

Diplomarbeit

Mikrofonverhalten in kleinen Räumen am Beispiel eines Freisprechmikrofones im PKW

von

Christoph Frank

März 2010

Beurteiler: O.Univ.Prof. Mag.art. DI Dr.techn. Robert Höldrich

Betreuer: DI Dr.techn. Alois Sontacchi (IEM)
DI Hannes Pomberger (IEM)
DI Klaus Haindl (AKG)

IEM Institut für Elektronische Musik und Akustik, Austria
Universität für Musik und darstellende Kunst Graz, Austria
AKG Acoustics Wien, Austria



gewidmet meiner Tante Trixi

ABSTRACT

Besides the continuous development of more efficient power train engineering, motor vehicle manufacturers put great effort in the design of entertainment electronics inside the Car-Cabin. These In-Car entertainment systems are often combined with hands-free microphones, which are used for hands-free telephony as well as voice control of the electronic systems. For both applications, good speech intelligibility by the suppression of any ambient noise is eligible.

The critical issue for this task is the directivity of such hands-free microphones. In general, the directivity is determined by the measurement of a polar diagram under free-field like conditions in an anechoic room. However, due to sound reflecting planes like windows, there is good reason to doubt that such free-field conditions can be expected inside a car cabin.

In this work, it will be shown how the application in the car-cabin affects the directivity of a microphone. The examination will be made for different types of microphones and different alignments. If any distortion of the free-field measured directivity occurs, it will be due to reflections at sonically hard planes. For that reason, effort will be made to classify those reflexions – by acoustic measurements as well as a simple simulation.

Besides the observations regarding the microphones, the ambient noise in a car-cabin is examined, too. Good knowledge of its nature can be helpful for a proper rejection.

KURZFASSUNG

Neben der Entwicklung effizienterer Antriebstechniken setzen Automobilhersteller vor allem auf immer anspruchsvollere Unterhaltungselektronik im PKW. Oft werden diese In-Car Entertainment Systeme mit Freisprech-Mikrofonen kombiniert, welche sowohl für handfreies Telefonieren als auch zur Sprachsteuerung der gesamten Elektronik benutzt werden. Für beide Anwendungszwecke ist eine hohe Sprachverständlichkeit durch die bestmögliche Unterdrückung von jeglichem Umgebungslärm wünschenswert.

Entscheidend für diese Aufgabe ist die Richtcharakteristik eines solchen Freisprechmikrophones. Diese wird im Allgemeinen in Form einer Polardiagramm-Messung im Freifeld bzw. einem akustisch bedämpften Messraum bestimmt. Es liegt jedoch Nahe, dass im Inneren eines PKW durch schallharte Flächen wie Seiten- und Windschutzscheiben, gänzlich andere Bedingungen als im Freifeld zu erwarten sind.

In dieser Arbeit wird gezeigt, wie sich die Montage eines Mikrophones im Inneren eines PKW auf dessen Richtcharakteristik auswirkt. Diese Betrachtungen werden an verschiedenen Mikrofonpositionen für unterschiedlich ausgerichtete Richtcharakteristika durchgeführt. Da für eine mögliche Verzerrung der Richtcharakteristik die im PKW entstehenden Reflexionen verantwortlich sind, wird versucht diese zu klassifizieren – sowohl durch akustische Messungen als auch durch einfache raumakustische Simulation.

Neben dem Mikrofonverhalten wird auch die Beschaffenheit der störenden Umgebungsgeräusche im PKW erforscht, um diesen bestmöglich unterdrücken zu können.

DANKSAGUNG

Am Gelingen dieser Arbeit sind viele Personen und Freunde mitverantwortlich. An erster Stelle möchte ich mich bei Hannes Pomberger für seine unzähligen Ratschläge und Hilfestellungen bedanken – man kann sich keinen besseren Betreuer für eine Diplomarbeit wünschen. Besonderer Dank gilt auch dem Team um Klaus Haindl bei AKG Acoustics, welches mir mit kompetentem Rat und Tat zur Seite gestanden ist: Danke Klaus, Marco, Johann, Christian und Robert.

Ein Dankeschön will ich auch Ambros aussprechen, welcher mir mit der Bibliothek des Juridicums in Wien einen Ort der Ruhe für das Schreiben dieser Arbeit eröffnet hat. Stellvertretend für alle meine langjährigen Freunde von „daheim“ will ich mich bei ihm außerdem dafür bedanken, dass diese Freundschaften auch während meiner Studienzeit in Graz nie abgebrochen sind.

Mit dieser Diplomarbeit geht diese Zeit in Graz zu Ende, ich hoffe jedoch dass die dort entstandenen Freundschaften ebenfalls bestehen bleiben. Speziell möchte ich mich bei meinen Kollegen und Freunden Beni, Birgit, Daniel, Matthias und Sebastian bedanken. Das gemeinsame Lachen, Diskutieren, Musizieren, Lernen und Feiern in den Sommer- wie Wintersemestern hat mich in meinem Wesen bereichert. Nichtsdestotrotz schaue ich auch voller Freude in eine Zukunft in Wien, mit dem herzlichsten Menschen an meiner Seite dem ich je begegnet bin – Danke Rebekka, für Alles.

Last but not least ein großes DANKE für die immerwährende Unterstützung auch außerhalb des Studiums an meine Eltern Uschi und Paul, meinen Bruder Gregor sowie die ganze Familie Frank.

INHALT

ABSTRACT	I
KURZFASSUNG	II
1 EINLEITUNG.....	1
2 MESSVORRICHTUNG UND KORREKTURMAßNAMEN	2
2.1 Button Array.....	2
2.1.1 Aufbau.....	2
2.1.2 Funktion.....	5
2.1.3 Laufzeitausgleich.....	6
2.1.4 Fraktionelle Verzögerungen.....	10
2.2 Messbogen	12
2.2.1 Räumliche Abtastung.....	13
2.2.2 Aufbau.....	16
2.2.3 Montage im PKW	18
2.2.4 Boxendesign.....	18
2.2.5 Messprozedur	24
2.3 Messungen mit dem künstlichen Mund	25
2.4 Impulsantwortmessungen	25
2.4.1 Entzerrung	26
2.4.2 Messsignal - Sweep	30
2.5 Fahrgeräuschaufzeichnung.....	31
3 AUSWERTUNG DER MESSDATEN	31
3.1 Mikrofonverhalten.....	31

3.1.1	3D-Polardiagramme	32
3.1.2	Bündelungsmaß und Direktivitätsmaß	36
3.1.3	Optimale Mikrofonausrichtung.....	45
3.1.4	Zusammenfassung Mikrofonverhalten	51
3.2	Fahrgeräusch.....	51
3.2.1	Beschaffenheit des Fahrgeräusches.....	51
3.2.2	Richtungsabhängigkeit des Fahrgeräusches	53
3.2.3	Bewertung des Fahrgeräusches	57
3.2.4	Zusammenfassung Fahrgeräusch.....	58
3.3	Akustik des PKW Innenraumes	59
3.3.1	Räumliche Impulsantwort.....	59
3.3.2	Reflexionserkennung durch Schallintensität.....	64
3.3.3	Zusammenfassung PKW-Akustik	68
4	SIMULATION MIT CATT-ACOUSTICS.....	68
4.1	Simulationsmodell.....	69
4.2	Simulationsergebnisse	69
4.2.1	Nachhallzeit	70
4.2.2	Reflektogramm	71
4.2.3	Soundroses	72
4.3	Zusammenfassung Simulation	74
5	DARSTELLUNG	74
5.1	Kugelflächenfunktionen.....	75
5.1.1	Zerlegung in Kugelflächenfunktionen.....	76
5.2	Abtast-Strategien	77

5.3	Kugelflächenfunktionen auf begrenzten Kugelflächen.....	78
5.3.1	Neue Basisfunktionen für begrenzten Kugelflächen.....	79
5.3.2	Beispiele	80
6	SCHLUSSFOLGERUNG – AUSBLICK.....	81
	LITERATUR	83
	ANHANG	86

1 EINLEITUNG

In der Literatur findet man Arbeiten, die sich mit dem Schallfeld im Innenraum eines PKW beschäftigen. Hintergrund dieser Forschungen ist z.B. die Messung und Optimierung eines Audiosystems ([Kle98], [Cho02]) oder die akustische Verständigung zwischen FahrerIn und Passagieren im PKW ([Ort02], [Far04]).

Es sind dem Autor dieser Arbeit jedoch keine Veröffentlichungen bekannt, welche sich mit dem Einfluss der Fahrzeugakustik auf im Auto befestigte Mikrofone beschäftigen. Solche Mikrofone werden sowohl für den Mobilfunk (Freisprechmikrofone) als auch für die Sprachsteuerung der Audio- und Navigationssysteme in modernen PKWs verwendet. Für beide Anwendungsgebiete ist eine gute Sprachverständlichkeit durch eine möglichst hohe Unterdrückung von Störgeräuschen wie z.B. Fahrbahn- und Motorenlärm wichtig.

Hierfür wird in erster Instanz die Richtcharakteristik eines Mikrofons ausgenutzt, welche bei Messungen im Freifeld bestimmt wird. Das dadurch gewonnene Polardiagramm zeigt auf, wie empfindlich das jeweilige Mikrofon für Schalleinfall aus verschiedenen Richtungen ist. Die Richtung der maximalen Empfindlichkeit wird als Hauptrichtung oder Hauptachse des Mikrofons bezeichnet und zu bestmöglicher Störschallunterdrückung auf die zu erfassende Schallquelle ausgerichtet. Das aus den Werten des Polardiagrammes berechnete Bündelungsmaß gibt einen Einzahl-Wert für die Unterdrückung von Schalleinfall abseits der Hauptrichtung an.

Ziel dieser Arbeit ist es aufzuzeigen, in welchem Ausmaß diese im Freifeld gewonnenen Erkenntnisse für die Positionierung eines Mikrofones im Innenraum eines PKW relevant sind. Es soll daher der Einfluss der Fahrzeugakustik auf die Richtcharakteristik von Mikrofonen an verschiedenen Positionen im PKW untersucht und bewertet werden.

Hierfür erfolgt eine Bestimmung der Richtcharakteristik eines Mikrofons durch Messung eines 3D-Polardiagrammes im Inneren eines PKW an zwei typischen Mikrofonpositionen. Mit diesen, im PKW Innenraum gemessenen Daten, wird auch versucht das Bündelungsmaß zu bestimmen.

Um möglichst viele Mikrofontypen mit vertretbarem Aufwand zu messen, wird ein kompaktes Mikrofonarray eingesetzt. Mit diesem Array können die gebräuchlichsten Richtcharakteristika erster Ordnung (Kugel, Niere, Superniere, Hyperniere) simuliert werden. Das Mikrofonarray erlaubt zudem eine beliebige Ausrichtung dieser Richtcharakteristika in der horizontalen Ebene, womit auch der Einfluss der Ausrichtung des Mikrofons betrachtet werden kann. Die Kombination dieser zwei Möglichkeiten wird als *Beamforming* bezeichnet.

