertragungsfunktionen (HRTF - Head related Transfer Functions)
- Messungen von Richtcharakteristika von Lautsprecher (bzw. kleinen Lautsprecherarrays) und Mikrofonarrays (directivity patterns)
- Messung des Schallleistungspegels von kleinen Schallquellen

Obwohl sich die akustische Dimensionierung primär basierend auf Anwendungen für die Messung von Außenohrübertragungsfunktionen orientiert hat, können die beiden weiteren Aufgabenfelder für eingeschränkte Frequenzbereiche (im Bereich über 500Hz) standardmäßig bei höchster Güteklasse betrieben werden. Durch einfache Modifikationen kann dieser Bereich auch ausgeweitet werden, wie dies z.B. in Abschnitt 3.1.2 beschrieben wird. Die Vorgaben für das Einsatzfeld und genauere spezifische Eckdaten finden sich an einer anderen Stelle [IEMReport06].

3.1.2 Mikrofonanordnungen

Bei der Vermessung von räumlich gemittelten Klangspektren und akustischen Abstrahlungsmustern eignen sich insbesondere kreis- und kugelförmige Mikrofonanordnungen (siehe auch [Giron96], [Weinreich80]).

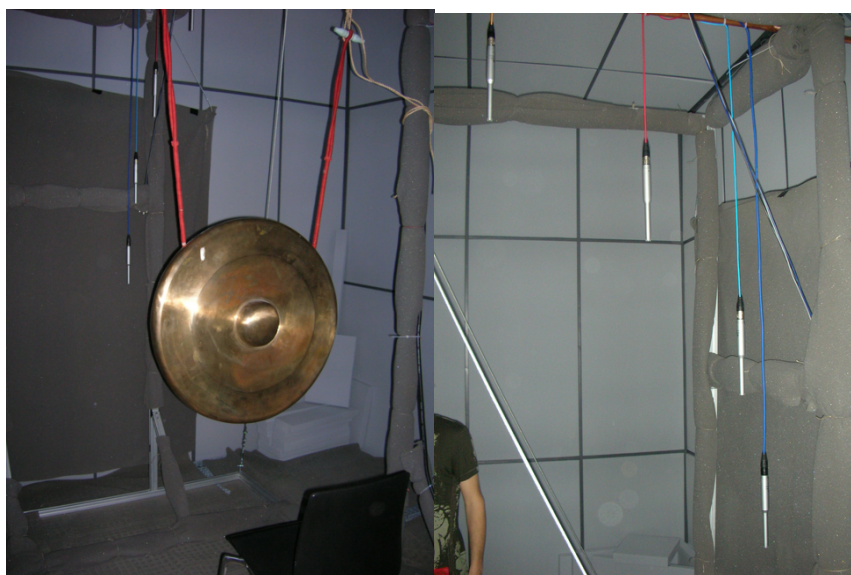


Abbildung 4: Aufbau für hängende, rotationssymmetrische Strahler (zu sehen: *gong su-wukan*).

Da bei zahlreichen Instrumenten sowohl Anregungsstärke, Anregungsort und auch Klang nicht exakt reproduzierbar sind, werden sämtliche Schallsignale bei der Erfassung synchron aufgezeichnet. Wir verwenden dazu im Wesentlichen drei unterschiedliche Anordnungen:

1. Kreisförmige Anordnung mit 20° Auflösung für rotationssymmetrische Abstrahlungswirkungen hängender Instrumente (Abb. 4),
2. Halbkugelförmige Anordnung mit 26 Mikrofonen (12-10-4 Mikrofone auf 0°, 36° und 72° Elevation) für Halbraummessungen am Boden stehender Instrumente (Abb: 5).



Abbildung 5: Aufbau für am Boden stehende Instrumente (Halbraummessungen; zu sehen: *saron demung*).

3.2 Klanganalyse und Klangsynthese

Zur Klanganalyse werden 3 Techniken vorgeschlagen:

1. *autoregressive moving average* Modell mit *frequency zooming* (FZ-ARMA)
2. *(auditory) warped spectral model* (WSM)
3. *empirical mode decomposition* (EMD)

3.2.1 Frequency Zooming - Autoregressive Moving Average (FZ-ARMA) Modeling

Werden die Instrumente als lineare dynamische Systeme betrachtet, so kann Folgendes angenommen werden:

- Der Klang enthält einzelne Teiltöne mit fixer Frequenz (Moden, Eigenschwingungen).
- Diese Moden sind voneinander unabhängig, und können angeregt werden.
- Da von der Stabilität ausgegangen werden kann, klingen diese Teiltöne im homogenen Fall (wenn keine Anregung mehr erfolgt) ab.

Diese Annahmen können bei der klanglichen Analyse ausgenutzt werden. Wir können die Moden/Eigenschwingungen des Instrumentalklangs als gedämpfte Exponentialschwingungen mit bekannter Ausklingzeit und bekannter Frequenz modellieren (AR-Modell). Erfolgt eine kurze Anregung des Instruments, kann dieser über inverse Filterung mit dem AR-Modell ermittelt und in Form eines kurzen Nullstellenmodells gespeichert werden (MA-Modell). Zusammengefasst spricht man von einem ARMA-Modell.

