

Akustische Messtechnik 2

Laborübung
SS 2012

Labortermin:

16.04. - 20.04.2012

Teilnehmer:

Brosch Richard
Halder Clemens
Zenke Katharina
(Müller Boris)

Betreuer:

DI Dr.rer.nat. Franz Zotter



Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	3
2	Einleitung	4
3	Messungen mit planarem Mikrofonarray	4
3.1	Messaufbau	4
3.2	Kalibrierung der Mikrofone	5
3.3	Messung an einem Tropfenlautsprecher	6
3.3.1	Messaufbau	6
3.3.2	Messung	7
3.3.3	Berechnung des Wellenzahlspektrums	8
3.3.4	Diskussion der Messergebnisse	12
3.4	Messung an einer Punktschallquelle auf einer ebenen Platte	13
3.4.1	Messaufbau	13
3.4.2	Messung	14
3.4.3	Messergebnisse	15
4	Kugellautsprechermessung mittels eines kreisförmigen Mikrofonarrays	22
4.1	Messaufbau	22
4.2	Messung	23
4.3	Messergebnisse	24
5	Schlussfolgerung	31

1 Kurzfassung

In dieser Laborübung werden drei Messungen zur lokalen Beschreibung des Schallfelds mittels planaren sowie kreisförmigen Mikrofonarrays durchgeführt.

In der ersten Messung werden die einfallenden ebenen Schallwellen eines Tropfenlautsprechers durch ein planares 8x8 Mikrofonarray bestimmt, indem die Impulsantworten der Mikrofone aufgenommen werden und daraus das Wellenzahlspektrum und damit die Einfallsrichtung von Wellen am Mikrofonarray berechnet wird.

Bei der zweiten Messung soll die Oberflächenschallschnelle einer Platte mit einer Punktschallquelle, die sich in geringem Abstand vor dem Array befindet, genauer bestimmt werden. Dabei soll einerseits durch das Wellenzahlspektrum das Schallfeld bestimmt und andererseits durch fourierbasierte Holografie und durch Holografie mittels Rayleigh-Integral die Position der Punktschallquelle möglichst gut geortet werden.

Bei der dritten Messung soll durch einen Kugellautsprecher eine Kugelschallquelle simuliert werden, deren Schallfeld und somit auch deren Abstrahlcharakteristik durch ein halbkreisförmiges Mikrofonarray gemessen werden soll. Der Kugellautsprecher wurde auf einem Drehteller gedreht, so dass sich ein virtuelles kugelförmiges Array mit insgesamt 648 Richtungsmessungen ergibt. In diesem Protokoll sollen die Messungen ausgewertet und die Ergebnisse für verschiedene Szenarien gegenübergestellt und diskutiert werden.

2 Einleitung

Das Ziel der in dieser Laborübung durchgeführten Messungen ist es, die Einfallsrichtung einer bestimmten Schallquelle im zwei- bzw. dreidimensionalen Raum z.B. über Wellenzahlspektren darzustellen und daraus auf die Zusammensetzung des einfallenden Schallfeldes schließen zu können. Ebenfalls soll im dreidimensionalen Raum die Abstrahlcharakteristik bestimmt werden, welche einen wichtigen Parameter jedes Lautsprechers darstellt. Dabei soll auch auf mögliche Fehler in der Darstellung des Schallfeldes durch Wellenzahlspektren und durch die Berechnung der Schallquellenposition über die Holografie eingegangen werden.

In Abschnitt 3 wird die Messung eines zweidimensionalen Schallfeldes durch ein planares Mikrofonarray durchgeführt.

In Abschnitt 4 wird das dreidimensionale Schallfeld einer Kugelschallquelle durch ein kreisförmiges Array gemessen. Hierbei kann die Abstrahlcharakteristik der Quelle bestimmt werden. Des weiteren kann durch gezielte Ansteuerung der einzelnen Lautsprecher der Kugelschallquelle Beamforming realisiert werden.

3 Messungen mit planarem Mikrofonarray

3.1 Messaufbau



Abbildung 1: 64 Kanal Mikrofonarray.

Für diese Messung wird ein 8x8 Mikrofonarray verwendet um die Einfallsrichtung eines Lautsprechersignals beschreiben zu können. Dafür werden 64 Behringer ECM8000 Mikrofone verwendet welche in 7 cm Abständen zueinander montiert werden (siehe Abbildung 1).

Die Mikrofone sind über mehrere 8-Kanalinterfaces ADAT8000 und einer RME-MADI-Karte mit dem PC verbunden. Das 49cmx49cm große Mikrofonarray wird an einem Ständer angebracht, der sich in einem schallgedämmten Messraum befindet. Als Schallquelle wird bei der ersten Messung ein Tropfenlautsprecher und bei der zweiten Messung eine Punktschallquelle in einer planaren Platte verwendet.

3.2 Kalibrierung der Mikrofone

In einem ersten Schritt wird mittels eines 104dB Pistonfons bei ca. 1 kHz die Pegel der Mikrofone einzeln kontrolliert und bei zu großer Abweichung durch Anpassen der Vorverstärkung grob angepasst. Die Mikrofonfrequenzgänge aller 64 Mikrofone werden abseits von 1 kHz als gleich angenommen. Für diese Kalibrierung wird ein vorgefertigtes PD Patch verwendet, das die Pegelwerte anzeigt und abspeichert. Diese werden daraufhin als Text-Datei exportiert um die Pegelunterschiede der Mikrofone anschließend in Matlab ausgleichen zu können. Die Kalibrierwerte sind in Abbildung 2 dargestellt.

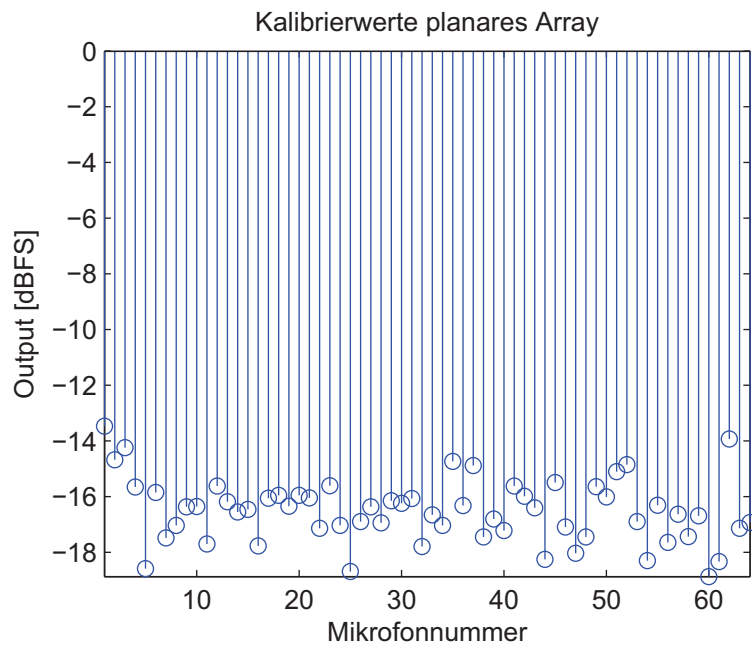


Abbildung 2: Kalibrierwerte der Mikrofone für das planare Array.

3.3 Messung an einem Tropfenlautsprecher

3.3.1 Messaufbau

Bei dieser Messung soll mit Hilfe des Mikrofonarrays das Schallfeld eines Tropfenlautsprechers gemessen werden. Dazu wird der Tropfenlautsprecher in verschiedenen Abständen und mit verschiedenen Einstrahlwinkeln zum Mikrofon-Array positioniert um räumliche Unterschiede des Schallfelds zu messen. Generell wird der Lautsprecher auf gleicher Höhe zum Arraymittelpunkt positioniert (110cm), nur für die letzte Messung befindet er sich in einer Höhe von 220cm.

Die durchgeführten Messungen sind:

- Lautsprecher mit 100cm Abstand, 0° Azimutwinkel und 0°Elevationswinkel
- Lautsprecher mit 100cm Abstand, 30° Azimutwinkel und 0°Elevationswinkel
- Lautsprecher mit 100cm Abstand, 60° Azimutwinkel und 0°Elevationswinkel
- Lautsprecher mit 100cm Abstand, 90° Azimutwinkel und 0°Elevationswinkel
- Lautsprecher mit 50cm Abstand, 30° Azimutwinkel und 0°Elevationswinkel
- Lautsprecher mit 5cm Abstand, 30° Azimutwinkel und 0°Elevationswinkel
- Lautsprecher mit 150cm Abstand, 30° Azimutwinkel und 45°Elevationswinkel

Abbildung 3 zeigt das, für die Messung verwendete, Mikrofonarray und den vermessenen Tropfenlautsprecher.

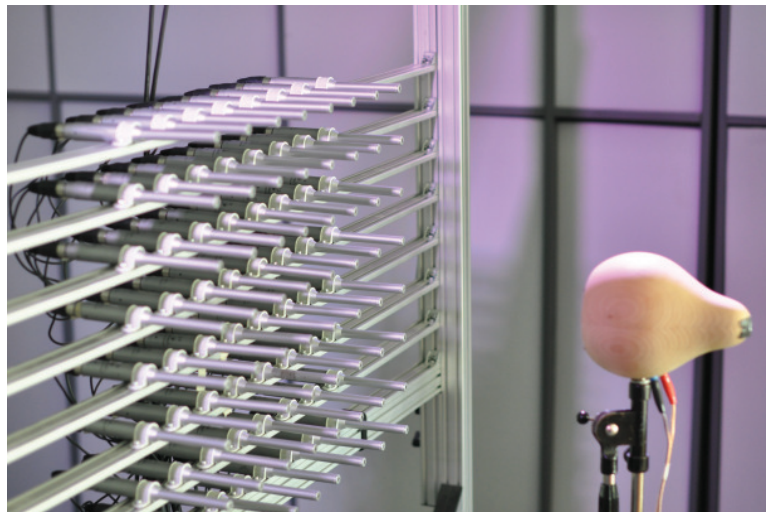


Abbildung 3: Tropfenlautsprecher am Mikrofonarray.