Da die 3D-Polardiagramme mit einer relativ groben Auflösung gemessen werden, erfolgt zur besseren Anzeige eine Approximation mit einer gewichteten Summe von Kugelharmonischen Funktionen (engl. *Spherical Harmonics*).

Neben der Betrachtung des Mikrofonverhaltens, soll auch die Fahrzeugakustik sowie das zu unterdrückende Störgeräusch im PKW untersucht werden. Hierfür werden Impulsantworten mit einem künstlichen Mund als Schallquelle und Aufzeichnungen des Fahrgeräusches durchgeführt. Für beide Aufzeichnungen wird ebenfalls das Mikrofonarray verwendet, wodurch das *Beamforming* verwendet werden kann um die Messdaten richtungsabhängig zu betrachten.

Der Übertragungsweg zwischen einem/einer SprecherIn und einem Mikrofon im PKW Innenraum wird zusätzlich noch durch eine einfache Modellierung in einer raumakustischen Simulationssoftware erforscht, wobei auch ein Vergleich mit den akustisch gemessenen Daten erfolgt.

2 MESSVORRICHTUNG UND KORREKTURMAßNAMEN

2.1 Button Array

Um möglichst viele Mikrofontypen mit vertretbarem Aufwand zu vermessen, wird ein koinzidentes Mikrofonarray eingesetzt. Ein solches Mikrofonarray erlaubt die Simulation einer beliebigen Richtcharakteristik erster Ordnung in einer horizontalen Ebene. In den folgenden Abschnitten wird der Aufbau und die Funktion des verwendeten Mikrofonarrays beschrieben. Weiters wird eine Methode für den Laufzeitausgleich zwischen den einzelnen Kapseln des Mikrofonarrays gezeigt, welche für eine korrekte Funktion notwendig ist.

2.1.1 Aufbau

Das für die Messungen im PKW verwendete Mikrofonarray ist ein sogenanntes *Boundary SoundField Microphone (BSFM)*¹. Dieses weist gewisse Ähnlichkeiten mit der für das Soundfieldmikrofon verwendeten Tetraeder-Anordnung auf, wobei bei dieser Anordnung die einzelnen Mikrofonkapseln in einer Grenzfläche untergebracht sind. Ein weiterer Unterschied ist die Verwendung von nur 3 statt 4 Druckgradientenempfängern. Durch Kombination und Gewichtung dieser Kapselsignale lassen sich Signale für 2 Achsen eines kartesischen Koordinatensystems sowie ein Kugelsignal gewinnen – diese 3 Signale sind in Abbildung 1 dargestellt. Durch gewichtete Summenbildung der Signale X, Y sowie des Kugelsignals W lassen sich beliebig ausgerichtete Richtcharakteristika erster Ordnung simulieren.

¹ Das *Boundary SoundField Microphone* ist eine Entwicklung der Firma AKG Acoustics und unterliegt dem Patent PCT/AT2009/00513.

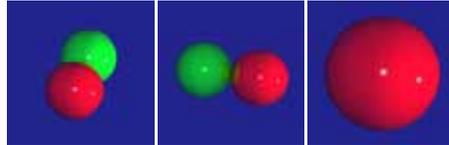


Abbildung 1: Die 3 Signale (von links nach rechts) X, Y und W [Far06]

Das *BSFM-Array* ist jedoch nur für *Beamforming* und Ausrichtung in der horizontalen Ebene konzipiert, deshalb wird auf einen vierten Druckdifferenzempfänger, welcher zur Gewinnung des Z-Signals dient, verzichtet. Trotzdem besteht das Array aus 4 Mikrofonkapseln - es wird zusätzlich zu den 3 Druckdifferenzempfängern ein Druckempfänger hinzugefügt, welcher im Rahmen dieser Arbeit jedoch nur als eigenständiges Kugelmikrofon betrachtet wird².

Abbildung 2 zeigt den Aufbau des Arrays und die Ausrichtung der einzelnen Mikrofonkapseln mit Nieren- bzw. Kugelcharakteristik.

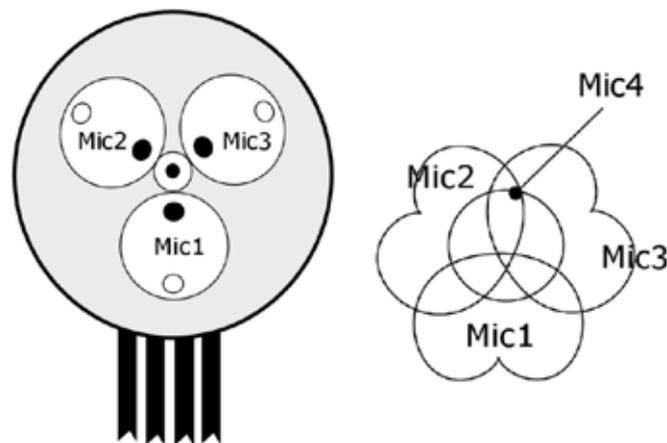


Abbildung 2: Anordnung und Ausrichtung der Mikrofonkapseln des Mikrofonarrays in der Ebene [Rei09]

Als Nierenkapseln werden miniaturisierte, planare Grenzflächen-Druckdifferenzempfänger mit ca. 1 cm Durchmesser verwendet, welche auch *Button* (engl. „Knopf“) genannt werden. Die Mikrofonkapsel mit Kugelcharakteristik ist eine einfache Elektretkapsel. Abbildung 3 zeigt die auf Achse gemessenen Betrags-Frequenzgänge der im Mikrofonarray verbauten Mikrofonkapseln.

² Das Signal der Kugelkapsel kann in Kombination mit dem simulierten Kugelsignal W und unter Ausnutzung des Nahbesprechungseffektes auch zur Entfernungsabschätzung verwendet werden, was aber im Rahmen dieser Arbeit nicht verwendet wird.

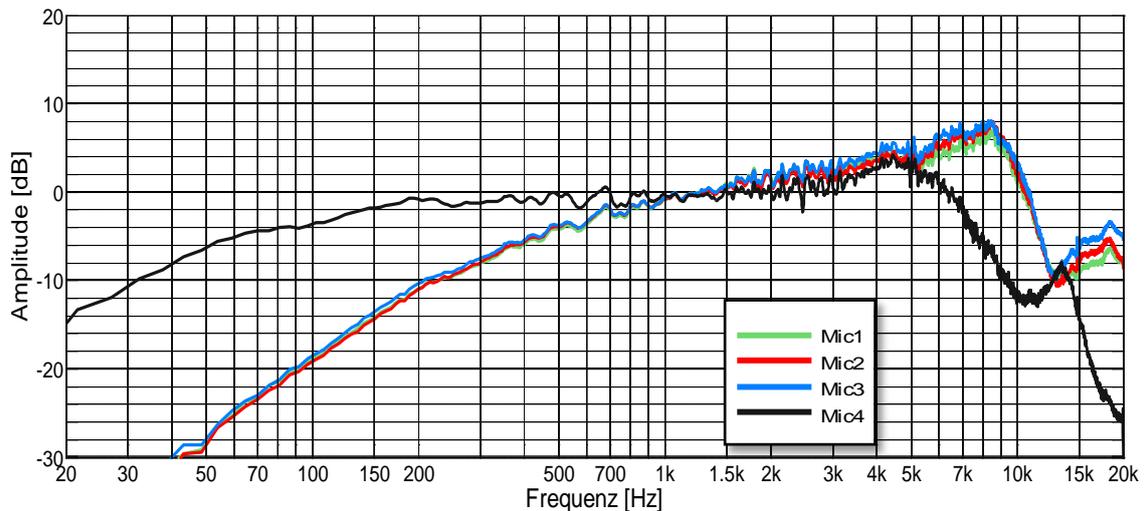


Abbildung 3: Frequenzgänge der Druckdifferenzempfänger Mic1-3 und des Druckempfängers Mic4

Bei den Messungen kommen zwei verschiedene Arrays zum Einsatz – eine Variante mit und eine Variante ohne Windschutzkappe. Es zeigt sich in der Auswertung, dass das Array mit Windschutz besser zu kontrollieren ist. Dies liegt daran dass die Richtcharakteristika der *Buttons* in Richtung Superniere tendieren, die verwendeten Formeln zur Gewinnung der B-Format Signale sind aber für Nierencharakteristika ausgelegt. Durch den Windschutz verlieren die Kapseln etwas an Richtwirkung und werden zu breiten Nieren, welche den Formeln besser entsprechen. Alle weiteren Beschreibungen und Messergebnisse beziehen sich daher auf das Mikrofonarray mit Windschutzkappe.

Abbildung 4 zeigt die beiden Varianten des Arrays, links ohne und rechts mit Windschutz. In der linken Abbildung ist der Abstand zwischen den Schalleintrittsöffnungen und damit des akustischen Zentrums der einzelnen *Buttons* von 11 mm zu erkennen. Das Array ist zwar als koinzidente Anordnung konzipiert, solche Anordnungen sind jedoch in der Praxis kaum realisierbar. Somit muss der damit verbundene Laufzeitunterschied zwischen den Mikrofonkapseln für eine optimale Funktion des Arrays bei der Verarbeitung der gemessenen Daten berücksichtigt werden (Kapitel 2.1.3).



Abbildung 4: Die zwei verwendeten Arrays: ohne (links) und mit Windschutzkappe (rechts)

2.1.2 Funktion

Das *BSFM-Array* ist eine Abwandlung des Soundfield Mikrofones ([Ger73], [Ger75]). Auch hier werden die Signale der einzelnen Mikrofonkapseln (das sogenannte A-Format) durch Summen und Differenzenbildung in das B-Format umgewandelt [Far06]. Da das *BSFM-Array* jedoch nur 3 Mikrofonkapseln in einer horizontalen Ebene besitzt, wird das Z-Signal nicht berechnet. In Gleichung (2.1) sind die Formeln zur Berechnung der Signale X und Y mit Achter-Charakteristik sowie dem Summen-Kugelsignal W [Rei09] beschrieben.

$$\begin{aligned} W &= \frac{(Mic1 + Mic2 + Mic3)}{3} \\ X &= \frac{(2 \cdot Mic1 - Mic2 - Mic3)}{3} \\ Y &= \frac{(Mic3 - Mic2)}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Durch die gewichtete Summe der Signale W , X und Y kann nun jede beliebige Richtcharakteristik erster Ordnung in der horizontalen Ebene erzeugt werden. Im Rahmen dieser Arbeit beschränkt sich dies auf die in der Elektroakustik gebräuchlichsten Charakteristika Niere, Superniere und Hypernieren.