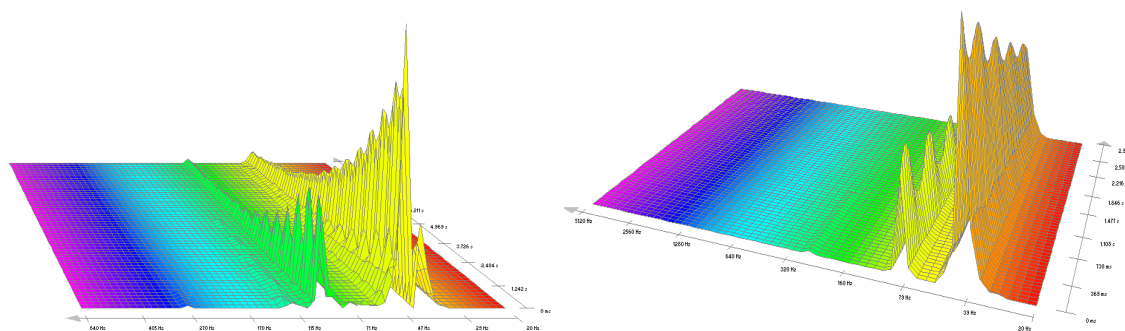


Abbildung 6: Wasserfalldiagramme des Klangs eines *gong ageng*, Original (li.) im Vergleich zum FZ-ARMA Modell (re.).

Um Stabilitätsprobleme bei sehr langen Klängen zu umgehen und eine bessere Frequenzauflösung zu erhalten, kann *frequency zooming*, ein Sub-Band Verfahren, verwendet werden, siehe [Karjalainen02]. Abb. 6 zeigt einen Vergleich der Wasserfalldiagramme von originalem und resynthetisiertem Klang.

3.2.2 Auditory Warped Spectral Modeling (WSM)

Ein Spektralbereich mit der Frequenzauflösung des menschlichen Gehörs ist bei der Nachbildung von Klängen sehr hilfreich. Insbesondere, wenn ein Instrument sehr viele Teiltöne > 100 besitzt, ist es normalerweise schwierig mit wenigen 20 – 30 Teiltönen eine originalgetreue Nachbildung zu bekommen. Vor allem weil im gewöhnlichen Frequenzbereich oft nicht erkennbar ist, welche Töne für den Höreindruck die größte Rolle spielen. Im *auditory warped* Spektrum [Smith99][Haermae01] ist das entschieden einfacher.

In Abb. 7 wird das verdeutlicht: Das auditiv verzerrte Spektrum mit Verdeckungsschwellen zeigt nur wenige relevante Spitzen, das sind etwa 10 Teiltöne. Ein gewöhnliches Spektrum mit ähnlich guter Auflösung hat hunderte von Teiltönen unter welchen die relevanten schwer auffindbar sind.

Die Auswertung erfolgt in zwei Richtungen 8:

- Teiltonzerlegung und Verfolgung von Amplitude und Frequenz (deterministischer, schmalbandiger Anteil)
- Auswertung des Restsignals (stochastischer, breitbandiger Anteil)

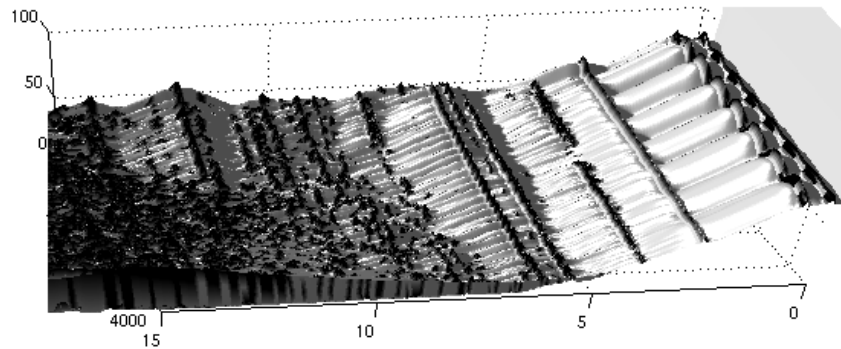


Abbildung 7: Auditiv verzerrtes und maskiertes Wasserfalldiagramm (STFT, *short term Fourier transform*) des *gong ageng*-Klanges. Die charakteristische 2[Hz] Schwebung des zweiten Teiltones (tiefe Frequenzen rechts) ist deutlich erkennbar.

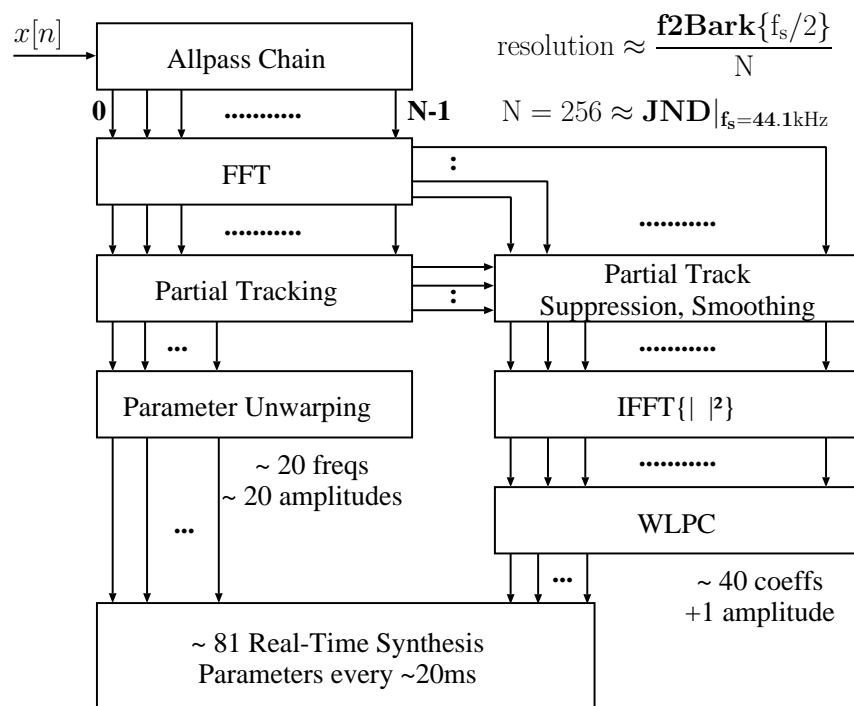


Abbildung 8:

3.2.3 Empirical Mode Decomposition (EMD)

Die Fouriertransformation besitzt im wesentlichen zwei grundsätzliche Anforderungen an das zu transformierende Signal: Stationarität und Linearität. Im Allgemeinen kann man aber davon ausgehen, dass ein reelles, physikalisches Signal diese Anforderungen nicht erfüllt. Aus diesem Grunde wurden verschiedenste Transformationen wie z. Bsp. die Kurz - Zeit - Fouriertransformation oder Wavelet - Transformation entwickelt, welche aber genauso in unterschiedlicher Weise Anforderungen an den zu bearbeitenden Zeitausschnitt

des Signals hinsichtlich Stationarität und Linearität stellen.

Eine relativ neue Methode, genannt Empirical Mode Decomposition (EMD) [Huang98] zerlegt das zu untersuchende Signal in eine neue Klasse von Signalen, den so genannten Intrinsischen Mode Funktionen (IMF). Diese besitzen die Eigenschaft der lokalen Mittelwertfreiheit. D.h.: Betrachtet man ein Signal zeitlich gesehen in einem lokalen Bereich, so setzt sich dieses aus einer Oszillation und einem *Mittelwert*, um den die Oszillation schwingt, zusammen. Es stellte sich nun heraus, um eine im physikalischen Sinne sinnvoll interpretierbare Schwingungsfrequenz zu erhalten, muss diese Schwingung eben mittelwertfrei sein (für Momentanfrequenzen lokale Mittelwertfreiheit). Praktisch bedeutet dies, dass die Anzahl der Nullstellen und die Anzahl der Extremwerte gleich groß bzw. maximal um eins differieren dürfen. Für die Bildung des Mittelwerts werden zwei Einhüllende (eine obere und untere Einhüllende durch Interpolation der Maxima und Minima) errechnet.

Für die Berechnung der tatsächlich vorhandenen Spektralkomponenten werden aus den reellen IMFs analytische Signale gebildet, aus deren Phase durch Ableitung nach der Zeit die Momentanfrequenzen errechnet werden (Hilbert-Huang-Spektrum).

Grundsätzliche Probleme liegen in der Wahl der Interpolationsmethode der Extremwerte, der Randeffekte bei der Einhüllung des Signals, Verwendung des Hilbert - Transformators für die Berechnung des Hilbertspektrums, Bestimmung eines brauchbaren Abbruchkriteriums für die Findung einer IMF. Bei Wahl der Interpolationsmethode zeigte sich, je höher die Ordnung desto besser erfolgt die Interpolation aber auf Kosten der Rechenzeit. Praktisch hat sich eine kubische Interpolation bewährt.

Wie bereits oben erwähnt, ergibt sich für die detektierten IMFs aus Sicht der signalinhärenten Frequenzen eine hierarchische Reihenfolge. D.h. Jene IMF, welche als erste errechnet wird, beinhaltet auch die im Signal höchsten vorkommenden Frequenzen. Umgekehrt beinhalten letztere die tieffrequenten Anteile bzw. das Residuum, welches eine monotone Funktion darstellt. Der oben dargestellte erweiterte EMD Ansatz für die Klanganalyse zeigt, dass man durch gezielt vorangehende Filterung das Signal in eine bestimmte Anzahl von Bändern zerlegen und eine *a priori* Bestimmung über den Inhalt der in den einzelnen Bändern detektierten IMFs vorgeben kann.

Nach Untersuchungen erscheint es sinnvoller, nicht das Residuum zum darunter liegenden Frequenzband zu addieren sondern die erhaltene IMF vom Filtereingangssignal zu subtrahieren (kein Informationsverlust). Das erhaltene *tiefpass-gefiltert* Signal dient als neues Ausgangssignal für die weitere Analyse. Das Residuum findet somit keine weitere Verwendung mehr, außer beim tieffrequentesten Band. Hier muss es natürlich aufgehoben und als quasi letzte IMF gehandhabt werden.

3.3 Analyse der Abstrahlcharakteristik

Zur Auswertung der Abstrahlungswirkung werden die Informationen der Klanganalyse herangezogen. Das ermöglicht, bei der Auswertung jedem Teiltonverlauf ein eigenes Abstrahlungsmuster zuzuordnen. Dazu werden zunächst die Signale sämtlicher Mikrofone