3.3.2 Messung

Um Messwerte für jede Frequenz zu erhalten und diese von störenden Reflexionen zu befreien, werden die Impulsantworten der Mikrofone aufgenommen und gefenstert. Zur Bestimmung der Impulsantworten wird als Messsignal ein exponentieller Sweep verwendet, welcher in Matlab erzeugt wird. Dieser läuft von 20Hz bis 22,05kHz, um Rauschen im hochfrequenten Bereich zu vermeiden, welches durch eine zu niedrige Sweepobergrenze von z.B. 16kHz entstehen könnte.

Eine Abbildung des Sweeps ist in Abbildung 4 dargestellt.

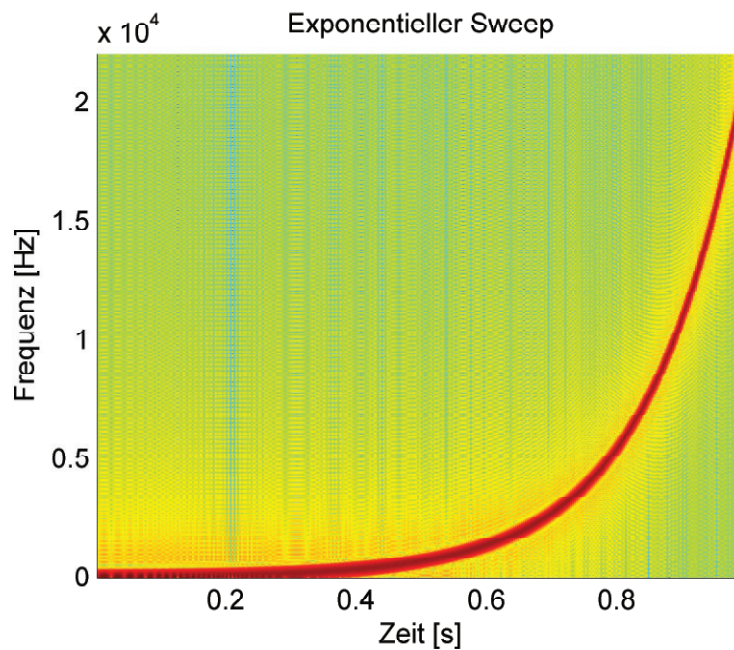


Abbildung 4: Spektrogramm des Sweeps.

Die 64 Impulsantworten zwischen dem Lautsprecher und den Mikrofonen errechnen sich nun über die diskreten Fouriertransformaten von Ein- und Ausgang. Zur schnelleren Implementierung der diskreten Fouriertransformation wird die FFT (Fast Fourier Transformation) verwendet. Für jede Impulsantwort gilt

$$h_i[n] = idft \frac{dft(y_i[n])}{dft(x[n])}, \quad (1)$$

wobei $y_i[n]$ dem i -ten Mikrofonsignal und $x[n]$ dem Anregungssignal entspricht.

3.3.3 Berechnung des Wellenzahlspektrums

Nach dem Durchführen der Messungen werden die Impulsantworten über die Relation in (1) bestimmt und auf passende Länge zugeschnitten. Als Impulsantwortlänge wurde 120 Samples gewählt, um das Einbeziehen von Reflexionen in die Messergebnisse zu vermeiden. Die Impulsantworten wurden anschließend mit einem halben Hann-Fenster mit der Länge von 20 Samples eingeblendet und mit einem halben Hann-Fenster mit der Länge von 80 Samples ausgeblendet.

Exemplarisch sind die erhaltenen Impulsantworten der Messung in 100cm Abstand, 30° Azimutwinkel und 0° Elevationswinkel in Abbildung 5 dargestellt.

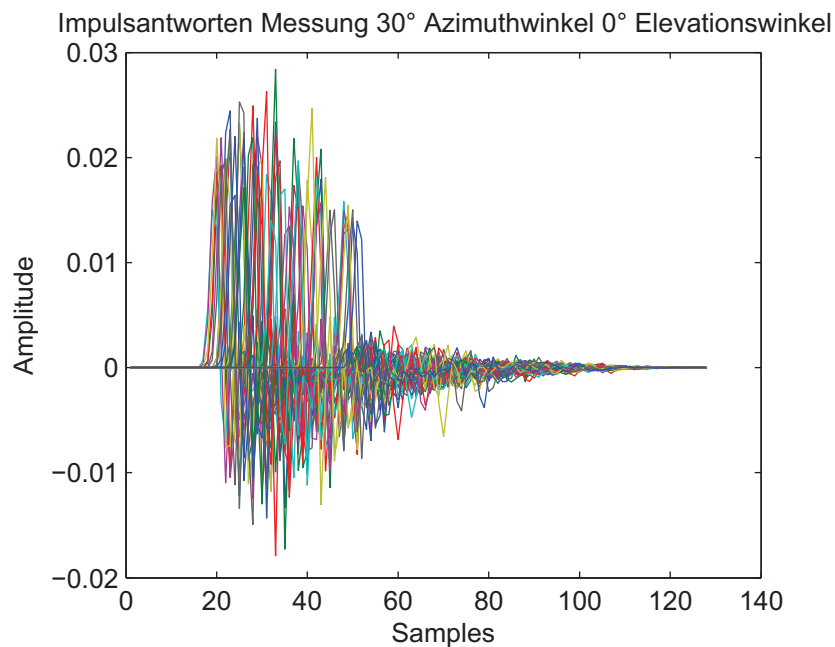


Abbildung 5: Impulsantworten der Messung in 100cm Abstand, 30° Azimutwinkel und 0° Elevationswinkel. Die unterschiedlichen Zeitpunkte für den Direktschall ergeben sich aus den geometrischen Laufzeiten.

Die gewonnenen Impulsantworten werden bei einer Frequenz ausgewertet. Dazu werden sie mit einer komplexen Exponentialschwingung multipliziert und über n aufsummiert. Diese Exponentialschwingung errechnet sich über

$$w = e^{-i*2*\pi*f/44100*n} . \quad (2)$$

Daran anschließend werden die 64 Impulsantworten in ein Raster mit 8x8 Signalen gebracht um die Werte grafisch sinnvoll auszugeben. An dieser Stelle wird auch die Pegel-

korrektur zwischen den Kanälen anhand der gemessenen Pistonfonpegel vorgenommen. Das diskrete Wellenzahlspektrum wird nun über die Berechnung einer 2-dimensionalen Fourier-Transformation über die Ortskoordinaten des Mikrofonarrays gewonnen. Bevor die Darstellung des Wellenzahlspektrums erfolgt, wird eine zirkuläre Verschiebung (“circshift”) durchgeführt, um den Nullpunkt der Fouriertransformierten in die Mitte des Plots zu schieben.

Die Wellenzahlspektren der einzelnen Messungen sieht man in Abbildung 6 und 7. Dabei sind exemplarisch die Messungen bei 100cm Abstand und 0° Azimutwinkel und 60° Azimutwinkel dargestellt. Der Kreis in diesen Plots stellt die Begrenzung der möglichen Schalleinfallrichtung dar. Des weiteren markiert das blaue Kreuz die tatsächliche Schalleinfallrichtung, welche aus den Abmessungen des Messaufbaues berechnet werden.

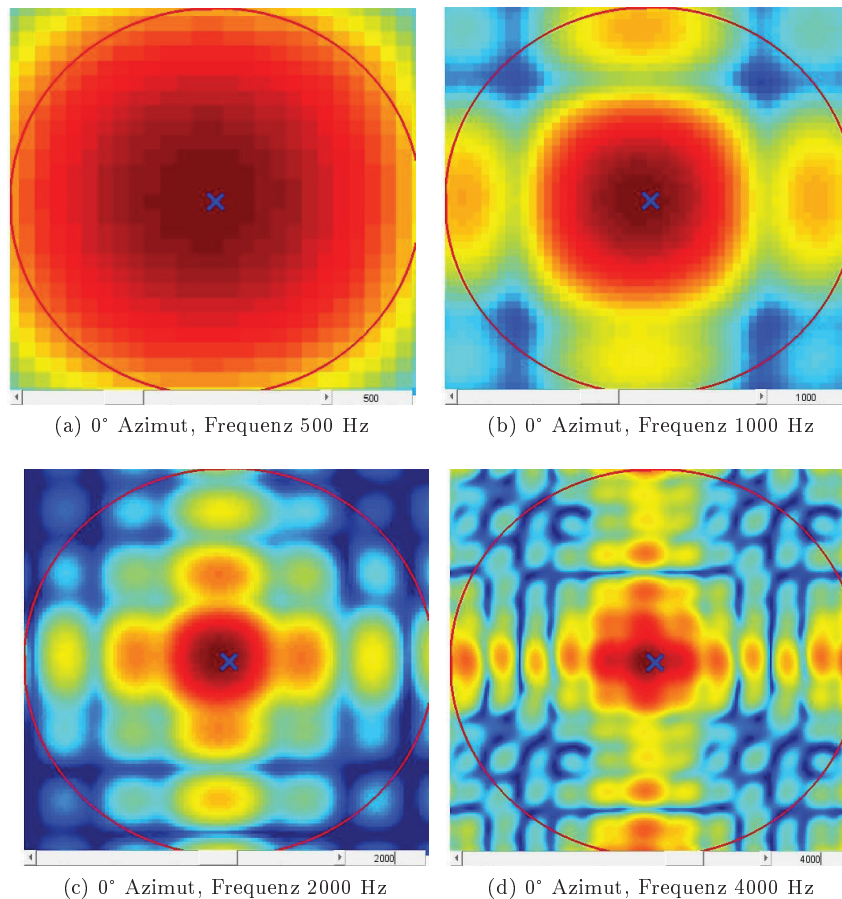


Abbildung 6: Messergebnisse für 100cm Abstand und 0° Azimutwinkel bei verschiedene Frequenzen.