Vor dieser Berechnung werden die Frequenzgänge der Kapseln $Mic2$ und $Mic3$ an jenen von $Mic1$ angeglichen, in Abbildung 5 symbolisiert durch die Filter $F2$ und $F3$. Diese Korrekturfilter werden durch Messungen der einzelnen im Mikrofonarray befindlichen Mikrofonkapseln im akustisch bedämpften Messraum gewonnen.

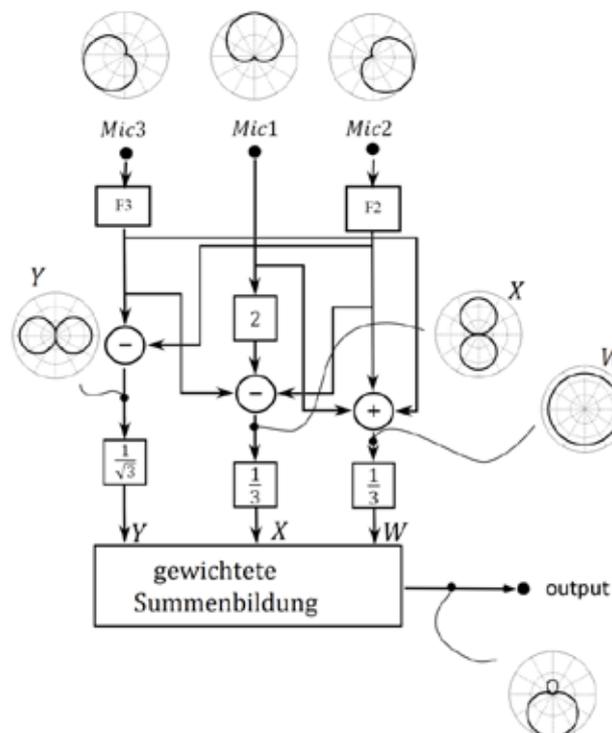


Abbildung 5: Erzeugung einer Richtcharakteristik durch die Einzelsignale des Arrays

2.1.3 Laufzeitausgleich

Die in Abschnitt 2.1.3. beschriebene Funktion beruht auf der Annahme, dass es sich bei dem Mikrofonarray um eine koinzidente Anordnung handelt. Die einzelnen Mikrofonkapseln liegen jedoch nicht in einem Punkt, die Einsprechöffnungen sind 11 mm voneinander entfernt. Bei wird ersichtlich, dass das *Beamforming* mit dem Mikrofonarray in der Praxis nicht so gut funktioniert wie in der Theorie. Die erzeugten Richtcharakteristika deckten sich kaum mit den idealen Charakteristika Niere, Superniere und Hypernieren. Die Nierencharakteristik z.B., welche eine maximale Löschung bei 180° aufweisen soll, besitzt für rückwertigen Schalleinfall lediglich eine Dämpfung um 10 dB. Weiters sind die mit dem Mikrofonarray simulierten Richtcharakteristika nicht symmetrisch um ihre 0° Achse. Die beschriebenen Abweichungen von idealen Richtcharakteristika erster Ordnung hängen zudem stark vom betrachteten Frequenzbereich ab.

Bei einem idealen koinzidenten Array würde der Schall an allen verwendeten Mikrofonkapseln gleichzeitig eintreffen. Gibt es jedoch einen Versatz zwischen den Kapseln, kommt es zu einem Laufzeitunterschied Δt . Dieser ist abhängig vom Schalleinfallswinkel und der Array-Geometrie. Abbildung 6 zeigt den resultierenden Laufzeitunterschied für das verwendete Mikrofonarray und zwei verschiedene Schalleinfallswinkel. Ist man nur am Schalleinfall aus einem bestimmten Winkel interessiert, kann man den Laufzeitunterschied für diesen ausgleichen.

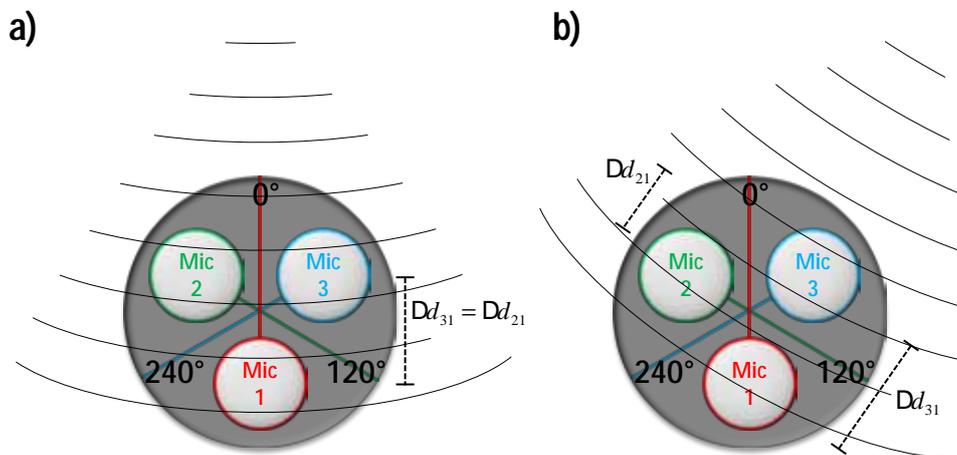


Abbildung 6: Resultierende Wegdifferenzen bei a) 0° und b) 30° Einfallsrichtung

Die Laufzeitunterschiede können mit

$$\Delta t = \frac{\Delta d}{c} \quad (2.2)$$

aus den Wegdifferenzen Δd berechnet werden. Die Wegdifferenzen können anhand trigonometrischer Funktionen berechnet werden. Dafür wird zuerst die Wegdifferenz zu einer Ebene durch den Mittelpunkt des Arrays individuell für die 3 Mikrofonkapseln bestimmt.

$$\begin{aligned}
\Delta d_1 &= r \cdot \cos(-\alpha + 180^\circ) \\
\Delta d_2 &= r \cdot \cos(-\alpha + 300^\circ) \\
\Delta d_3 &= r \cdot \cos(-\alpha + 60^\circ)
\end{aligned}
\tag{2.3}$$

Der Einfallswinkel α wird durch die Annahme gewonnen, dass die mit dem Mikrofonarray berechnete Richtcharakteristik immer in die Richtung der Schallquelle zeigt. Somit ist der Ausrichtungswinkel der Richtcharakteristik gleich dem Schalleinfallswinkel. Der in (2.3) addierte Phasenterm entspricht dem Winkeln, an dem sich das jeweilige Mikrofon auf einer gedachten Kreisanordnung befindet. Für die in Abbildung 6b dargestellte Situation würde dies für das Mikrofonsignal *Mic1* einen Laufzeitunterschied von $\Delta t_1 < 0$ bewirken, was keine Verzögerung sondern einen Vorversatz bedeuten würde. Um die resultierenden Gesamtverzögerungen $\Delta t_{a,b}$ zu berechnen, muss nun immer auf das Mikrofon mit der betragsgrößten Verzögerung kleiner Null bezogen werden. Für den in Abbildung 6b dargestellten Fall bedeutet dies $\Delta t_{11} = 0$, $\Delta t_{21} = |\Delta t_1|$, $\Delta t_{31} = \Delta t_3 + |\Delta t_1|$. In Abbildung 7 werden die geometrischen Verhältnisse noch einmal dargestellt.

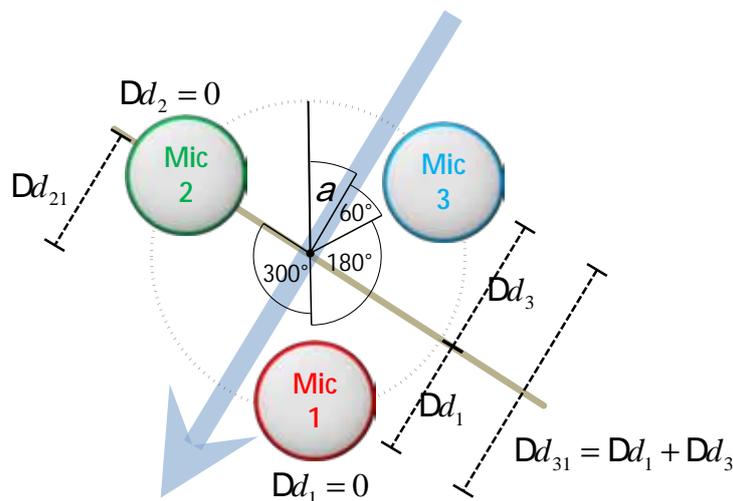


Abbildung 7: Funktionsprinzip des Laufzeitausgleichs in Hauptrichtung

In Polardiagrammmessungen wurde versucht diese Methode der Laufzeitkompensation zu validieren, jedoch brachte die Version mit Ausgleich auf die Schalleinfallrichtung schlechtere Ergebnisse als ohne. Bei einer erzeugten Nierencharakteristik mit dem zuvor erläuterten Laufzeitausgleich war die Löschung bei 180° bei Frequenzen über 1 kHz kaum noch ausgeprägt. Abbildung 8 zeigt das Polardiagramm einer solchen Niere – links ohne jeglichen Laufzeitausgleich und rechts mit Laufzeitausgleich auf die Hauptrichtung.

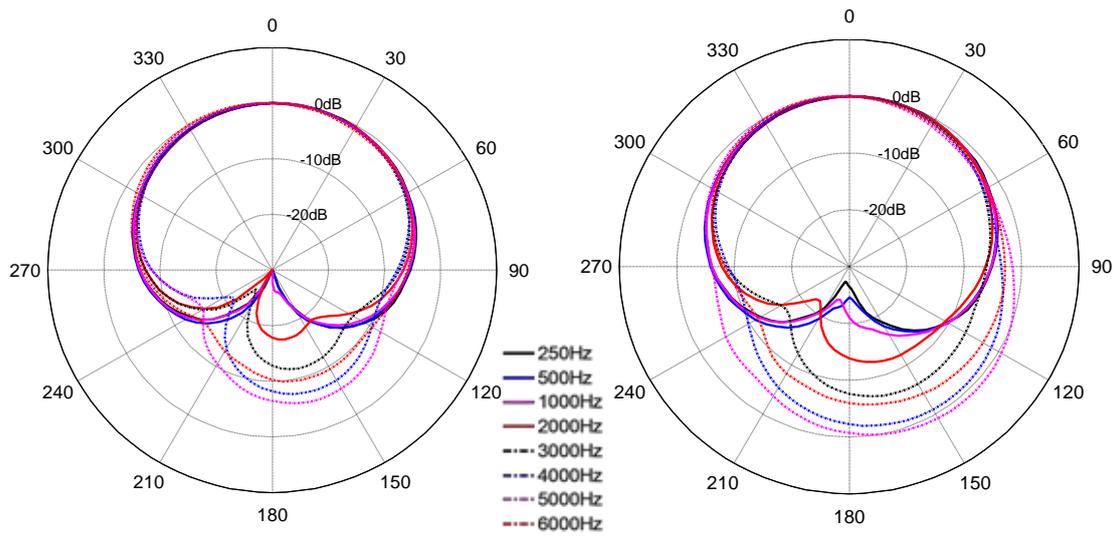


Abbildung 8: Gemessenes Polardiagramm ohne (links) und mit (rechts) Laufzeitausgleich

Betrachtet man das ohne Laufzeitausgleich gemessene Polardiagramm links in Abbildung 8, sieht man dass die Richtcharakteristik im vorderen Winkelbereich von 270° bis 90° auch ohne Laufzeitausgleich einer idealen Niere weitgehend entspricht. Im hinteren Winkelbereich weicht die gemessene Richtcharakteristik stark vom Ideal ab.