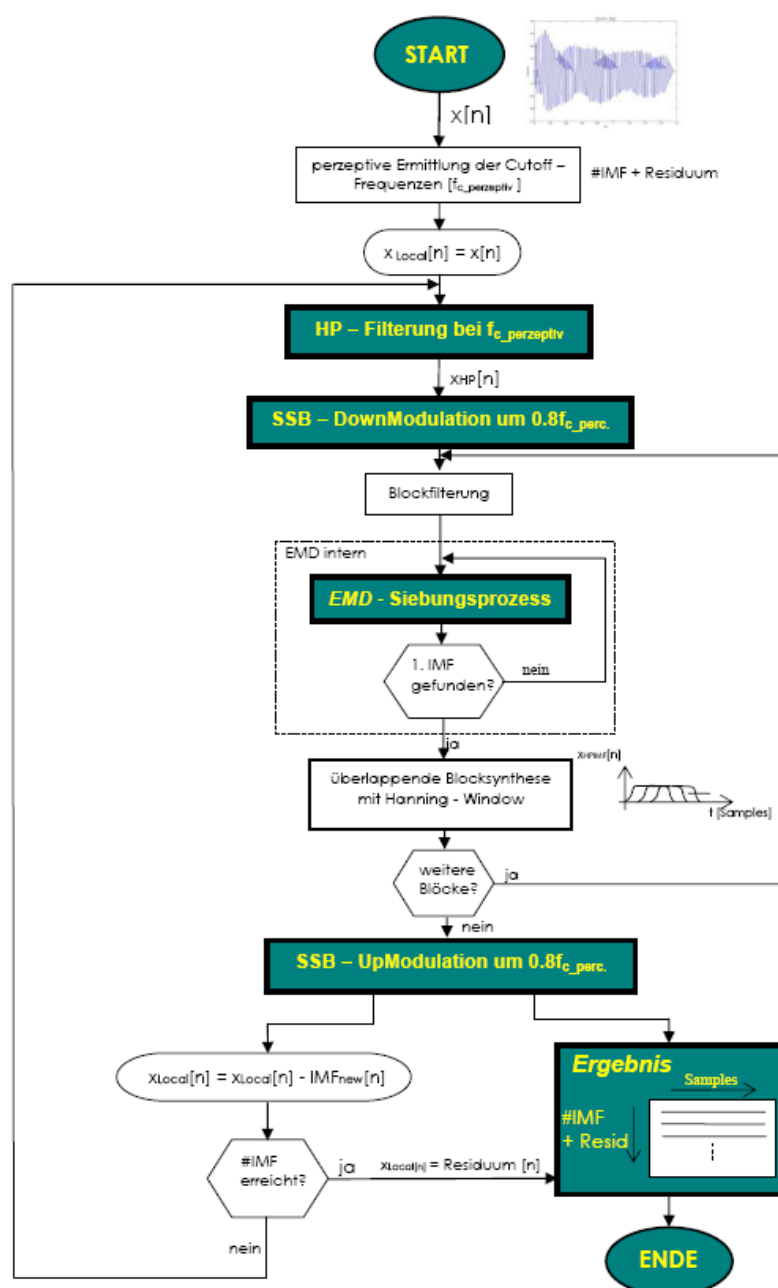


Abbildung 9: Erweiterter EMD Algorithmus für die Klanganalyse.

(siehe Abb. 4, Abb. 5) analytisch gemacht (*Hilbert* Transformator). Danach können mit Bandpass Filtern die gesuchten Teiltonverläufe herausgelöst werden. Dabei ergibt sich für jeden Teilton eine komplexwertige sphärische Verteilungsfunktion an der Mikrofonanordnung. Diese Verteilung beschreibt die Abstrahlung des Musikinstruments im kugelförmigen Koordinatensystem.

Die als Messergebnis vorliegende komplexwertige sphärische Verteilung kann nun ins Basissystem der *Kugelflächenfunktionen* Abb. 10 übergeführt werden (=Fourier-Legendre

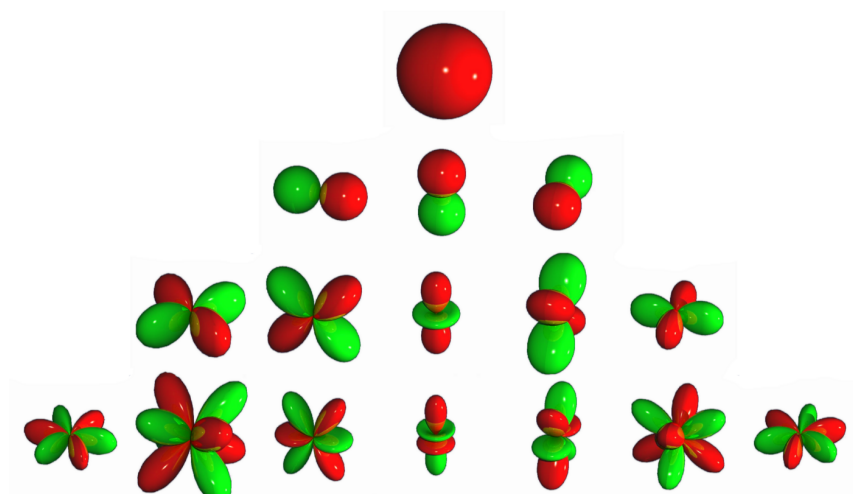


Abbildung 10: Die reellwertigen *Kugelflächenfunktionen* bis zur Ordnung $N = 3$.

Bereich). Für beide unterschiedlichen Symmetrien Abb. 11 und Abb. 12 können mehrdeutige Basisfunktionen weggelassen werden (ausgegraut).

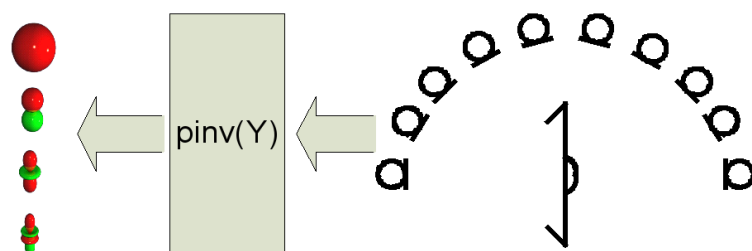


Abbildung 11: Schema für die Zerlegung in rotationssymmetrische *Kugelflächenfunktionen* bis zur Ordnung $N = 3$.

Die Vorteile des *Fourier-Legendre* Bereichs sind eine isotrope Winkelauflösung im Raum und eine enge Verknüpfung mit der akustischen Wellengleichung im sphärischen Koordinatensystem (*Multipolstrahler*, [Giron96]).

An dieser Stelle muss zur aber auch gesagt werden, dass sich nur eine begrenzte Auflösung darstellen lässt. Die folgenden Möglichkeiten bieten eine unterschiedliche Nutzung der gegebenen Auflösung.