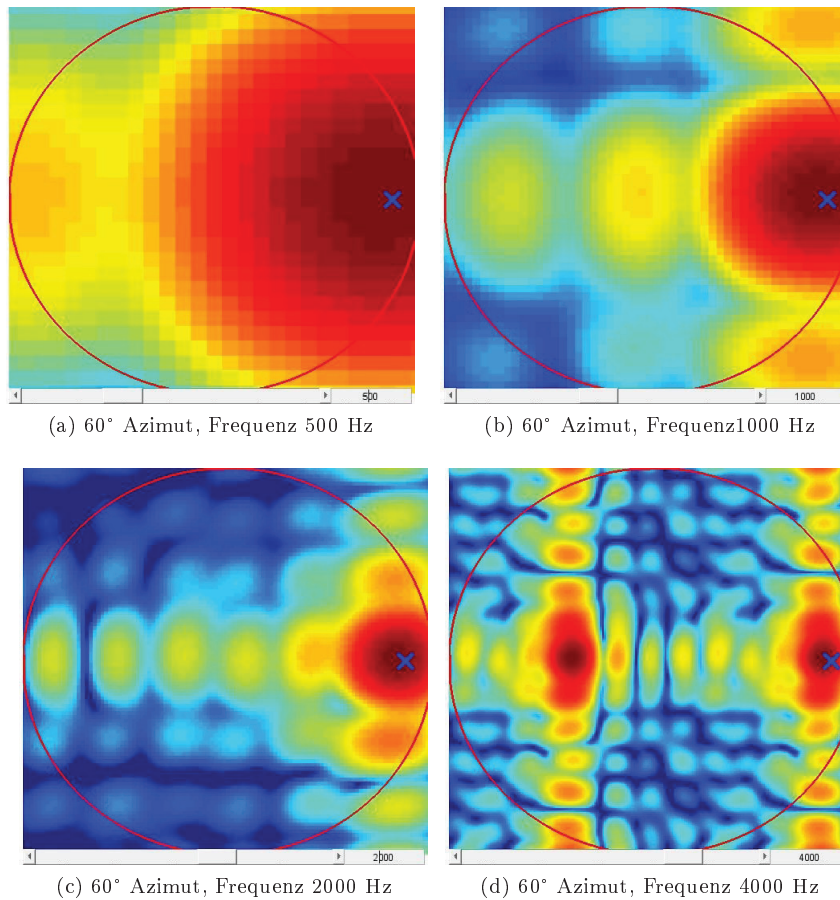


Abbildung 7: Messergebnisse für 100cm Abstand und 60° Azimutwinkel bei verschiedene Frequenzen.

In weiterer Folge wird nun der Einfluss des Abstandes des Lautsprechers zum Array auf die Darstellung und Interpretierbarkeit des Wellenzahlspektrums untersucht. Dazu wird der Lautsprecher in einem Winkel von 30° und Abständen von 50cm beziehungsweise 5cm positioniert. Die resultierenden Wellenzahlspektren sind in der folgenden Abbildungen 8 dargestellt.

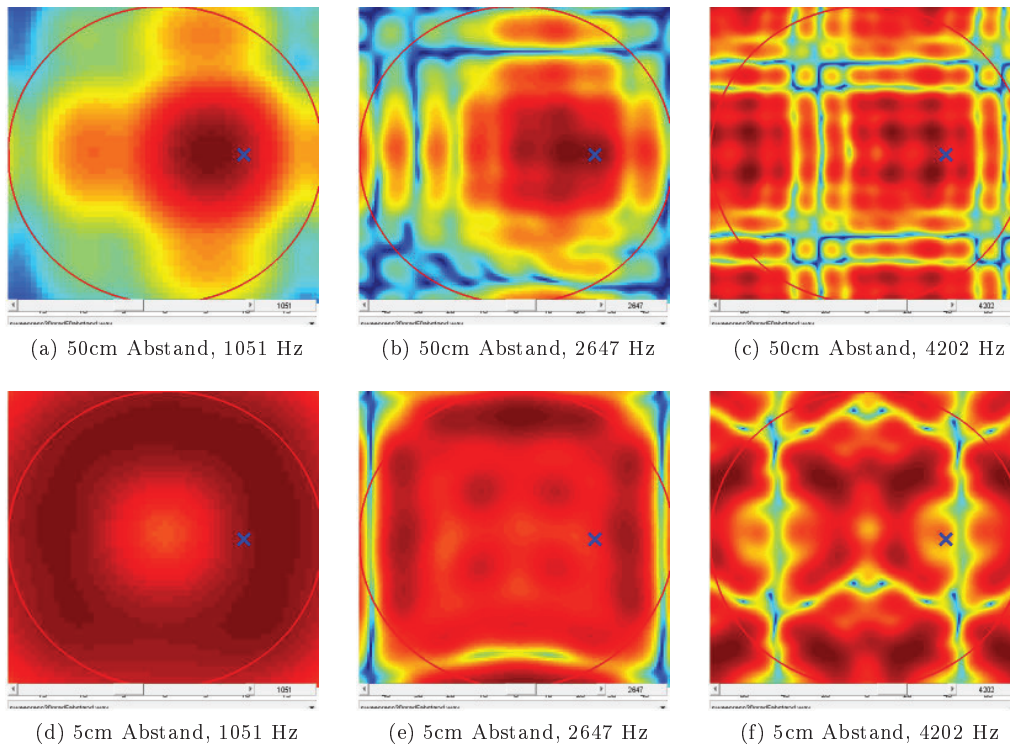


Abbildung 8: Wellenzahlspektren in 50cm bzw. 5cm Abstand.

Hierbei ist zu erkennen, dass mit sinkendem Abstand die Interpretierbarkeit der Einfallrichtung ebener Wellen auf das Array nicht mehr gegeben ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Lautsprecher bei kleinen Abständen und tieferen Frequenzen keine ebenen Wellen abstrahlt, sondern Kugelwellen, die durch das Bilden eines Wellenzahlspektrums in ebene Wellen aufgeteilt werden. Die resultierenden Ergebnisse sind deshalb nicht aussagekräftig. Vor allen bei Frequenzen unter 1000Hz ist keine Aussage über die Einfallrichtung des Schalls möglich.

3.3.4 Diskussion der Messergebnisse

Wie in den Abbildungen 6 und 7 erkennbar ist, sinkt bei tiefer werdenden Frequenzen die Genauigkeit der Abbildung der Schalleinfallrichtung. Dies ist auf die kleiner werdenden Phasendifferenzen der Schallwellen bei nebeneinander liegenden Mikrofonen zurückzuführen.

Wird eine kritische Frequenz überschritten, kommt es zu räumlichen Aliasing, das sich dadurch äußert, dass im Abbildungsbereich ein weiteres Maximum erscheint (vgl. Abbildung 7d) und somit die Richtungszuordnung der Quelle nicht mehr eindeutig möglich ist. Tatsächlich treffen jedoch keine Schallwellen aus der Richtung des zusätzlichen Maximums auf das Array auf.

Ebenfalls ist festzuhalten, dass für die Bestimmung der Einfallrichtung ebener Wellen auf ein Mikrofon-Array auch ebene Wellen vorhanden sein müssen um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Befindet man sich zum Beispiel bei der Messung in der Nähe eines Lautsprechers, wo sich keine ebenen- sondern Kugelwellen ausbilden, können die Ergebnisse nicht mehr interpretiert werden.

3.4 Messung an einer Punktschallquelle auf einer ebenen Platte

Bei dieser Messung soll überprüft werden, ob eine Punktschallquelle durch ihre punktförmige Oberflächenschallschnelle mittels des Mikrofonarrays durch Holografie eindeutig ermittelt werden kann. Dazu wird die Punktschallquelle in eine Schallwand eingebaut und Messungen im Nahfeld des Arrays durchgeführt. Danach wird auf das gesamte Schallfeld der Punktquelle zurückgerechnet.

3.4.1 Messaufbau

Zur Simulation der Schallwand wird eine quadratische Holzplatte verwendet. Diese ist etwas größer als das Mikrofonarray und kann für die Punktschallquelle als unendliche Schallwand angenommen werden. Die Platte hat drei mögliche Messpositionen in die die Punktschallquelle eingepasst werden kann. Diese jeweils 1cm breiten Messpositionen sind in der Mitte der Platte, an der Seite und im Eck der Platte, wie in Abbildung 11 zu sehen ist.



Abbildung 9: Platte im Abstand von 7cm vor dem Array.

Die Platte wird in einem Abstand von 2cm bzw. 7cm frontal vor das Array gestellt

(siehe Abbildung 9). Dabei ist zu beachten, dass der Abstand der Platte zum Mikrofonarray überall gleich groß ist. In Abbildung 10 sieht man den genauen Messaufbau mit der Anbringung der Punktschallquelle an der Platte.