Um dies zu erklären wird die Berechnung der Nierencharakteristik mit den B-Format Signalen betrachtet. Der einfachste Fall wäre eine Nierencharakteristik symmetrisch um die X-Achse, hier wird lediglich das Kugelsignal W und das Achtersignal X benötigt. Kombiniert man diese zwei Signale bzw. deren Richtcharakteristika, addiert sich das Kugelcharakteristik und die vordere Keule des Achtersignals. Die hintere Keule des Achtersignals ist jedoch gegenphasig und wird somit vom Kugelsignal subtrahiert. Graphisch ist dies in Abbildung 9 dargestellt.

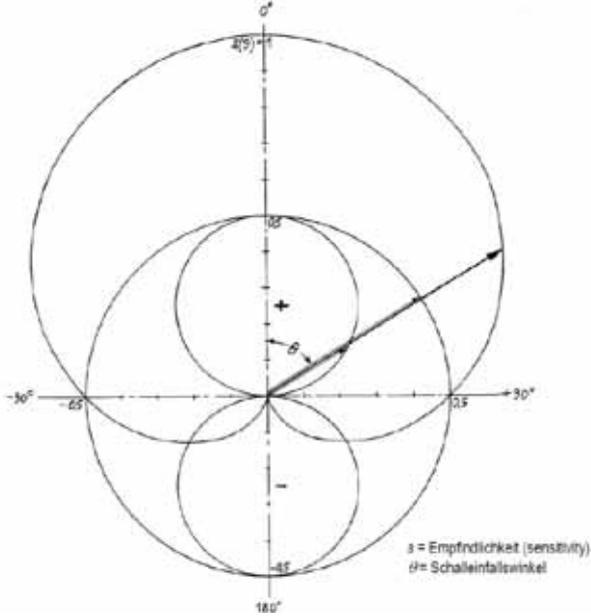


Abbildung 9: Berechnung einer Nieren aus einem Kugel- und einem Achtersignal [Sen93]

Aus den Formeln in (2.1) geht hervor, dass das Kugelsignal W durch eine gleichgewichtete Addition der 3 Nierensignale berechnet wird. Das so berechnete Signal wird in der horizontalen

Ebene bis zu einer Grenzfrequenz immer einer idealen Kugel entsprechen. Ab der Grenzfrequenz kommt es durch den Laufzeitunterschied zwischen den Kapseln zu Auslöschungen, und zwar dann wenn, der Laufzeitunterschied genau oder einem ungeraden Vielfachen der halben Wellenlänge einer einfallenden Schallwelle entspricht – dann wäre das Signal von zwei Mikrofonkapseln um genau 180° phasenverschoben und würde sich bei einer Addition zur Berechnung des W -Signals auslöschen. Der aus Arraygeometrie und Schallgeschwindigkeit resultierende, größtmögliche Laufzeitunterschied zwischen zwei Mikrofonkapseln beträgt ca. $48 \mu s$ (zwischen $Mic2/3$ und $Mic1$ in Abbildung 6a links) wonach mit einer ausgeprägten Löschung erst ab ca. 10 kHz zu rechnen ist.

Für die Berechnung des X -Signals hingegen werden die verwendeten Kapselsignale jedoch nicht gleich gewichtet. Hier wirkt sich der Laufzeitunterschied zwischen den Kapselsignalen stärker aus, und die berechnete Achtercharakteristik wird durch Auslöschungen weniger Energie besitzen als bei einer Koinzidenten Anordnung. Bei der Kombination des X und des W -Signals zur Berechnung der Nierencharakteristik wird somit das energetisch starke Kugelsignal mit dem viel energiewächeren Achtersignal addiert (vordere Keule) bzw. subtrahiert (hintere Keule). Dies bewirkt für den vorderen Winkelbereich eine etwas schwächere Empfindlichkeit als bei einer Idealen Niere, aber vor allem eine viel schlechter ausgeprägte Löschung im hinteren Winkelbereich (Abbildung 8 links).

Der Laufzeitunterschied zwischen den Mikrofonkapseln des Arrays betrifft also immer jenen Teil der Richtcharakteristik stärker, welcher durch Subtraktion gewonnen wird – also bei den betrachteten Richtcharakteristika Niere, Superniere und Hypernieren der hintere Winkelbereich. Wendet man nun den Laufzeitausgleich in Hauptrichtung an, werden die Kapselsignale welche näher an der Schallquelle liegen verzögert. Für Schall der von hinten auf das Array trifft, bewirkt diese künstlich eingeführte Verzögerung jedoch eine Verdopplung des ohnehin akustisch vorhandenen Laufzeitunterschieds. Somit wird das berechnete Achtersignal durch Auslöschungen noch mehr geschwächt, was eine weitere Verschlechterung der Löschung der Nierencharakteristik im hinteren Winkelbereich verursacht (Abbildung 8 rechts).

Sinnvoller ist es daher, die Laufzeitkompensation Schalleinfall aus der Rückseite des Mikrofonarrays durchzuführen. Dazu wird Gleichung (2.3) um einen Winkel-Offset von 180° ergänzt:

$$\begin{aligned}\Delta d_1 &= r \cdot \cos(-\alpha) \\ \Delta d_2 &= r \cdot \cos(-\alpha + 120^\circ) \\ \Delta d_3 &= r \cdot \cos(-\alpha + 240^\circ)\end{aligned}\tag{2.4}$$

Diese Modifikation bewirkt eine starke Verbesserung der Löschung im hinteren Winkelbereich der erzeugten Richtcharakteristik. Das Polardiagramm Abbildung 10 (links) zeigt

die die gleiche Nierencharakteristik wie in Abbildung 8, diesmal jedoch der Laufzeitausgleich für Schalleinfall aus 180° angewandt.

Für Richtcharakteristika mit ein oder mehreren Nebenkeulen wie z.B. der Superniere gibt es zwar nicht mehr eine einzige Lösrichtung, der Laufzeitausgleich für 180° bringt aber trotzdem gute Ergebnisse wie rechts Abbildung 10 zu sehen ist.

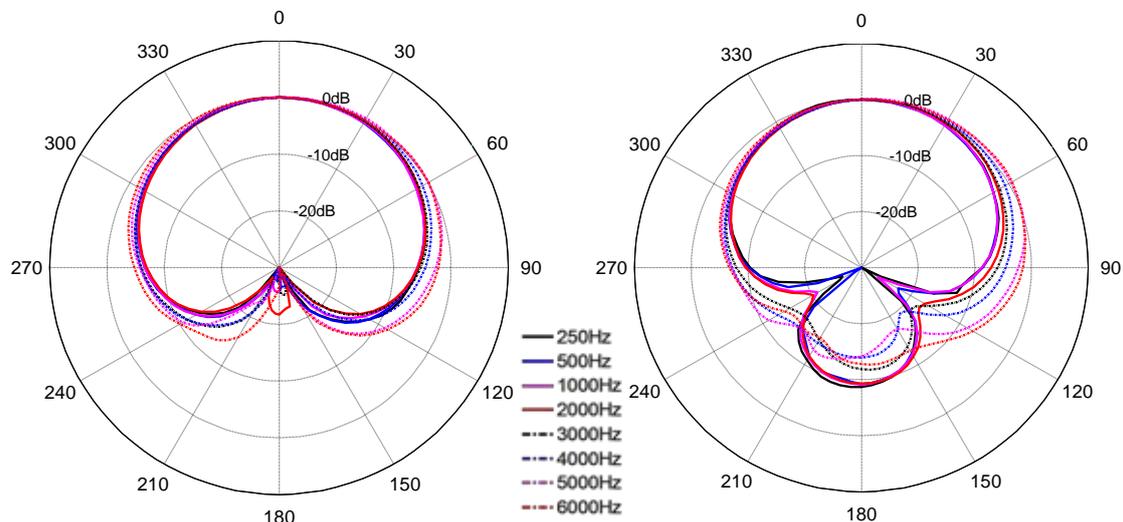


Abbildung 10: Gemessenes Polardiagramm einer Nieren- (links) und einer Supernieren-Charakteristik (rechts) mit Laufzeitausgleich für den Schalleinfall aus 180°

2.1.4 Fraktionelle Verzögerungen

Bei der verwendeten Samplerate von 44100 kHz und einer Schallgeschwindigkeit von $c = 343 \frac{m}{s}$ (bei 20° Raumtemperatur) bewirken die 48 μs Laufzeitunterschied, welche maximal zwischen den akustischen Zentren der Mikrofonkapseln liegen, nach

$$s = \frac{\Delta d}{c} \cdot f_s \quad (2.5)$$

ein Delay s von nur 2,1 Samples. Dieser maximale Laufzeitunterschied kommt nur bei bestimmten Ausrichtungswinkeln vor, im Allgemeinen ist er geringer. Durch die 11 mm Kapselabstand kann man von einem mittleren Delay von 1,4 Samples ausgehen. Würde man hier auf ein leicht realisierbares Delay von 1 Sample abrunden, wäre das ein Fehler von 30%. Um die Laufzeitunterschiede über alle Schalleinfallswinkel gleich gut ausgleichen zu können, müssen daher Verzögerungen kleiner als ein Sample realisiert werden können.

In [Kar96] werden verschiedenen Methoden für diese fraktionellen Verzögerungen (engl. *Inter Sample Delays*) erläutert, wobei prinzipiell zwischen zwei Varianten unterschieden wird. Zum Einen gibt es die Möglichkeit der Realisation mit einem *Infinite Impulse Response* (IIR) Filter, andererseits kann auch mit einem *Finite Impulse Response* (FIR) Filter eine solche Verzögerung erzielt werden.