3.3.1 Auswertung der gemessenen Betragsverteilung

Die einfachste Auswertung erhält man, wenn man ausschließlich den Absolutbetrag der gemessenen Abstrahlungsverteilung mit einem *Least-Squares* Verfahren in *Kugelflächenfunktionen* überführt. Dabei entstehen einerseits Fluktuationen höherer Ordnung durch

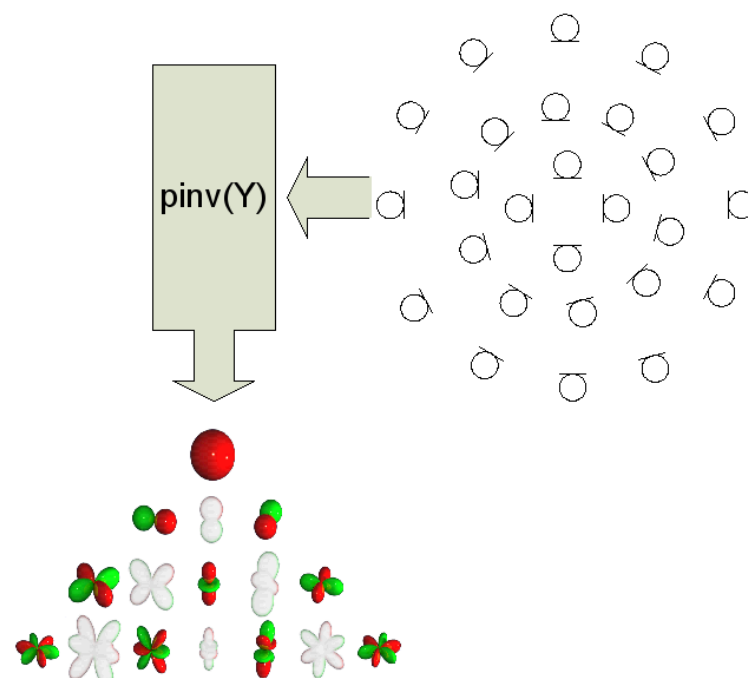


Abbildung 12: Schema für die Zerlegung in gerade symmetrische *Kugelflächenfunktionen* bis zur Ordnung $N = 3$.

die Nichtlinearität bei der Betragsbildung. Andererseits wird auch die Phasenlage, bzw. das Vorzeichen der Abstrahlung verworfen. Insgesamt ist daher die Auflösung der Abstrahlungswirkung eher gering.

Im Falle des Grundtons des *bonang barung* Ton Nr.3 ergibt sich die Verteilung wie in Abb 13.

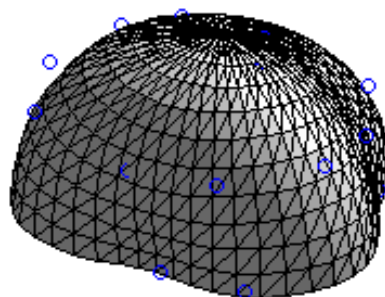


Abbildung 13: Abstrahlungs des Grundtons, *bonang barung* Nr.3, bei Betragsbildung und $N = 3$.

3.3.2 Auswertung der gemessenen komplexwertigen Verteilung

Im Grunde ist es genauso gut möglich eine komplexwertige Verteilung heranzuziehen, wenn wir bereits über ein *analytisches Signal* verfügen und mit *Least Squares* in komplexwertige *Kugelflächenfunktionen* überzuführen. Dabei treten die durch die nicht idealen Eigenschaften des Messraumes entstehenden Fehler allerdings verstärkt in Erscheinung. Zudem resultieren starke Phasenschwankungen in falsch abgebildeten Schalldruckbeträgen (meist zu gering, siehe Abb. 14).

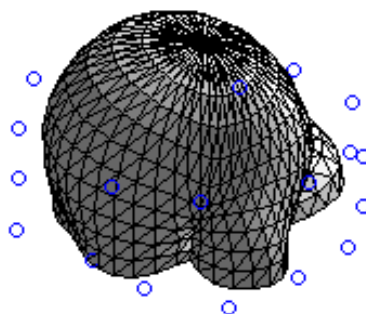


Abbildung 14: Abstrahlungs des Grundtons, *bonang barung* Nr.3, komplexwertig bei $N = 3$.

3.3.3 Optimierung der gemessenen Verteilung: Semidefinite Programing

Soll mit einer beschränkten Auflösung eine möglichst gute Abbildung des Betragsschalldruckes im *Fourier-Legendre* Bereich erreicht werden, so kann auch ein relativ junges Verfahren alternativ zur *Least-Squares* Methode verwendet werden. Wie die Arbeit [Kassakian06] behandelt, kann durch einen spezieller Ansatz und die Verwendung freier Pakete [Grant06] eine Optimierung der Absolutbeträge durchgeführt werden. Die entscheidende Verbesserung im Vergleich zur Betragsbildung ist hier, dass die Phasen-/Vorzeicheninformation als Freiheitsgrad genützt werden kann, siehe Abb. 15.

3.4 Wiedergabe

Zur holografischen Wiedergabe der Abstrahlungswirkung fließen die Ergebnisse der Klang- und Abstrahlungsanalyse zusammen. Diese Art zur Wiedergabe wurden bereits relativ früh am IRCAM in Paris aufgezeigt [Warusfel97], ist bislang aber noch unzureichend ausgelotet. Erst vor kurzem hat das CNMAT in Berkeley neuerlich auf diesem Gebiet Forschungen unternommen [Kassakian06].