Abbildung 10: Anbringung der Punktschallquelle.

3.4.2 Messung

Die ersten Messungen werden im Abstand von 2cm zum Array durchgeführt. Dabei wird die Punktschallquelle nacheinander an den drei Messpositionen befestigt: für die erste Messung in der Mitte der Platte, für die zweite 5cm horizontal verschoben und für die dritte im unteren Eck (siehe Abb. 11). Um die Grenzen des Nahfeldes zu erproben werden die Messungen für einen Abstand von 7 cm wiederholt.



Abbildung 11: Messpunkte auf der Platte.

Durch die Messung werden die 64 Impulsantworten der Mikrofone aufgenommen und analog wie in Abschnitt 3.3.3 die Wellenzahlspektren berechnet um so eine Aussage über das Schallfeld machen zu können.

3.4.3 Messergebnisse

Die Wellenzahlspektren ergeben die Schalldruckverteilung auf dem Array.

Mittels fouriertransformationsbasierter Holografie kann daraus das Schallfeld auf der Platte berechnet werden. Dabei wird durch den Verschiebungssatz der Fouriertransformation das Feld an den 64, den Mikrofonpositionen äquivalenten, Punkten auf der Platte berechnet:

$$\psi(k_x, k_y)|_{r+\Delta r} = \psi(k_x, k_y)|_r e^{i\mathbf{k}^t \Delta r}.$$

Mit

$$p(r) = \iint_{-\infty}^{\infty} \psi(k_x, k_y) e^{-ik_z(k_x, k_y)z} e^{-ik_x x} e^{-ik_y y} dk_x dk_y$$

und

$$v_z(r) = \iint_{-\infty}^{\infty} v(k_x, k_y) e^{-ik_z(k_x, k_y)z} e^{-ik_x x} e^{-ik_y y} dk_x dk_y$$

folgt

$$v_z(k_x, k_y) = \frac{k_z}{\omega\rho} \psi(k_x, k_y)$$

und daraus wiederum

$$v_z(k_x, k_y)|_{r+\Delta r} = \frac{k_z}{\omega\rho} \psi(k_x, k_y) \Big|_r e^{i\mathbf{k}^t \Delta r}.$$

Allerdings ergibt sich durch diese Technik aufgrund der endlichen Arrayabmessung räumliches Aliasing.

Um dies zu vermeiden kann die Holografie der Oberflächenschallschnelle auch durch das Rayleigh-Integral berechnet werden. Dieses kann auf Grund der Randbedingungen in Rayleigh I und Rayleigh II unterschieden werden. Da wir in unserem Fall die Schallschnelle an der Platte und somit den Druckgradienten vorgeben wird das Rayleigh-I-Integral verwendet:

$$p = - \iint_{-\infty}^{\infty} (G \frac{\partial}{\partial z} p) dx dy$$

$$v = - \frac{p}{\rho c} = \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} (G \frac{\partial}{\partial z} p) dx dy}{\rho c}.$$

Bei diesem Verfahren wird über die Monopolquellen an der Platte integriert und somit der Druck an den einzelnen Positionen ermittelt. G bezeichnet hier die Green'sche Funktion. Das Integral wird bei dieser Berechnung diskretisiert, wodurch sich eine Matrixgleichung ergibt. Über die Inversion des diskretisierten Rayleigh-I-Integrals lässt sich die planare Holografie im Nahfeld einfach berechnen.

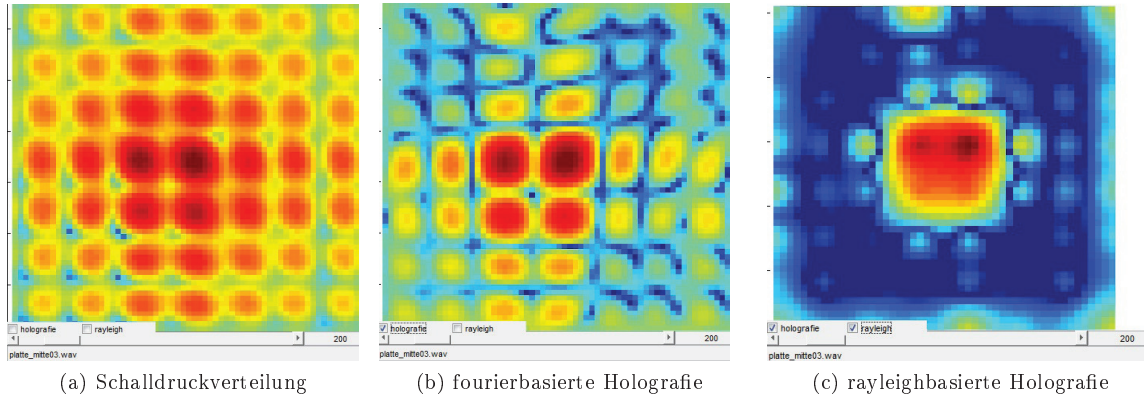


Abbildung 12: Mittlere Schallquellenposition bei 200Hz.

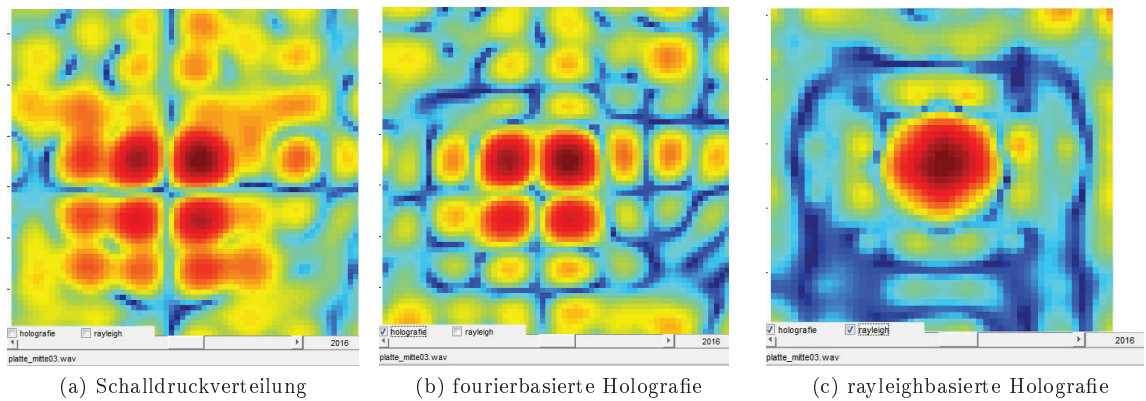


Abbildung 13: Mittlere Schallquellenposition bei 2016Hz.

In Abbildung 12 und 13 sind die verschiedenen Schallschnelleberechnungen für die mittlere Schallquellenposition zu sehen. Plot (a) zeigt dabei jeweils das durch die Impulsantworten berechnete Wellenzahlspektrum am Array. Plot (b) stellt die Schnelle auf der Platte dar, wie es über die holografische Berechnung ermittelt wurde. In Plot (c) sieht man die über das Rayleigh-I-Integral berechnete Schnelle auf der Platte. Dabei sieht man, dass die Berechnung über das Rayleigh-I-Integral die Schallquelle besser identifizieren kann. Bei der Berechnung mittels Holografie treten sinc-förmige Schalldruckschwankungen auf. Diese entstehen aufgrund der Annahme eines begrenzten Wellenzahlspektrums und sind durch die Ausprägung von Nebenkeulen ersichtlich. Bei dem direkten Vergleich zweier Frequenzen (hier 200Hz und 2016Hz) lässt sich erkennen, dass tiefere Frequenzen durch die Berechnungen deutlicher dargestellt werden als höhere.

Die Darstellung des Schallfelds der zweiten Mikrofonposition unterscheidet sich nur geringfügig von der der Ersten, deshalb wird hier nicht näher auf diese eingegangen.

Das Schallfeld der Mikrofonposition in der Ecke der Platte ist in Abbildung 14 dargestellt. Wieder lassen sich räumliche “periodische Strukturen” in der durch fourierbasierte Holografie berechneten Darstellung an den Rändern erkennen. Bei der Berechnung mittels des Rayleigh-I-Integrals treten diese Effekte nicht auf, dennoch gibt es offenbar Beugungserscheinungen am Rand der Platte. Die Lokalisation der Quelle ist hier zwar im Vergleich zur fourierbasierten Holografie besser, allerdings wird die 1cm große punktförmige Öffnung in der Platte trotzdem ca. zehnfach so groß dargestellt. Aufgrund dieser eher breiten holografischen Abbildung ist auch bei diesem Verfahren die Lokalisationsfähigkeit stark begrenzt.