Als IIR-Filter wird ein Allpassfilter verwendet. Ein Allpassfilter hat den Vorteil dass das Amplitudenspektrum des verzögerten Signals, nicht verzerrt wird. Es kommt also nur zu einer

Veränderung der Gruppenlaufzeit, welche jedoch nicht konstant über die Frequenz ist. Eine nicht konstante Gruppenlaufzeit bewirkt eine nicht lineare Phasenlaufzeit, wodurch die resultierende fraktionelle Verzögerung je nach Filterordnung N speziell für hohe Frequenzen variiert, wie in Abbildung 11 zu sehen ist.

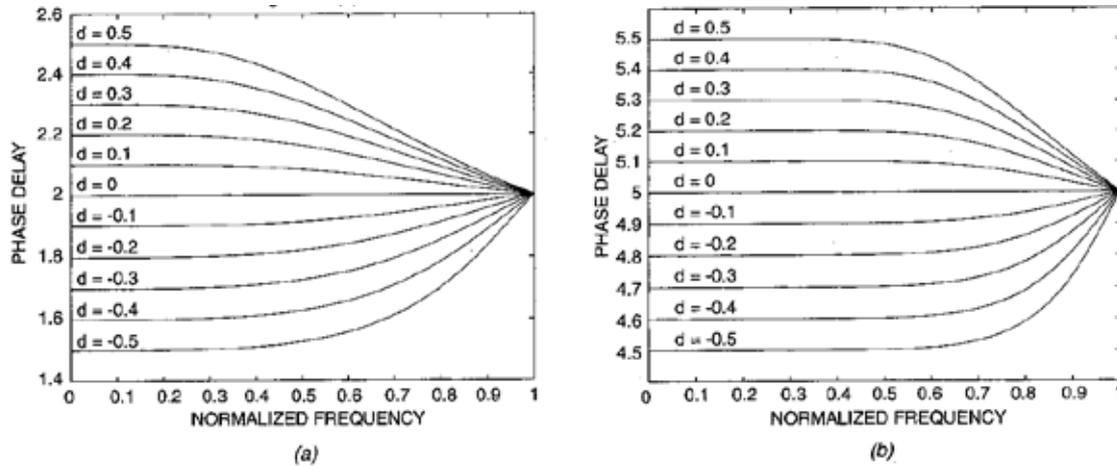


Abbildung 11: Phasenlaufzeit eines Allpassfilters für verschiedene fraktionelle Verzögerungen mit Filterordnung (a) $N=2$ und (b) $N=4$ [Kar96]

Die Implementation mit einer FIR Filterstruktur hat, bei geeigneter Koeffizientenwahl, nicht diesen Nachteil, dafür kommt es zu Verzerrungen des Amplitudenspektrums des verzögerten Signals.

Beschreibt man einen Verzögerungsglied mit der fraktionellen Verzögerung D im Zeitbereich als $y(n) = x(n - D)$, würde dies nach Fourier zu einem idealen Filter $H_{id}(e^{j\omega}) = e^{-j\omega D}$ führen. Mit der inversen Fourier-Transformation erhält man die Impulsantwort des idealen Verzögerungsgliedes (ohne Herleitung)

$$h_{id}(n) = \frac{\sin[\pi(n - D)]}{\pi(n - D)} = \text{sinc}(n - D) \quad (2.6)$$

also eine unendlich ausgedehnte sinc-Funktion. Eine Methode, einen implementierbaren Filter zu realisieren, ist diese sinc-Funktion mit einem endlichen Filter anzunähern. Hierzu wird mit der Methode des kleinsten Fehlerquadrates der Fehler zum idealen Filter minimiert.

Eine einfachere Methode ist die Berechnung der Koeffizienten mittels *Lagrange Interpolation*. Hierbei wird der Fehler lediglich für eine bestimmte Frequenz, üblicherweise $\omega = 0$, minimiert. Man erhält dadurch ein Gleichungssystem der Ordnung $L = N + 1$ (ohne Herleitung)

$$\sum_{k=0}^N k^n h(n) = D^n \text{ für } n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (2.7)$$

welches durch eine *Interpolation nach Lagrange* gelöst werden kann, bei der Polynome definierter Ordnung zwischen vorhandenen Datenwerten interpoliert werden. Die Lösung führt

zu Gleichung (2.8), aus der durch Einsetzen der gewünschten fraktionellen Verzögerung in Samples die Filterkoeffizienten gewonnen werden können.

$$h(n) = \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq n}}^N \frac{D - k}{n - k} \quad \text{für } n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (2.8)$$

Je nach Filterlänge $L = N + 1$ hat der resultierende FIR Filter unterschiedlichen Einfluss auf Frequenzgang und Phase, wie in Abbildung 12 zu sehen ist.

Für den Laufzeitausgleich zwischen den Kapseln wurde die Filterordnung $N = 3$ gewählt. Diese Wahl bewirkt eine konstante Gruppenlaufzeit und somit einen linearen Phasengang, aber es kommt zu einer Dämpfung der hohen Frequenzen. Diese Dämpfung in Form eines Tiefpassfilters in Abbildung 12 zu sehen. Bei einer Filterordnung $N = 3$ bzw. einer daraus resultierenden Filterlänge $L = 4$ und einer Samplerate von 44100 Hz kommt es erst ab 11 kHz zu einer Höhenabsenkung, was für den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Frequenzbereich nicht relevant ist.

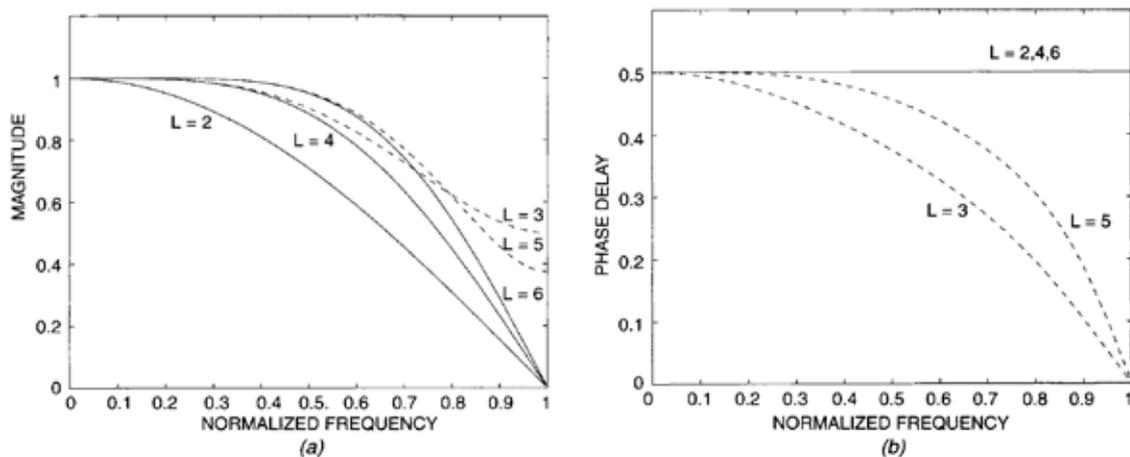


Abbildung 12: Betragsfrequenzgang (a) und Phasenlaufzeit (b) eines FIR-Filters bei unterschiedlicher Filterlängen L [Kar96]

Für den Laufzeitausgleich zwischen den Mikrofonkapseln des Arrays wird ein FIR Filter mit Berechnung der Filterkoeffizienten mittels *Lagrange Interpolation* verwendet, da dieser gegenüber dem Allpassfilter mehrere Vorteile bietet:

- Linearer Phasengang
- FIR Filter sind aufgrund ihrer nicht rekursiven Struktur immer stabil [Tie99]
- Einfache Berechnung der Filterkoeffizienten welche auch in einer eventuellen Echtzeitanwendung des Mikrofonarrays möglich ist

2.2 Messbogen

Um ein 3D-Polardiagramm eines Mikrofones in einem PKW zu messen muss eine Vorrichtung konstruiert werden, welche folgende Anforderungen erfüllt:

- Geringes Gewicht

- kompakt
- Einfache Montage in verschiedenen PKW-Modellen

Unter Berücksichtigung all dieser Anforderungen wurde ein Messbogen konstruiert, welcher im Folgenden beschrieben ist. Abschnitt 2.2.1 Beschäftigt sich mit der für die Messdatenerfassung (zur Darstellung eines 3D-Polardiagramms) notwendigen räumlichen Abtastung. In Abschnitt 2.2.2 und 2.2.3 ist der daraus resultierende Aufbau und die Montage des Messbogens im PKW beschrieben. Abschnitt 2.2.4 beschreibt die Konstruktion und Funktion der verwendeten Messlautsprecher, in Abschnitt 2.2.5 ist die Messprozedur an sich beschrieben.

2.2.1 Räumliche Abtastung

Für die Messung der Richtcharakteristik wird für verschiedene Punkte auf einer Kugelfläche um das Mikrofon herum die Mikrofonempfindlichkeit gemessen. Für die Darstellung des 3D-Polardiagrammes ist eine möglichst hohe Anzahl von solchen Abtastwerten wünschenswert. Eine hohe Anzahl von Messpunkten ist desweiteren auch für eine Zerlegung der Richtcharakteristik in *Kugelflächenfunktionen* erstrebenswert, was ausführlich in Kapitel 5 behandelt wird.

Für die Abtastung einer Kugelfläche gibt es viele Möglichkeiten, in [Zot091] ist eine Zusammenfassung von Abstatstrategien aufgeführt. Abbildung 13 links zeigt einen Abtastpunkt $p(r, \varphi, \theta)$ in einem Kugelkoordinatensystem, welcher auf dem Kreuzungspunkt vom Meridian des Azimutwinkels φ mit dem Breitenkreis des Elevationswinkels θ liegt. Für die möglichst unkomplizierte Abtastung mit einem Messbogen kommen nur Raster in Frage, bei denen die Abtastpunkte immer in gleichmäßigen Winkelabständen $\Delta\varphi$ auf den gleichen Breitenkreisen liegen und somit durch sequentielle Abtastung der Meridiane erfasst werden können.