Das IEM hat im Zuge des VGG-Projekts nun auch die Gelegenheit Forschungen auf diesem Gebiet anzustellen. Dazu haben wir einen *Ikosaederlautsprecher* geplant und angefertigt, der uns die Wiedergabe von Abstrahlungswirkungen ermöglichen soll, siehe Abb. 16(a).

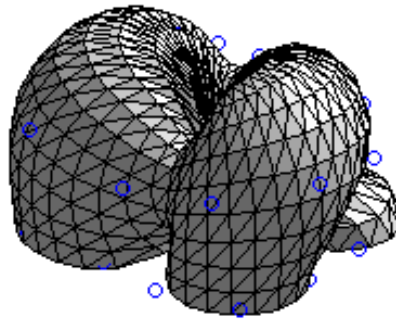
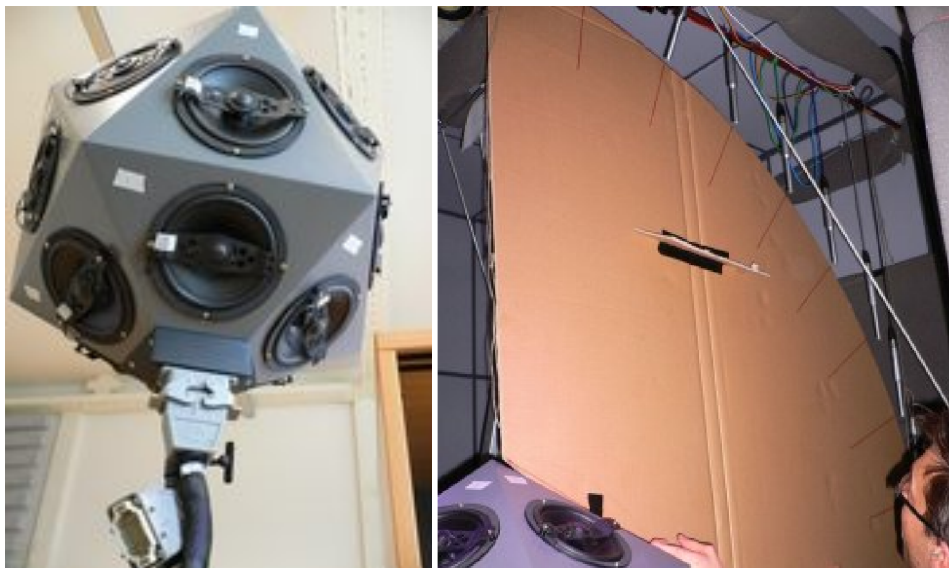


Abbildung 15: Abstrahlungs des Grundtons, *bonang barung* Nr.3, durch Semidefinites Programmieren (SDP) bei $N = 3$.



(a) Ikosaederlautsprecher.

(b) Vermessung des Lautsprechers am 10° Raster.

Abbildung 16: Wiedergabesystem und Messaufbau zur Wiedergabe akustischer Abstrahlungswirkungen.

3.4.1 Vermessung und Inversion

Zur Bestimmung der Ansteuerungsfiler der Einzellautsprecher wird die Abstrahlung jedes Lautsprechers vermessen. Dieser Messaufbau kann als *multiple-input-multiple-output* (MIMO) System bezeichnet werden und ist in Abb. 16(b) und Abb. 17(a) zu sehen.

Dieses MIMO-System kann über das Gleichungssystem

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} \quad (1)$$

beschrieben werden, wobei \mathbf{x} die Eingangsgrößen an den Lautsprechern, \mathbf{H} die Matrix

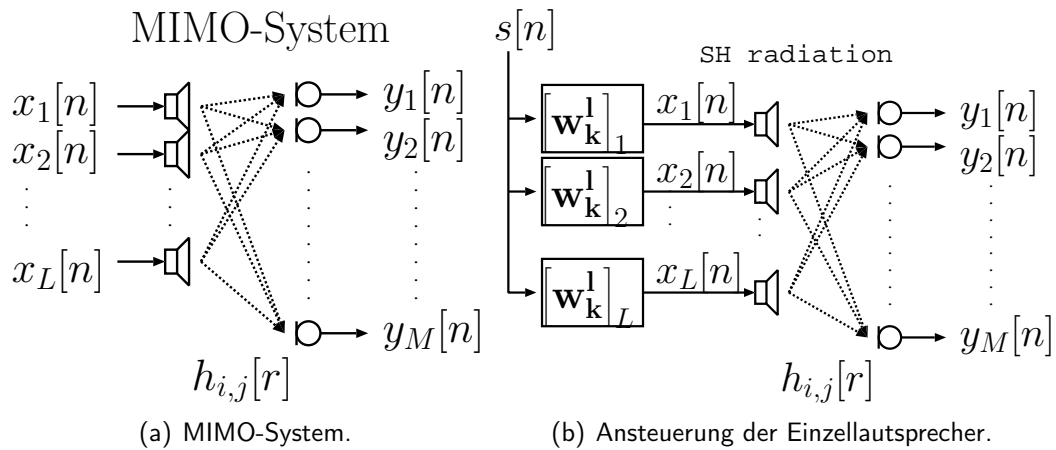


Abbildung 17: Blockschaltbilder: Vermessung und Betrieb des Ikosaederlautsprechers.

mit sämtlichen Übertragungsfunktionen und \mathbf{y} die messbaren Größen an den Mikrofonen darstellen. Sämtliche Größen sind komplexwertig und im Frequenzbereich definiert.

3.4.2 Bestimmung der Übertragungsfunktionen

Die Übertragungsfunktionen \mathbf{H} werden über eine Impulsantwortmessung identifiziert. Dazu müssten bei L Lautsprechern und M Mikrofonen somit $M \cdot L$ Übertragungswege identifiziert werden. Durch die Symmetrien des Ikosaeder, ergeben sich Vereinfachungen.