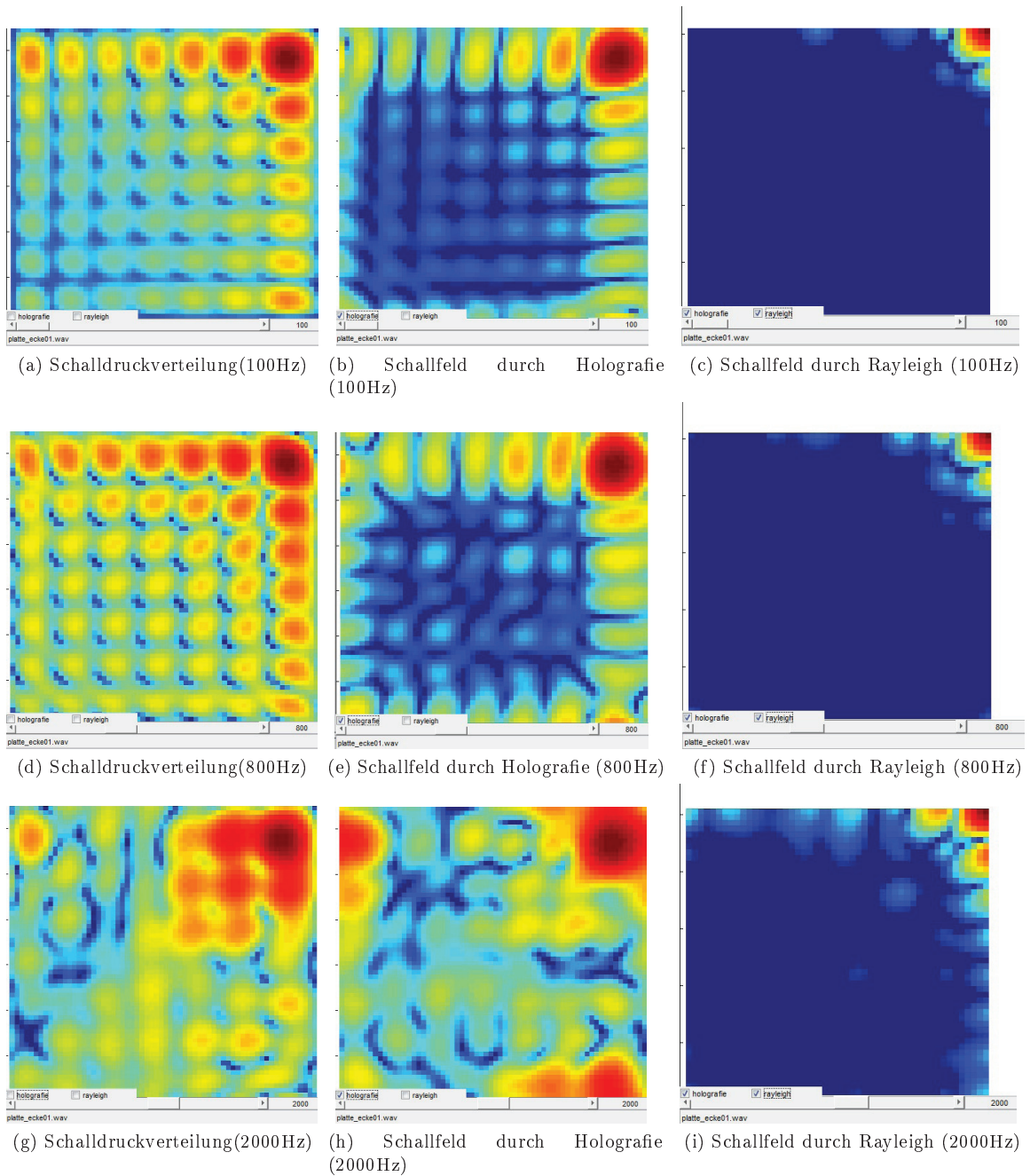


Abbildung 14: Schallquellenposition im Eck bei verschiedenen Frequenzen.

Des Weiteren wird die Punktschallquelle in der Platte in einem Abstand von 7cm zum Array vermessen. Die resultierenden Berechnungen sind in Abbildung 15, 16 und 17

dargestellt.

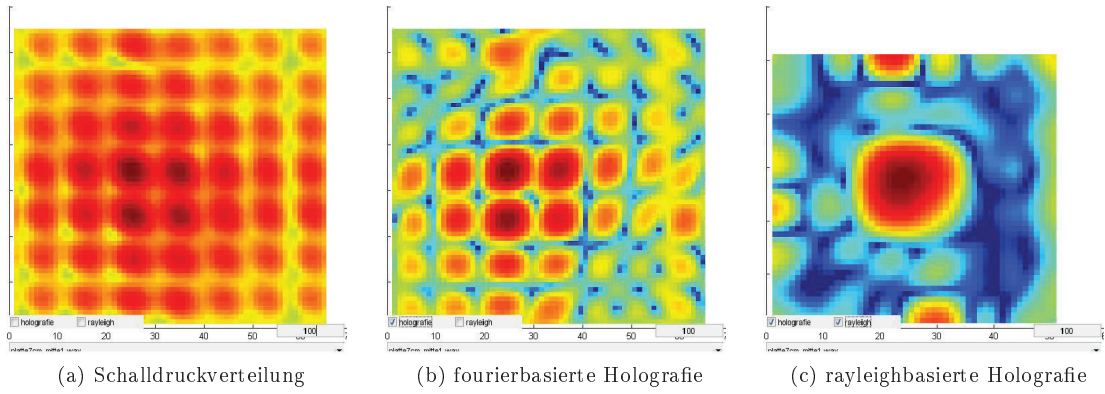


Abbildung 15: Schallquellenposition bei Messabstand von 7cm und 100 Hz

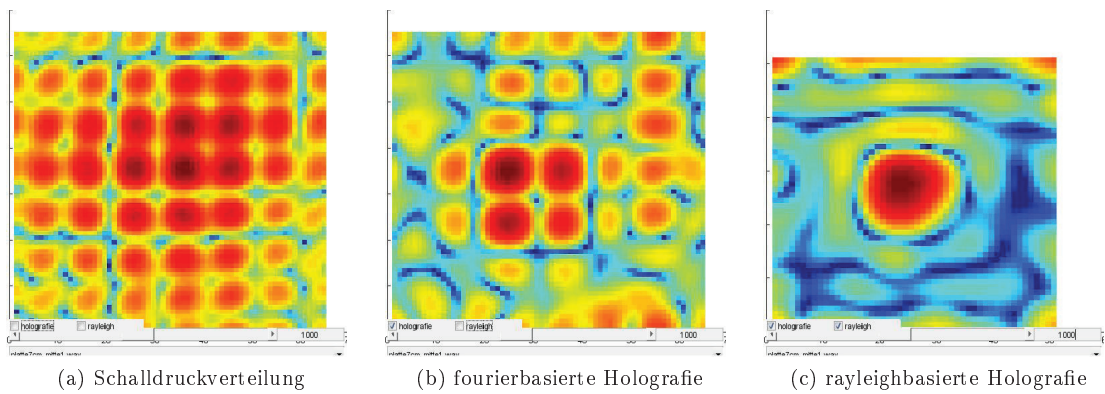


Abbildung 16: Schallquellenposition bei Messabstand von 7cm und 1000 Hz

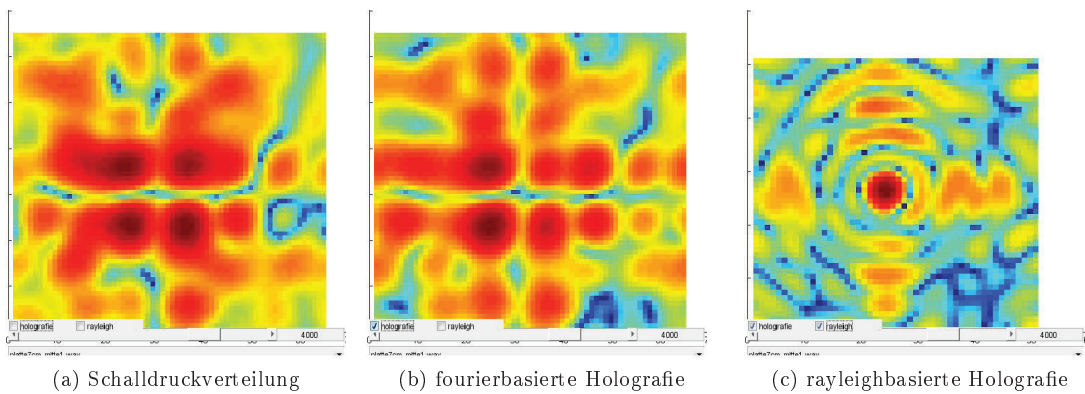


Abbildung 17: Schallquellenposition bei Messabstand von 7cm und 4000 Hz

Hierbei ist deutlich zu sehen, dass die Ergebnisse, die über die Holografie mit Rayleigh-Integral gewonnen werden wesentlich aussagekräftiger sind als jene, die über die fourierbasierte Holografie gewonnen werden. Vor allem zu hohen Frequenzen hin weist die Berechnung mit Rayleigh-Integral klare Vorteile auf. Wie zum Beispiel in Abbildung 17 zu sehen ist, lässt die fourierbasierte Holografie nur schwer Rückschlüsse über die Schallschnelle auf der Platte zu, während mit der rayleighbasierten Holografie eine relativ eindeutige und die Lokalisation betreffend recht genaue Beurteilung der Schallschnelle auf der Platte ermöglicht.

4 Kugellautsprechermessung mittels eines kreisförmigen Mikrofonarrays

4.1 Messaufbau

Bei dieser Messung wird die Abstrahlcharakteristik eines Kugellautsprechers mit Hilfe eines kreisförmigen Arrays und eines elektrisch gesteuerten Drehtellers vermessen. Hierzu wurden 18 Behringer ECM8000 Messmikrofone auf einem Halbkreis mit Radius 70cm in 10-Grad-Schritten angeordnet (siehe Abb. 18) und wie in der ersten Messung auch über ADAT8000-Interfaces und eine RME-MADI-Karte mit dem Rechner verbunden.