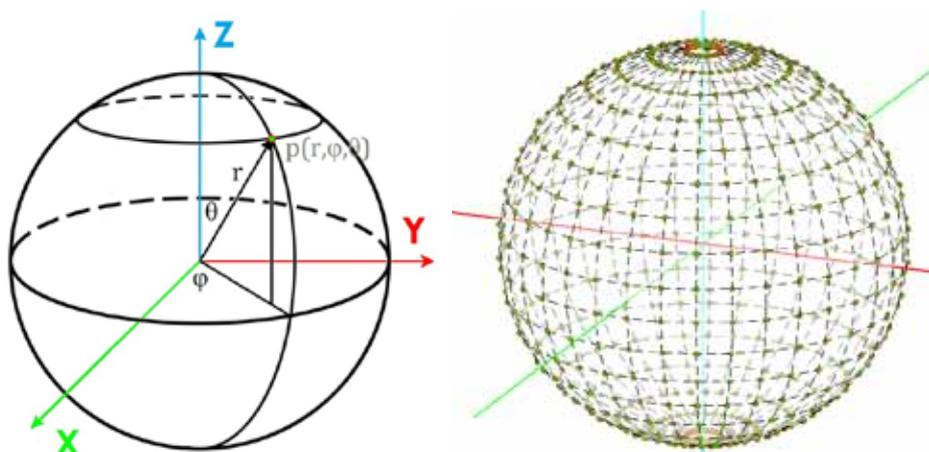


Abbildung 13: Abtastpunkt(e) im Kugelkoordinatensystem (links) und auf dem EAR-Raster (rechts)

Das für die 3D-Polardiagrammmessungen im PKW verwendete *Equal Angular Resolution* Raster [Pom08] erfüllt diese Voraussetzung. Im Wortlaut übersetzt bedeutet *Equal Angular Resolution* „gleiche Winkel Auflösung“, wodurch die Haupteigenschaft des *Equal Angular*

Resolution Rasters (kurz *EAR*-Raster) bereits beschrieben ist: die Azimut-Winkelauflösung $\Delta\varphi$ der Abtastpunkte ist gleich der Elevations-Winkelauflösung $\Delta\theta$. Dadurch besitzt das *EAR*-Raster doppelt so viele Abtastpunkte auf einem Breitenkreis wie Abtastpunkte auf einem Meridian. Der Zusammenhang zwischen Winkelauflösung und Anzahl der Abtastpunkte J auf einem Meridian wird in Gleichung (2.9) gezeigt.

$$\Delta\varphi = \Delta\theta = \frac{\pi}{J} \quad (2.9)$$

Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete *EAR*-Raster besitzt eine Winkelauflösung von 10° was wiederum eine Anzahl von $J = 18$ Abtastpunkten pro Meridian und 36 Abtastpunkten pro Breitenkreis bedeutet. Die gesamte Anzahl an Messpunkten beträgt $K = 2J^2 = 648$.

Bei einer symmetrischen Verteilung der Messpunkte um den Äquator, können die Positionswinkel der Abtastpunkte $p_k(x, \varphi_k, \theta_k)$ mit den für $k = 0, 1, \dots, K - 1$ in (2.10) beschriebenen Formeln berechnet werden.

$$\begin{aligned} \varphi_k &= \frac{\pi}{J} \cdot \text{div}(k, J) \\ \theta_k &= \frac{\pi}{J} \cdot \left(\text{mod}(k, J) + \frac{1}{2} \right) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Es ergeben sich bei $J = 18$ somit Azimutwinkel φ_k von 0° bis 350° und Elevationswinkel θ_k von 5° bis 185° , beide jeweils mit 10° Schrittweite. In Abbildung 13 rechts ist das *EAR*-Raster mit 648 Abtastpunkten für eine ganze Kugelfläche zu sehen, für eine Abtastung im PKW Innenraum muss das Raster modifiziert werden.

Der Messbogen wird im Innenraum des PKW horizontal montiert – das in Abbildung 13 rechts dargestellte Kugelkoordinatensystem wird deshalb um 90° um die X-Achse des kartesischen Koordinatensystems gekippt. Dadurch bleiben die Winkelbezeichnungen erhalten: Winkel in der horizontalen Ebene sind Azimutwinkel φ , Winkel in der vertikalen Ebene sind Elevationswinkel θ . Geändert werden die Winkeldefinitionen: positive Azimutwinkel φ zeigen in Richtung positiver Werte auf der Y-Achse, negative Azimutwinkel vice versa. Positive Elevationswinkel θ zeigen nach unten, wobei ein Punkt mit $\theta = 0^\circ$ am Äquator liegt. Dieses gekippte Kugelkoordinatensystem und das daraus resultierende *EAR*-Raster sind in Abbildung 14 dargestellt.

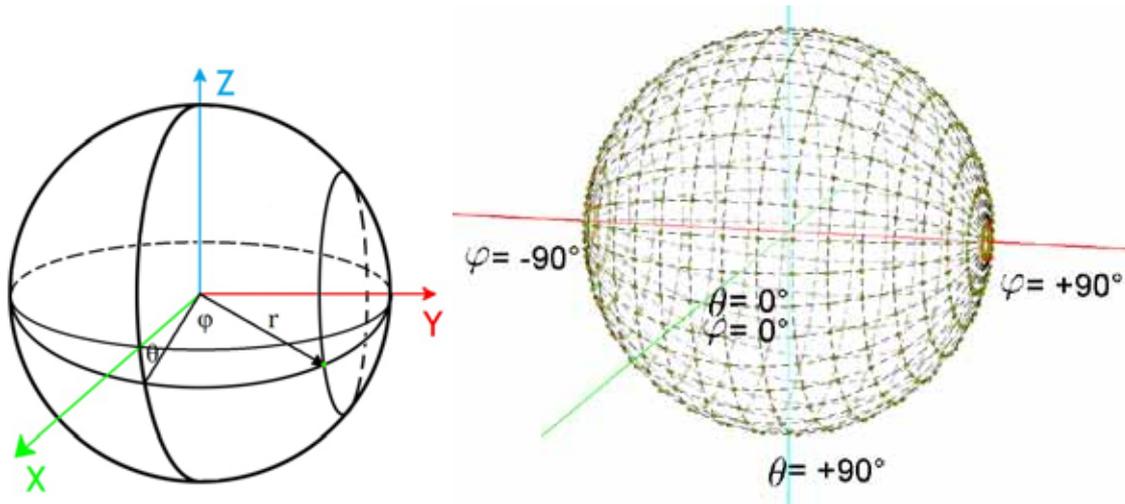


Abbildung 14: Abtastpunkt(e) im gekippten Kugelkoordinatensystem (links) und auf dem für den PKW Innenraum Modifizierten *EAR*-Raster (rechts) mit Winkeldefinitionen

Aufgrund von begrenzenden Flächen kann im PKW Innenraum nicht auf einer kompletten Kugelfläche um das Mikrofonarray herum abgetastet werden. Anhängig von der Mikrofonposition ist das Raster durch den Dachhimmel und das Seitenfenster bzw. die Windschutzscheibe begrenzt. Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei typische Mikrofonpositionen betrachtet, in Folge bezeichnet als Position *Dachbedieneinheit* und *Handgriff Fahrer*. Abbildung 15 zeigt diese zwei Mikrofonpositionen sowie die entsprechenden Messraster im PKW. Das *EAR*-Raster für die Position *Dachbedieneinheit* liegt im Ursprung des im Auto definierten Koordinatensystems mit den Achsen X, Y und Z.

Die X-Achse verläuft längs des PKW, die Y-Achse quer. 0° Grad Azimut zeigt in Richtung PKW Heck, $\pm 180^\circ$ Azimut zeigt in Richtung PKW-Front. Positive Azimut Winkel zeigen in Richtung BeifahrerIn, negative in Richtung FahrerIn. Für die Position *Handgriff Fahrer* wird ein relatives Koordinatensystem mit den Achsen x_h , y_h und z_h definiert. Die Ausrichtungen der Achsen und dadurch auch die Winkeldefinitionen bleiben gleich – das 3D-Polardiagramm für die Position *Handgriff Fahrer* wird also nur an Abtastpunkten mit positiven Azimut Winkeln (also zur Beifahrerposition zeigend) gemessen.

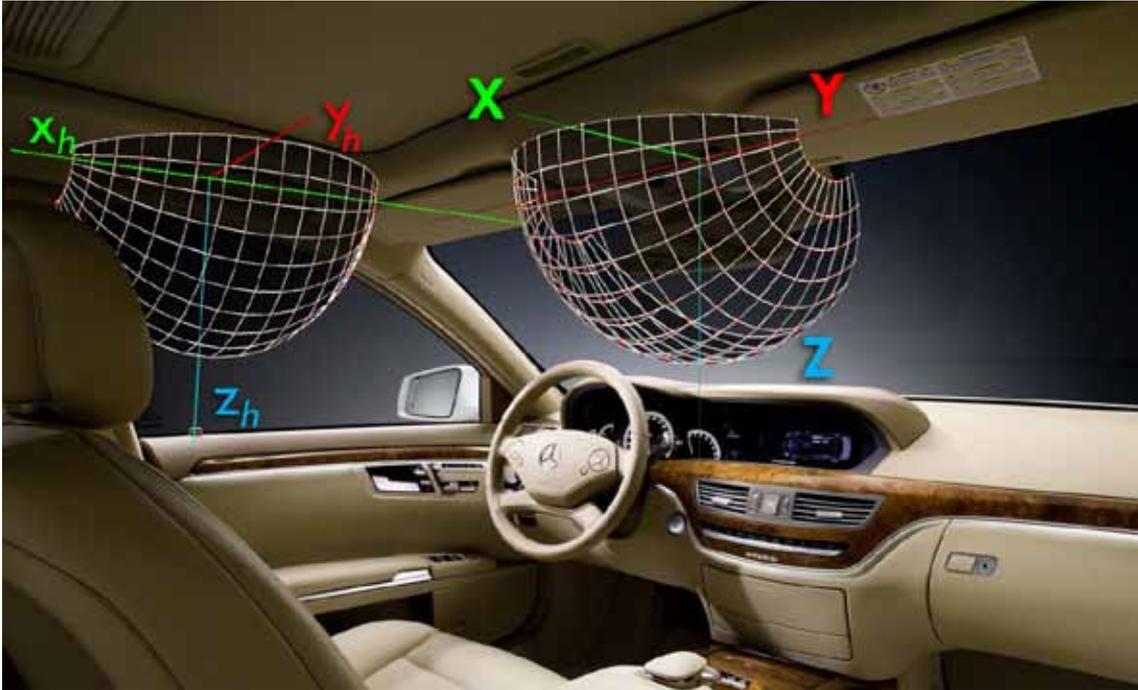


Abbildung 15: Die Mikrofonpositionen *Handgriff Fahrer* (links) und *Dachbedieneinheit* (rechts) im PKW, sowie die entsprechenden Messraster zur Bestimmung der 3D-Polardiagramme

Der Elevationsbereich des Messrasters an der Position *Dachbedieneinheit* wird nach oben durch den Dachhimmel ($\theta = 10^\circ$) und nach unten durch die Windschutzscheibe ($\theta = 130^\circ$) begrenzt. Für die Messposition *Handgriff Fahrer* ist das Messraster in der Elevation noch stärker begrenzt: Zwar ist durch den Abstand zwischen dem Handgriff und dem Dachhimmel eine Messung ab $\theta = 0^\circ$ möglich, nach unten erfolgt durch das Seitenfenster eine Begrenzung bei $\theta = 90^\circ$.

Im Azimut Bereich ist das Messraster konstruktionsbedingt ebenfalls begrenzt. Die Größe der am Messbogen befindlichen Messlautsprecher lässt nur eine Abtastung bis $\varphi = \pm 75^\circ$ zu, da in der Nähe der Befestigungspunkte des Messbogens bei $\varphi = \pm 90^\circ$ aufgrund der begrenzenden Flächen nicht genügend Platz ist.