So werden durch geschicktes Vertauschen sämtliche Übertragungsfunktionen auf der Messfläche (Abb. 18) aus insgesamt 20 Messungen ergänzt, siehe Abb. 19.

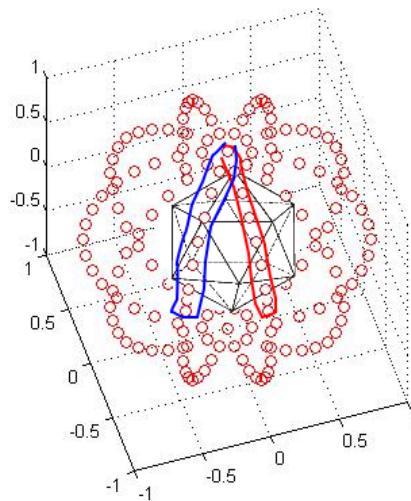


Abbildung 18: Messgitter und davon vermessene Positionen.

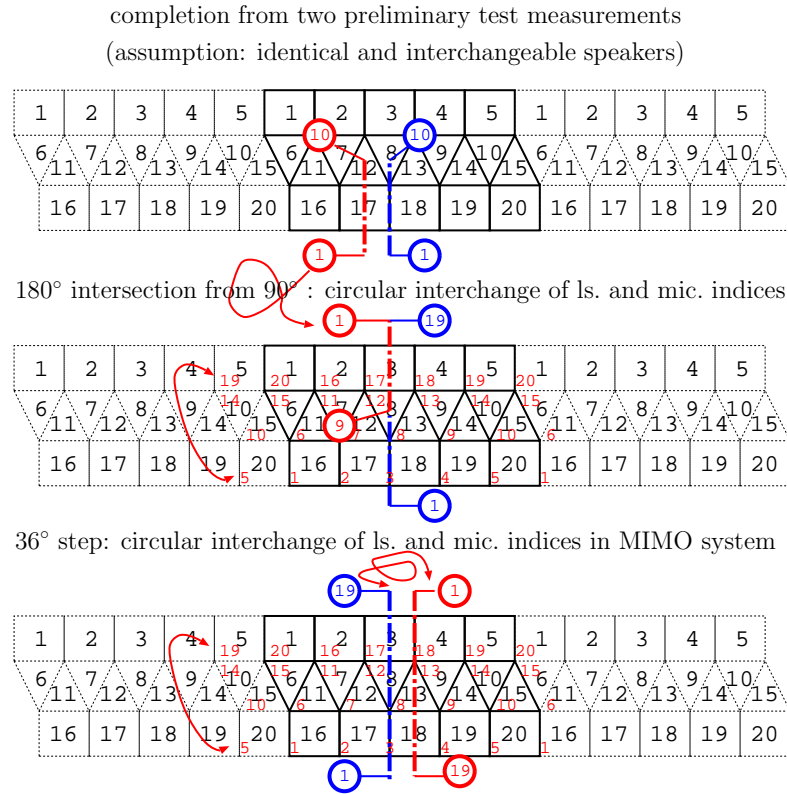


Abbildung 19: Vertauschungsschema zur Nutzung der Symmetrien bei der Messung.

3.4.3 Bestimmen der Ansteuerungsfiler

Zur Bestimmung der Ansteuerungsfiler muss das Gleichungssystem invertiert werden. Als Zielvorgabe setzen wir das Basissystem der *Kugelflächenfunktionen* für y ein $y = Y$, sowie für x die Ansteuerungsmatrix W mit $x = W$. So erhält man die Ansteuerungsfiler:

$$W = H^\dagger Y, \quad (2)$$

wobei $[\cdot]^\dagger$ die *Least-Squares* Pseudo-Inverse ist.

Ein besseres Ergebnis kann erreicht werden, in dem eine Gewichtungsmatrix C eingeführt wird, und ein *Weighted Least-Squares* System angeschrieben wird. Die Lösung ist dann:

$$W = (C H)^\dagger C Y, \quad (3)$$

und enthält die flächenbezogenen Fehlergewichte C .

3.4.4 Bewertung des Systemfehlers

Zur Bewertung des Systems können die Methoden aus [Kassakian06] verwendet werden. Dabei ergeben sich für die Ordnungen der *Kugelflächenfunktionen* minimale und maximale Grenzen des Fehlers $\sigma_e = \sqrt{\sum_m |e[m]|^2}$, siehe Abb. 20.