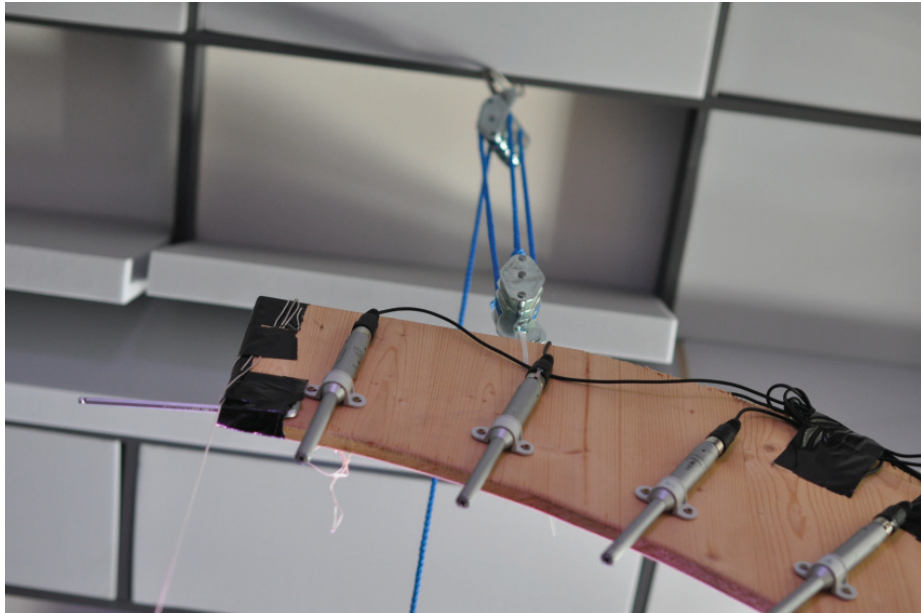


Abbildung 18: Mikrofonabstände auf dem kreisförmigen Array

Der zu vermessende Kugellautsprecher wurde im Zentrum des Arrays auf einem Drehteller aufgestellt. Dieser Drehteller kann über Pure Data gesteuert werden und somit der Lautsprecher bei der Messung um einen definierten Winkel gedreht werden. Der Kugellautsprecher ist in Abbildung 19 dargestellt. Er besteht aus 16 einzelnen Lautsprechern, die auf der Kugeloberfläche gleichmäßig verteilt angeordnet sind und einzeln angespielt werden können. Zur genauen Zentrierung im Kreismittelpunkt des Mikrofonarrays wird ein Lot verwendet.

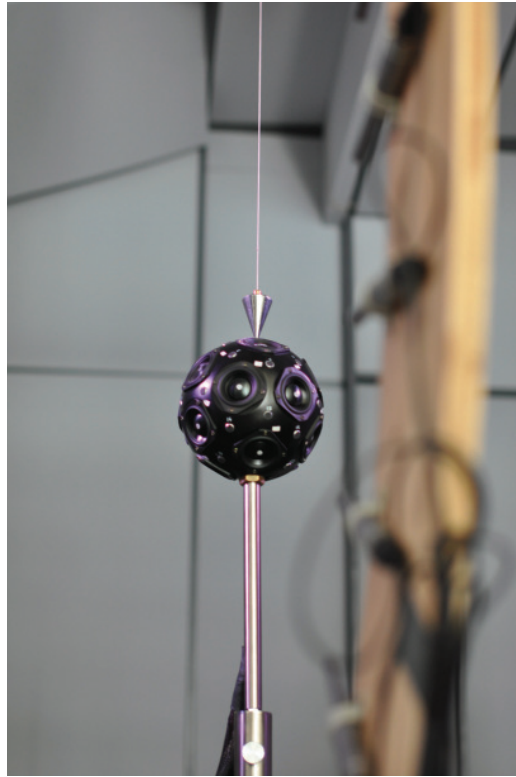


Abbildung 19: Kugellautsprecher

4.2 Messung

Die Kalibrierung der Mikrofone erfolgt analog wie bei der vorherigen Messung (siehe Abschnitt 3.2) deshalb wird hier nicht näher darauf eingegangen. Die gewonnenen Pegeldifferenzen werden ebenfalls wieder in die Berechnung des Schallfeldes mit einbezogen.

Bei dieser Messung wird der Kugellautsprecher in 10° -Schritten um sich selbst gedreht. Bei jedem Winkel werden zeitlich versetzte exponentielle Sweeps über alle 16 Lautsprecher abgespielt. Dadurch werden für jeden Winkel $16 \cdot 18$ Impulsantworten aufgenommen.

4.3 Messergebnisse

Aus den gemessenen Werten kann aus der Abstrahlcharakteristik des Kugellautsprechers im Fernfeld mittels Holografie auf die Abstrahlung des Lautsprechers im Nahfeld zurückgerechnet werden.

Das Schallfeld des Lautsprechers wird über die Wellengleichung in Kugelkoordinaten beschrieben. Diese setzt sich aus einem Radialteil und zwei winkelabhängigen Teilen zusammen. Durch die Lösung der Wellengleichung mittels Separation dieser drei Teile erhält man unter anderem die Kugelflächenfunktionen (siehe Abbildung 20). Durch diese, auf Englisch "spherical harmonics", wird der winkelabhängige Teil der Wellengleichung beschrieben. Somit lässt sich der Schalldruck an jedem beliebigen Punkt im Raum über die vom Radius abhängigen sphärischen Bessel bzw. sphärischen Hankelfunktionen, die mit den Wellenspektren gewichtet werden, und den Kugelflächenfunktionen berechnen.

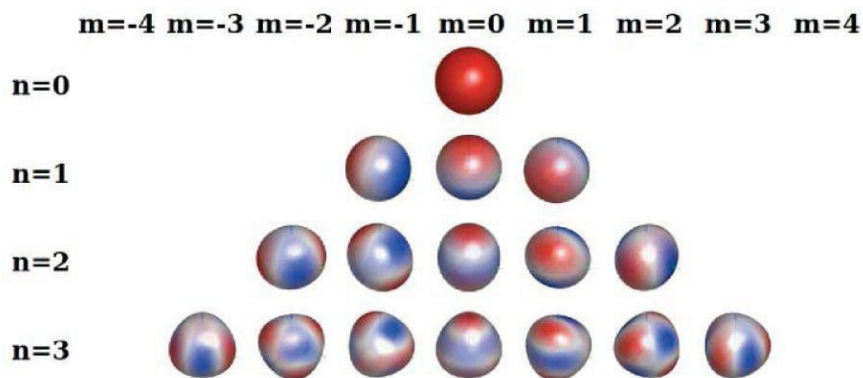


Abbildung 20: Kugelflächenfunktionen.

Aus unserer Messung erhalten wir 648 Impulsantworten, die sich aus je 18 Mikrofommessungen bei 36 Winkeln ergeben. Diese charakterisieren die Abstrahlung des Lautsprechers bei gleicher Anregung aller Einzellausprecher. Die Messwerte lassen sich nun in verschieden stark gewichtete Kugelflächenfunktionen zerlegen. Um eine gute Auflösung zu erhalten verwenden wir hier die Kugelflächenfunktionen bis zur 17. Ordnung.

Durch Beamforming wollen wir nun durch unterschiedliche Gewichtung der Einzellausprecher eine gewünschte Abstrahlcharakteristik erreichen. Zur Nachbildung der Abstrahlcharakteristik sind die Kugelflächenfunktionen bis zur 3. Ordnung ausreichend. Durch diese 16 Spherical Harmonics wird das Abstrahlverhalten modelliert. Jede der Spherical Harmonics hat eine spezielle Gewichtung der Einzellausprecher. Dadurch kann man somit die Ansteuerung der einzelnen Lautsprecher zum Erreichen der gewünschten Abstrahlung berechnen. Die gewünschte Abstrahlung kann entweder als der genauen Zusammenset-

zung aus Spherical Harmonics oder aus Angaben zum gewünschten Abstrahlwinkel in Kugelkoordinaten beschrieben werden.

Für diese Berechnung können zwei verschiedene Modelle verwendet werden. Im Ersten wird für die Ansteuerung der 16 Lautsprecher die Pseudoinverse der durch Messwerte berechneten Spherical Harmonics verwendet (PI-Modell). Im Zweitem, dem Kugelkappenmodell, werden die Lautsprecher anhand ihrer Oberflächenschallschnelle und der Geometrie der Membranen modelliert (KK-Modell).

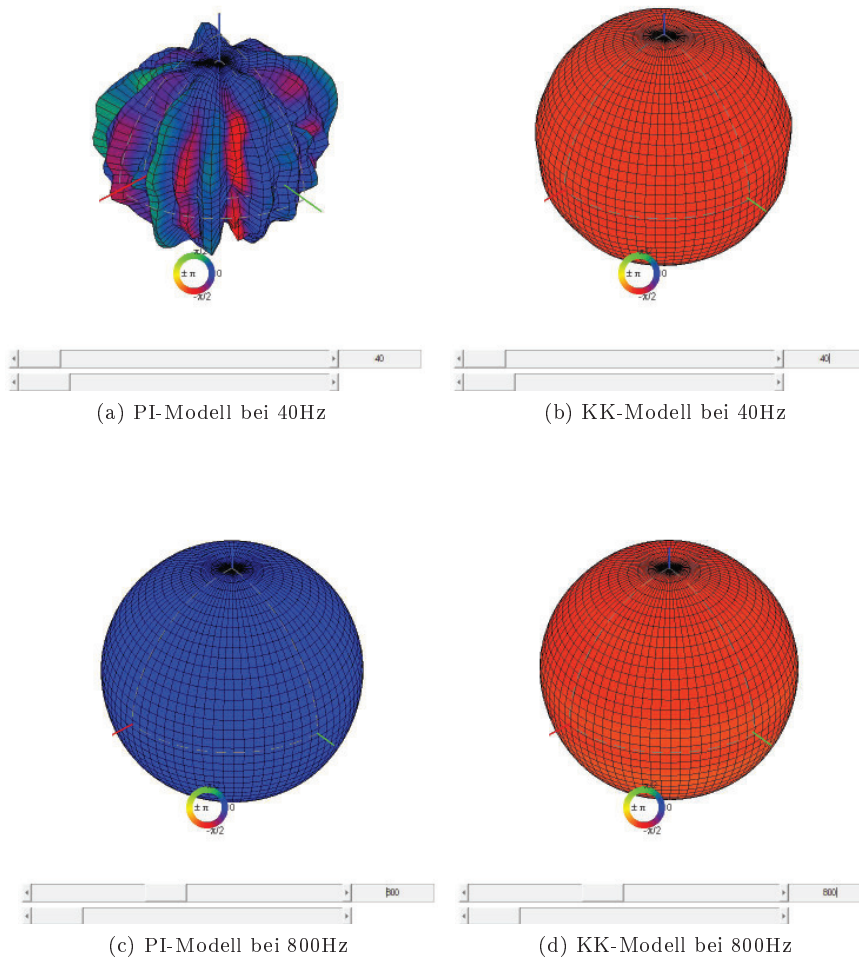


Abbildung 21: Vergleich der Kugelabstrahlcharakteristik des Lautsprechers durch das Modell der Pseudoinversen (links) und das Kugelkappenmodell (rechts) bei tiefen Frequenzen.