Diese Restriktionen bewirken eine Reduktion der abgetasteten Fläche – das für die Vermessung der Mikrofonposition *Dachbedieneinheit* modifizierte Raster besitzt 208 Abtastpunkte, an der Position *Handgriff Fahrer* können 160 Punkte des *EAR*-Rasters für eine ganze Kugeloberfläche abgetastet werden.

2.2.2 Aufbau

Der im Rahmen der Diplomarbeit konstruierte Messbogen besteht im Wesentlichen aus einem Aluminiumprofil in Halbkreisform, an welchem insgesamt 8 Messlautsprecher befestigt sind. Der verwendete Radius von 33 cm wird als Kompromiss zwischen dem durchschnittlichen Abstand zwischen SprecherIn und Mikrofon im PKW von ca. 45 cm und der Einschränkung

durch die Fahrzeuggeometrie gewählt. Speziell für die Vermessung der Mikrofonposition *Handgriff Fahrer* wäre ein größerer Bogen nicht möglich.

Aufgrund des Gewichts und der notwendigen Gehäusegröße der Messlautsprecher (siehe Abschnitt 2.2.4) ist eine Montage von mehr als acht Lautsprechern auf dem Messbogen nicht möglich. Um dennoch die in Abschnitt 2.2.1 festgelegte Abtastung von $\varphi = -75^\circ$ bis $\varphi = +75^\circ$ in 10° Schritten möglich zu machen, wird ein recht einfacher aber effizienter Trick angewandt.

Betrachtet man den Messbogen liegend in der in XY-Ebene (vgl. Abbildung 14), sind die Messlautsprecher nicht symmetrisch um die X-Achse, sondern auf einer Seite um 10° versetzt montiert. In Tabelle 2-1 sind die Azimutwinkel der Messlautsprecher Positionen angegeben.

LS 1	LS 2	LS 3	LS 4	LS 5	LS 6	LS 7	LS 8
-75°	-55°	-35°	-15°	$+5^\circ$	$+25^\circ$	$+45^\circ$	$+65^\circ$

Tabelle 2-1: Winkelpositionen der Messlautsprecher am Messbogen

Dreht man den Messbogen Bogen 180° um die X-Achse, ergibt dies die in Tabelle 2-2 angeführten Azimutwinkel für die Positionen der Messlautsprecher.

LS 8	LS 7	LS 6	LS 5	LS 4	LS 3	LS 2	LS 1
-65°	-45°	-25°	-5°	$+15^\circ$	$+35^\circ$	$+55^\circ$	$+75^\circ$

Tabelle 2-2: Winkelpositionen der Messlautsprecher am um 180° gedrehten Messbogen

Nach diesem Verfahren werden bei der Messung eines 3D-Polardiagrammes immer zwei Messdurchgänge durchgeführt, wobei der Messbogen für den zweiten Durchgang um 180° gedreht wird. Werden diese zwei Teilmessungen (Abbildung 16) zusammengefasst, ergeben sich insgesamt 16 Abtastpunkte in einem Azimut-Bereich von -75° bis $+75^\circ$. Graphisch dargestellt ist dies in Abbildung 17.

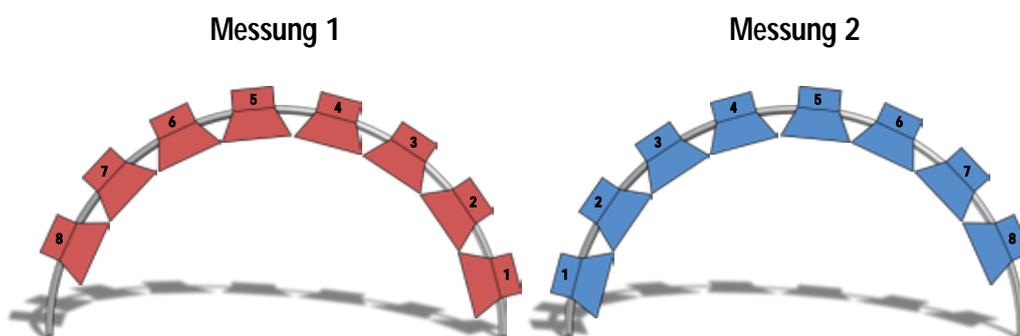


Abbildung 16: Positionen der Messlautsprecher 1-8 auf dem Messbogen bei Messung 1 und 2

Messungen 1+2

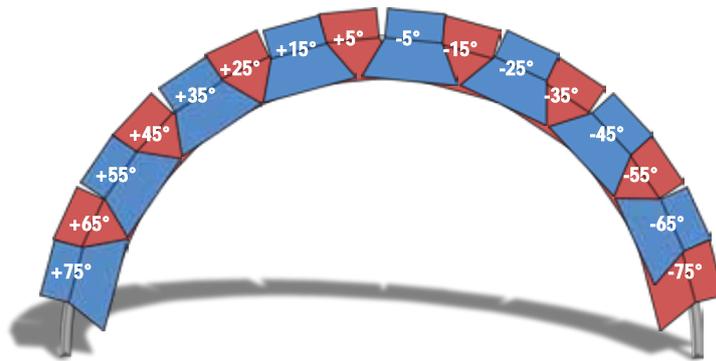


Abbildung 17: Kombination der beiden Teilmessungen

2.2.3 Montage im PKW

Für die Montage des Messbogens im PKW wurde eine fixe Schraubverbindung gewählt³. Als Montageschnittstelle wurden die Gewinde genutzt, an denen normalerweise die Sonnenblenden für FahrerIn und BeifahrerIn montiert sind. Für zukünftige Messungen in anderen Fahrzeugen muss lediglich eine für das jeweilige Modell passende Adapterplatte gefertigt werden. Um den im PKW montierten Messbogen um seine horizontale Achse schwenken zu können, wurden arretierbare Scharniere⁴ verwendet.



Abbildung 18: Montagevorrichtung für die Messposition *Handgriff Fahrer*

2.2.4 Boxendesign

Für die Messung der frequenzabhängigen 3D-Polardiagramme von Mikrofonen durch Impulsantwortmessung werden eigens konstruierte Messlautsprecher verwendet. Ebenso wie die Messbogenkonstruktion sollten auch diese Messboxen leicht und kompakt sein, müssen

³ Ideen den Messbogen mit Magneten am Dachhimmel oder Saugnäpfen an den Scheiben zu befestigen, wurden aufgrund des Eigengewichtes von ca. 2 Kilo verworfen.

⁴ ELES+GANter Austria GmbH, Franz Schubert-Straße 7, A-2345 Brunn am Gebirge

dabei aber für pegelstarke Schallwiedergabe im betrachteten Frequenzbereich von 150 Hz bis 11 kHz geeignet sein.

Für die Messlautsprecher wird daher ein Breitbandchassis verwendet. Die Nachteile eines solchen Breitbänders sind je nach Membrangröße sowohl die hohe untere Grenzfrequenz als auch der die starke Bündelung der Abstrahlcharakteristik zu hohen Frequenzen. Da für diese Arbeit nur ein Frequenzbereich von 180 Hz bis 11 kHz betrachtet wird, reicht ein Breitbandchassis mit geringem Membrandurchmesser in einem einfachen, geschlossenen Gehäuse für die Messungen aus. Der Entwurf eines ventilierten Gehäuses mit Bassreflexöffnung hätte zwar eine Verschiebung der Grenzfrequenz nach unten bewirkt, jedoch in keinem Maße welches den Aufwand einer solchen Konstruktion gelohnt hätte. Nach einer Vorauswahl durch erhältliche Datenblätter und anschließenden Messungen einer Auswahl an Breitbändern wird das Modell FRWS 5 der Firma Visaton⁵ in der 4 Ohm Variante für die Messboxen gewählt.

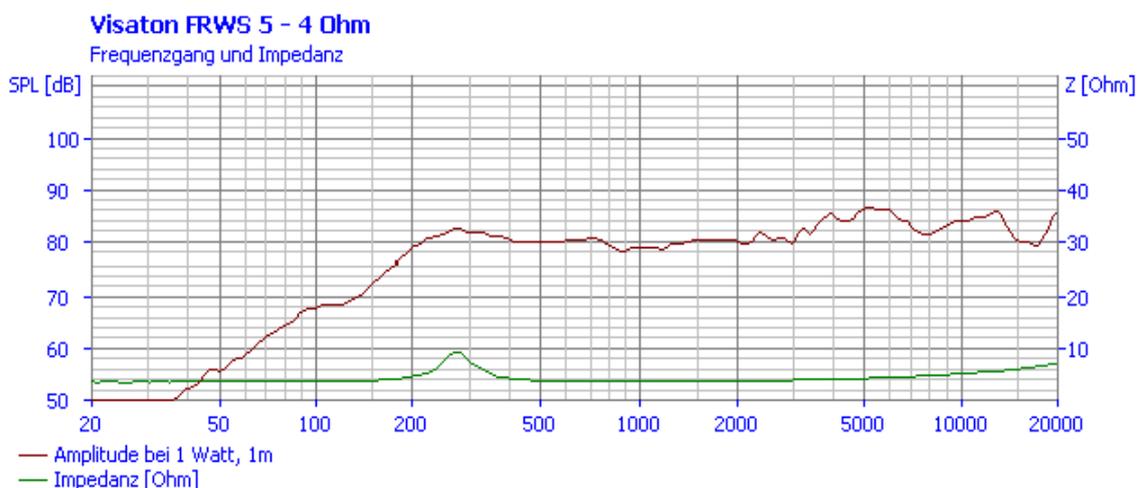


Abbildung 19: Frequenzgangangabe vom Hersteller für den Breitbandlautsprecher

Das Volumen für das geschlossene Gehäuse wurde auf Basis der Thiele-Small Parameter berechnet [Gra07]. Die benötigten Werte für die Parameter *äquivalente Luftnachgiebigkeitsvolumen der Membranaufhängung* ($V_{\ddot{a},Ma}$) und *Gesamtgüte der Membrankonstruktion* ($Q_{g,Mk}$) können dem Datenblatt des Breitbandchassis entnommen werden. $V_{\ddot{a},Ma}$ gibt an wie groß das hinter der Membran befindliche Volumen sein muss um ein Verhalten wie in der unendlichen Schalwand zu bewirken. Die Güte $Q_{g,Mk}$ beschreibt im weitesten Sinne das Verhalten eines Chassis bei seiner Resonanzfrequenz [Hifi]. Für das verwendete Chassis lauten diese Werte $V_{\ddot{a},Ma} = 200 \text{ cm}^3$ und $Q_{g,Mk} = 1,24$.