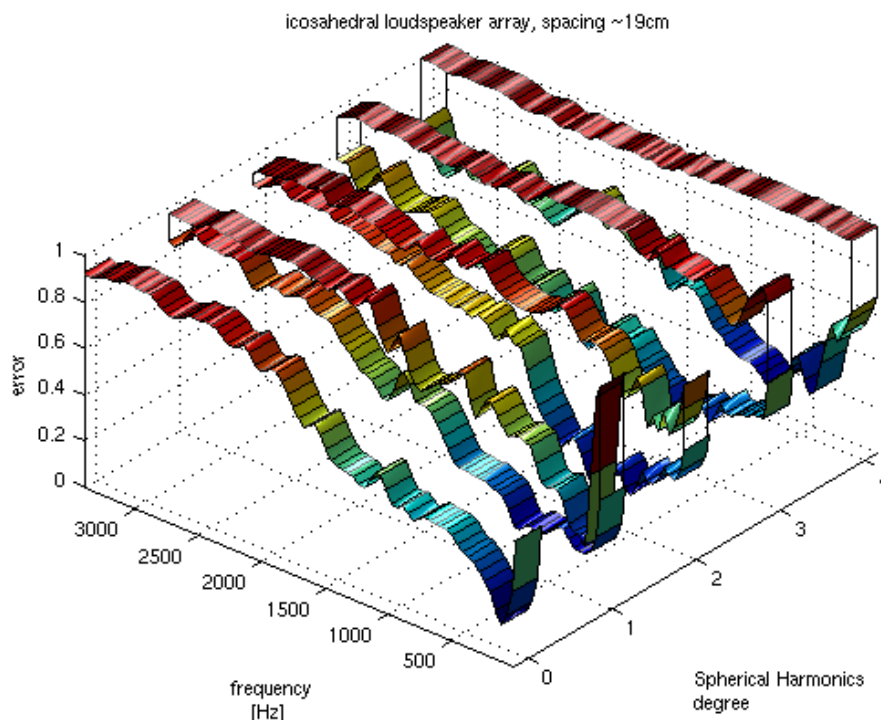


Abbildung 20: Die Fehlerbewertung nach Kassakian [Kassakian06] wird aus der Messung gewonnen und beschreibt die Steuerbarkeit der *Kugelflächenfunktionen* der Ordnungen n . Der verwendbare Bereich liegt im Intervall $0 \leq \sigma_e \leq 0.7072$.

3.4.5 Modellierung der Physikalischen Grenzen

Über eine Randbedingung können die physikalischen Grenzen eines sphärischen Wiedergabesystems aufgezeigt werden. In Abb. 21 ist ein Modell der Schallschnelle am Radius des Ikosaeders dargestellt.

Dabei geht es darum, das sphärische Lautsprechersystem als Kugel zu modellieren, an welcher die Schallschnelle 0 ist. Nun kann man Kugelhappen an den Positionen der Lautsprecher einführen, an welchen die Schallschnelle einen vorgegebenen Wert annehmen kann. Wie in [Williams99] gezeigt, ist die Schallausbreitung im *Fourier-Legendre* Bereich relativ einfach über *sphärische Hankelfunktionen 2.Art* zu beschreiben.

4 Diskussion & Ausblick

An der Kunstuniversität Graz befinden sich zwei Gamelan Sets, die sich anhand ihrer Stimmung, d.h. 5-stufige (*sléndro*) bzw. 7-stufige (*pélog*) Skala, unterscheiden. In der ersten Projektphase wurden bereits sämtliche Instrumente beider Sets (exkl. der Spießgeige) monophon aufgenommen.

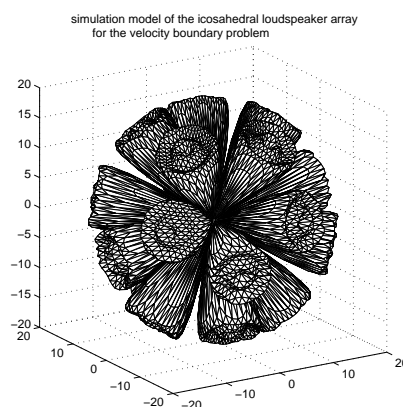


Abbildung 21: Modellierung der Randwerte des Ikosaeders in *Kugelflächenfunktionen*.

Wie in den einzelnen Abschnitten des Berichtes gezeigt, wurden bereits Lösungsansätze erarbeitet und für erste Untersuchungen implementiert und getestet.

Im VGG-Projekt ergeben sich daher folgende weitere Schritte aus unserer Sicht:

- Evaluierung der ausgewählten und adaptierten Verfahren
- Klanganalyse und Parameterextrahierung sämtlicher Klangkörperaufnahmen
- Auswertung der Abstrahleigenschaften der ausgewählten Klangkörper
- Schnittstellendefinitionen - *Zusammenführung der Ergebnisse aus den unterschiedlichen Untersuchungsgegenstände für die Softwareimplementierung*
- Softwareimplementierung

Literatur

- [Fleischer01] Helmut Fleischer, Schwingungsuntersuchungen an Gongs, Universität der Bundeswehr München, 2001.
- [Weinreich80] G. Weinreich und E. G. Arnold, Method for measuring acoustic radiation fields, JASA vol. 68, iss. 2, 1980.
- [Giron96] Frank Giron, Dissertation, Investigations about the directivity of Sound Sources, 1996.
- [Karjalainen02] Matti Karjalainen, AR/ARMA Analysis and Modeling of Modes in Resonant and Reverberant Systems, 112th AES Convention, Berlin, 2004.
- [Smith99] J. O. Smith und J. S. Abel, Bark and ERB bilinear transform, IEEE Trans. Speech and Audio Processing, vol. 7, no. 6, 1999.

- [Haermae01] Aki Härmä, Frequency-warped autoregressive modeling and filtering, Helsinki University of Technology, 2001.
- [Kassakian06] Peter Kassakian, PhD. Dissertation, Convex Approximation and Optimization with Applications in Magnitude Filter Design and Radiation Pattern Synthesis, CNMAT Berkeley, 2006.
- [Grant06] Michael Grant, Stephen Boyd, Yinyu Ye, MATLAB Software for Disciplined Convex Programming, Stanford University, 2006.
- [Warusfel97] O. Warusfel, P. Derogis, R. Caussé, Radiation Synthesis with Digitally Controlled Loudspeakers, 103rd AES Convention, New York, 1997.
- [Williams99] Earl G. Williams, Fourier Acoustics, Academic Press, 1999.
- [IEMReport06] Alois Sontacchi, IEM Report, Aufbau und technische Beschreibung des IEM insitu-Messplatzes, 2006.
- [Nierhaus06] Gerhard Nierhaus, Folder, Algorithmische Komposition am IEM, 2006.
- [Huang98] Huang et al., The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, Proc. R. Soc. Lond. A, 1998.