In Abbildung 21 wird das gemessene Abstrahlverhalten des Kugellautsprechers bei tiefen Frequenzen bei verschiedenen Ansteuerungssystemen verglichen. Bei 40Hz sieht man einen deutlichen Unterschied zwischen beiden Modellen. Dieser entsteht dadurch, dass bei tiefen Frequenzen die abgestrahlte Schalleistung der Lautsprecher sinkt und dadurch der Einfluss des Rauschens der Mikrofone und der Umgebung auf die Messung stark zunimmt. Deshalb sieht man in Abbildung 21a keine kugelförmige Abstrahlung mehr. Reduziert man die Ordnung der Spherical Harmonics ist es möglich auch bei tieferen Frequenzen noch die gewünschte Abstrahlcharakteristik zu erhalten.

Beim Abstrahlverhalten hoher Frequenzen (siehe Abbildung 22) ist die kugelförmige Abstrahlung ebenfalls nicht mehr gegeben. Die Gründe dafür sind einerseits die Bündelung der einzelnen Lautsprecher und andererseits die Interferenzerscheinungen zwischen den Lautsprechern.

Zwischen diesen Extremfällen in Abbildung 21 und 22 befindet sich der optimale Frequenzbereich des Lautsprechers in dem die Abstrahlcharakteristik korrekt abgebildet wird. Durch die Erhöhung oder Verringerung der Anzahl der verwendeten Spherical Harmonics kann dieser Bereich verändert werden.

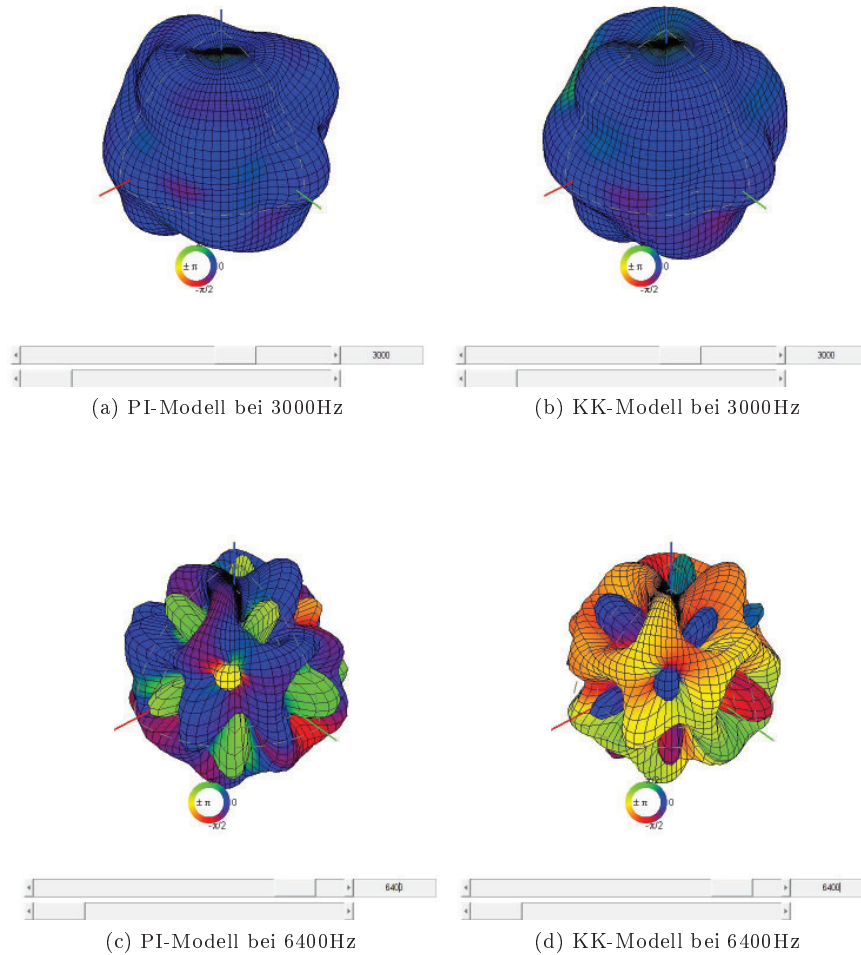


Abbildung 22: Vergleich der Kugelabstrahlcharakteristik des Lautsprechers durch das Modell der Pseudoinversen (links) und das Kugelkappenmodell (rechts) bei hohen Frequenzen.

In Abbildung 23 ist die Abstrahlcharakteristik bei Ansteuerung der Lautsprecher mit 1. 3. und 4. Spherical Harmonic, die jeweils gleich stark gewichtet sind, zu sehen. Dabei kann man erkennen, dass bei dem PI-Modell der Bereich der korrekten Abstrahlung, vor allem zu tiefen Frequenzen hin, größer ist. Die obere Grenzfrequenz ist bei beiden Modellen ähnlich und lässt sich auf den Einfluss von Interferenzerscheinungen und Aliasingeffekten zurückführen.

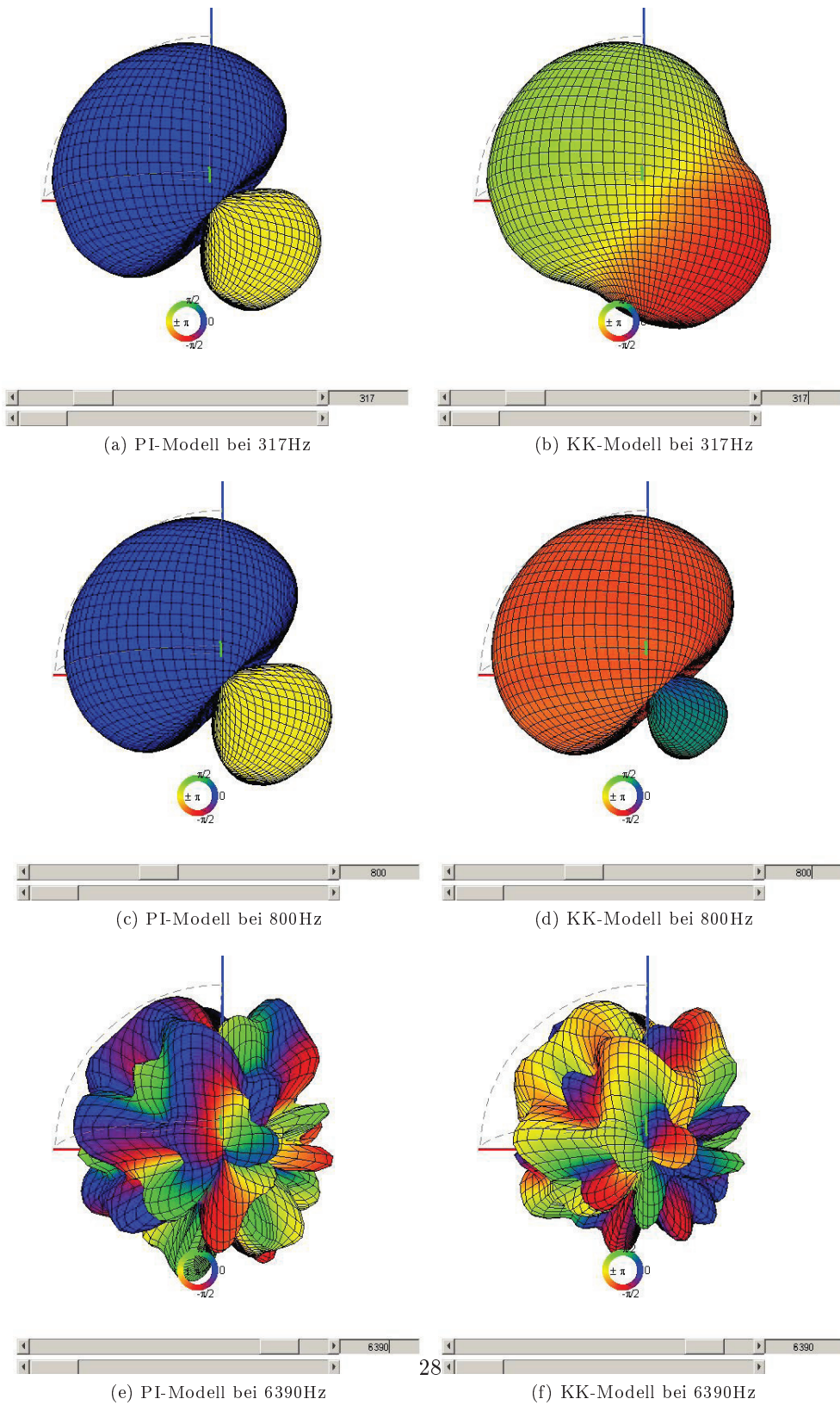


Abbildung 23: Vergleich der Abstrahlcharakteristik des Lautsprechers bei Ansteuerung durch 1. 3. und 4. Spherical Harmonic.

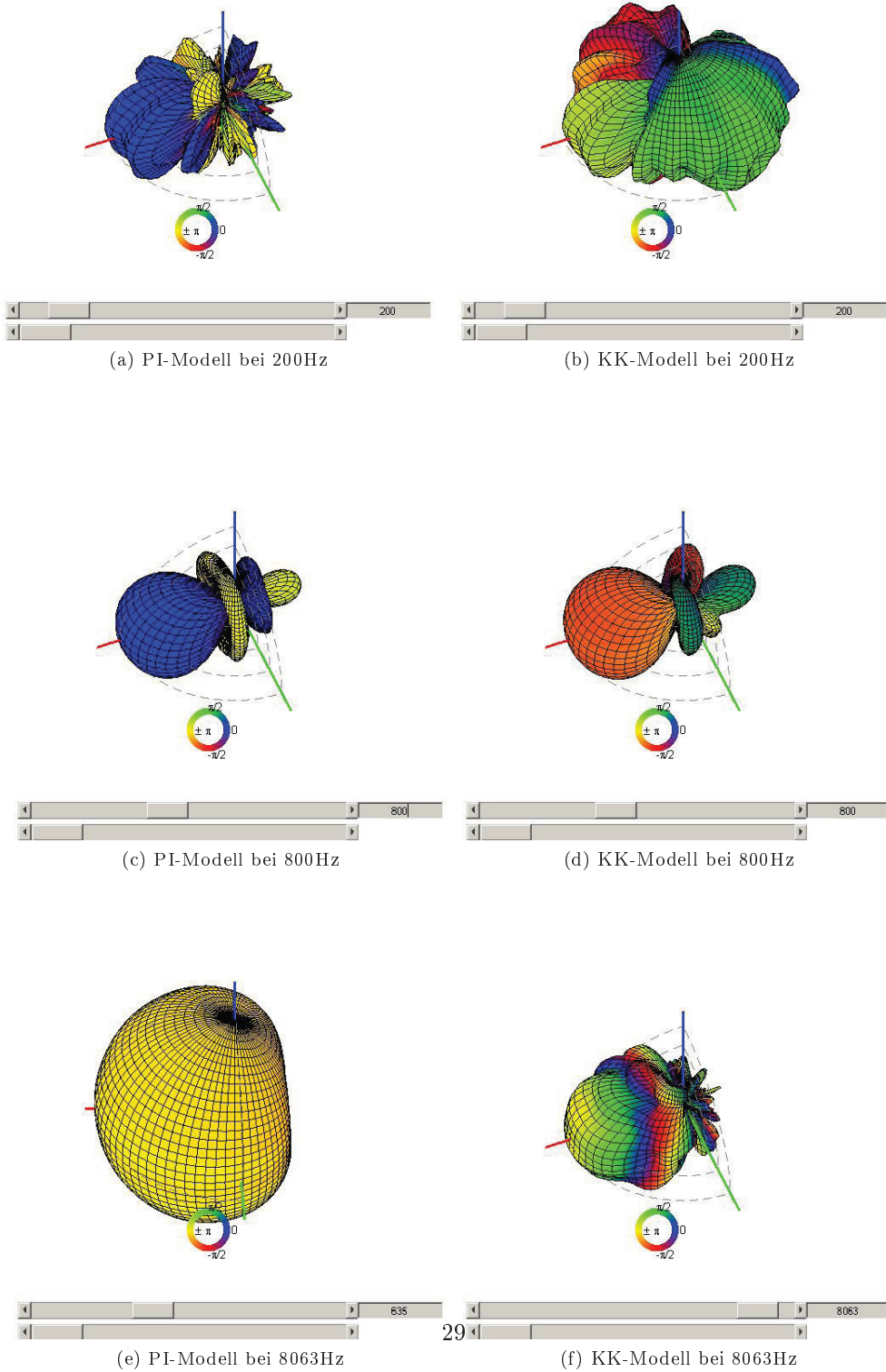


Abbildung 24: Vergleich der Abstrahlcharakteristik des Lautsprechers bei Beamforming.

In einem weiteren Versuch wird eine Richtung vorgegeben in die der Kugellautsprecher abstrahlen soll. Die Richtung kann dabei über die Winkel in Kugelkoordinaten festgelegt werden. Abbildung 24 stellt die Richtwirkung bei verschiedenen Frequenzen dar. Im mittleren Frequenzbereich ergibt sich bei beiden Modellen ein ähnliches Abstrahlverhalten, wobei der Unterschied hauptsächlich in den Nebenkeulen zu finden ist. Das Kugelkappenmodell hat bei hohen Frequenzen (8063Hz) eine genauere Richtwirkung jedoch ist es bei tiefen Frequenzen (200Hz) ungerichteter als das PI-Modell.

5 Schlussfolgerung

Unsere Messungen haben ergeben, dass man mittels Holografie eine Aussage über die Oberflächenschallschnelle an einer Quelle treffen kann. Allerdings tritt bei hohen Frequenzen aufgrund der zu geringen räumlichen Abtastung durch die Messmikrofone in der Darstellung der Oberflächenschallschnelle räumliches Aliasing auf. Durch das Verwenden von mehr Mikrofonen, die in einem geringeren Abstand zueinander aufgestellt werden kann man die höchste richtig darstellbare Frequenz erhöhen. Eine andere Möglichkeit, die Schallschnelleverteilung besser darzustellen besteht in der Verwendung des Rayleigh-I-Integrals. Durch die Berechnung mittels des Rayleigh-I-Integrals tritt das räumliche Aliasing nicht auf, wodurch sich die Lokalisationsfähigkeit der Quelle stark verbessert.

Unsere zweite Messung hat ergeben, dass durch einen Kugellautsprecher beliebige Abstrahlcharakteristiken realisierbar sind. Diese sind jedoch auf einen bestimmten Frequenzbereich beschränkt: bei niedrigeren Frequenzen ist der Rauschanteil im Signal sehr hoch, bei höheren Frequenzen kommt es durch Interferenzen zwischen den Einzellautsprechern und Aliasing zu Abweichungen in der dargestellten Abstrahlcharakteristik. Mittels Beamforming kann eine beliebige gewünschte Richtwirkung erzielt werden, die durch eine Verringerung der Ordnung der verwendeten Spherical Harmonics auch bei tiefen Frequenzen erreicht werden kann.

Somit ist es uns gelungen, Aussagen über die Oberflächenschallschnelle auf einer ebenen Messfläche und das Abstrahlverhalten eines Kugellautsprechers zu treffen.

Abbildungsverzeichnis

1	64 Kanal Mikrofonarray.	4
2	Kalibrierwerte der Mikrofone für das planare Array.	5
3	Tropfenlautsprecher am Mikrofonarray.	6
4	Spektrogramm des Sweeps.	7
5	Impulsantworten der Messung in 100cm Abstand, 30° Azimutwinkel und 0° Elevationswinkel. Die unterschiedlichen Zeitpunkte für den Direktschall ergeben sich aus den geometrischen Laufzeiten.	8
6	Messergebnisse für 100cm Abstand und 0° Azimutwinkel bei verschiedene Frequenzen.	9
7	Messergebnisse für 100cm Abstand und 60° Azimutwinkel bei verschiedene Frequenzen.	10
8	Wellenzahlspektren in 50cm bzw. 5cm Abstand.	11
9	Platte im Abstand von 7cm vor dem Array.	13
10	Anbringung der Punktschallquelle.	14
11	Messpunkte auf der Platte.	15
12	Mittlere Schallquellenposition bei 200Hz.	17
13	Mittlere Schallquellenposition bei 2016Hz.	17
14	Schallquellenposition im Eck bei verschiedenen Frequenzen.	19
15	Schallquellenposition bei Messabstand von 7cm und 100 Hz	20
16	Schallquellenposition bei Messabstand von 7cm und 1000 Hz	20
17	Schallquellenposition bei Messabstand von 7cm und 4000 Hz	20
18	Mikrofonabstände auf dem kreisförmigen Array	22
19	Kugellautsprecher	23
20	Kugelflächenfunktionen.	24
21	Vergleich der Kugelabstrahlcharakteristik des Lautsprechers durch das Modell der Pseudoinversen (links) und das Kugelkappenmodell (rechts) bei tiefen Frequenzen.	25
22	Vergleich der Kugelabstrahlcharakteristik des Lautsprechers durch das Modell der Pseudoinversen (links) und das Kugelkappenmodell (rechts) bei hohen Frequenzen.	27
23	Vergleich der Abstrahlcharakteristik des Lautsprechers bei Ansteuerung durch 1. 3. und 4. Spherical Harmonic.	28
24	Vergleich der Abstrahlcharakteristik des Lautsprechers bei Beamforming.	29

Literatur

- [1] Akustische Messtechnik 2 , Skriptum der Laborübung, 2012, DI Dr Franz Zotter
- [2] Akustische Holophonie und Holografie, Vorlesungsskriptum, 2011, DI Dr Franz Zotter
- [3] Homepage des IEMs, www.iaem.at