Für die Berechnung des Gehäusevolumens muss auch ein Wert für die gewünschte *Gesamtgüte des Lautsprechers im geschlossenen Gehäuse* ($Q_{g,gG}$) gewählt werden. Dieser Wert liegt üblicherweise zwischen 0,5 und 1,2 und bestimmt das Verhalten Basswiedergabe im Bereich der unteren Grenzfrequenz, welches im Boxenbau ein eher subjektives

⁵ VISATON GmbH & Co. KG, Ohligser Straße 29-31, D-42781 Haan

Qualitätskriterium ist. So soll die gewählte Güte $Q_{g,gG} = 1$ eine kräftige Basswiedergabe bewirken [Gra07]. In (2.11) ist die Formel zur Berechnung des Gehäusevolumens V_{gG} angeführt.

$$V_{gG} = \frac{V_{\dot{a},Ma}}{1,15 \cdot \left(\frac{Q_{g,gG}}{Q_{g,Mk}}\right)^2 - 1} \quad (2.11)$$

Mit den beschriebenen Werten für die Thiele-Small Parameter berechnet sich ein physikalisch unmögliches Gehäusevolumen $V_{gG} < 0 \text{ m}^3$. Betrachtet man die Formel (2.11), erkennt man, dass ein Verhältnis $Q_{g,gG} \ll Q_{g,Mk}$ immer einen negativen Wert für das Gehäusevolumen zufolge haben muss. Die *Membrangüte* $Q_{g,Mk}$ kann also durch das Gehäusevolumen nur geringfügig zu einer *Gesamtgüte* $Q_{g,gG}$ verkleinert werden, generell wird die Güte durch das Volumen erhöht.

Da die Optimierung des Gehäusevolumens nach der Wahl einer bestimmten Güte ohnehin nicht für einen Messlautsprecher von Bedeutung ist, wird daher stattdessen ein Gehäusevolumen $V_{\dot{a},gG} \approx V_{\dot{a},Ma}$ von ca. 0,2 Liter festgelegt. Da die Firma VISATON die Frequenzgänge ihrer Kleinlautsprecher in einer unendlichen Schallwand⁶ misst, sollte somit gewährleistet sein, dass die untere Grenzfrequenz des Messlautsprechers jener von der Herstellerangabe entspricht. Das Lautsprechergehäuse besteht aus Hartschaum, das Innenvolumen wird mit Kunstwolle ausgekleidet um, etwaige Stehwellen mit hoher Frequenz zu dämpfen.



Abbildung 20: gedämpftes Lautsprechergehäuse mit montiertem Chassis

Zur Beurteilung der fertigen Messboxen werden Impulsantwortmessungen im akustisch bedämpften Messraum in 33 cm Entfernung auf der Hauptachse des jeweiligen Chassis durchgeführt. Abbildung 21 zeigt die gemessenen Betragsfrequenzgänge. Degenüber dem vom Hersteller angegebenen Frequenzgang (Abbildung 19), ist die untere Grenzfrequenz bei den

⁶ Eine unendlich große Schallwand ist natürlich nicht realisierbar, jedoch ist die für die Messungen verwendete DIN-Schallwand gegenüber der Membranfläche so groß, dass man sie als unendliche Schallwand sehen kann: <http://www.visaton.de/vb/showthread.php?t=12754>

Messboxen um ca. 60 Hz höher. So ist, gegenüber dem Pegel bei 1kHz, ein -10 dB Abfall in Abbildung 19 erst ab ca. 140 Hz zu sehen, für die Messboxen erfolgt dieser bereits ab 200 Hz.

Dass sich die Frequenzgänge im Bassbereich nicht decken obwohl das Boxenvolumen gleich dem *äquivalente Luftnachgiebigkeitsvolumen der Membranaufhängung* gewählt wurde, lässt sich folgendermaßen erklären: Der Herstellerfrequenzgang wird in einer, im Verhältnis zum Membrandurchmesser, unendlichen Schallwand gemessen – durch die Schallwand kommt es zu keinem akustischen Kurzschluss zwischen Membran Vorder- und Rückseite. In einem kleinen geschlossenen Lautsprechergehäuse, wie es für die Messboxen verwendet wird, kommt es zwar auch zu keinem akustischen Kurzschluss, tiefe Frequenzen werden aber um das Gehäuse herum gebeugt und es kommt für diese zu einer kugelförmigen Abstrahlcharakteristik. Die abgestrahlte Schallleistung verteilt sich somit kugelförmig in alle Richtungen und wird bei einer Messung im akustisch bedämpften Messraum nicht vollständig erfasst. Um einen Betragsfrequenzgang wie in der unendlichen Schallwand zu erhalten, müsste man somit die Schallleistung in einem Hallraum messen.

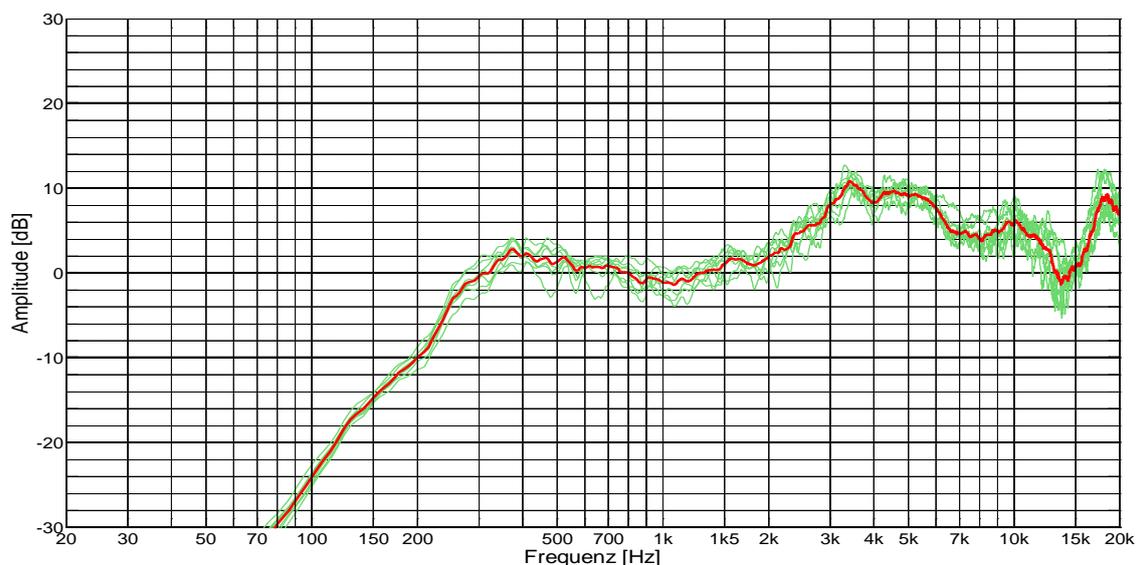


Abbildung 21: Frequenzgänge der einzelnen Messboxen (grün) und gemittelt (rot)

Alle im Rahmen dieser Arbeit stattfindenden Impulsantwortmessungen werden entweder in einem schallisolierten Messraum oder im Innenraum PKWs, welcher in einer Messhalle geparkt ist, durchgeführt.

Sowohl im bedämpften Messraum als auch im PKW herrscht ein Ruhepegel von $L_R \approx 20 \text{ dB}(A)$. Die Impulsantwortmessungen erfolgen mit einem Signalpegel von $L_M \approx 75 \text{ dB}(A)$ was eine Signal-Störabstand (engl. Signal-to-Noise-Ratio) $SNR = L_M - L_R \approx 65 \text{ dB}(A)$ zufolge hat. Betrachtet man den gemittelten Betragsfrequenzgang der Messlautsprecher ist durch die hohe SNR auch noch eine Auswertung von Impulsantwortmessungen bis unter 100 Hz möglich.

Neben einer Betrachtung der Beträgsfrequenzgänge der Messlautsprecher wird auch deren Abstrahlcharakteristik untersucht. Das im PKW gemessene 3D-Polardiagramm soll dazu verwendet werden, die optimale Ausrichtung eines Mikrofons auf einen/eine SprecherIn an Fahrer- oder Beifahrerposition zu bestimmen. Es ist daher naheliegend für die Messungen eine Quelle zu wählen welche, den/die SprecherIn möglichst genau nachbildet. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde bereits ein Sprach-Frequenzbereich von 180 Hz bis 11 kHz definiert in dem alle verwendeten Messvorrichtungen ein lineares Verhalten aufweisen sollen. Zusätzlich soll auch eine Schallquelle gewählt werden, welche das diffuse Schallfeld im inneren eines PKW auch räumlich ähnlich anregt wie ein menschlicher Sprecher.

Zu diesem Zweck wird ein Polardiagramm des verwendeten Messlautspechters gemessen (Abbildung 22) und mit Polardiagrammen eines menschlichen Kopfes und den künstlichen Mündern von verschiedenen Kunstkopfmodellen (in Abbildung 23 aus [Far03]) verglichen. Berücksichtigt man die unterschiedliche Skalierung (die Kreise in Abbildung 23 entsprechen einer Dämpfung um je 5 dB und nicht um je 10 dB wie in Abbildung 22) erkennt man eine gute Übereinstimmung der Abstrahlcharakteristik der verwendeten Messlautsprecher und der eines menschlichen Sprechers.

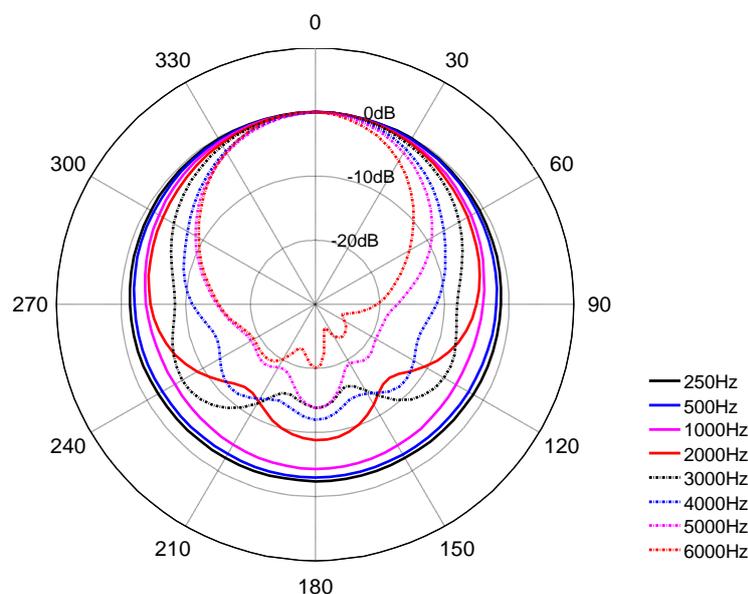


Abbildung 22: Polardiagramm des verwendeten Messlautspechters

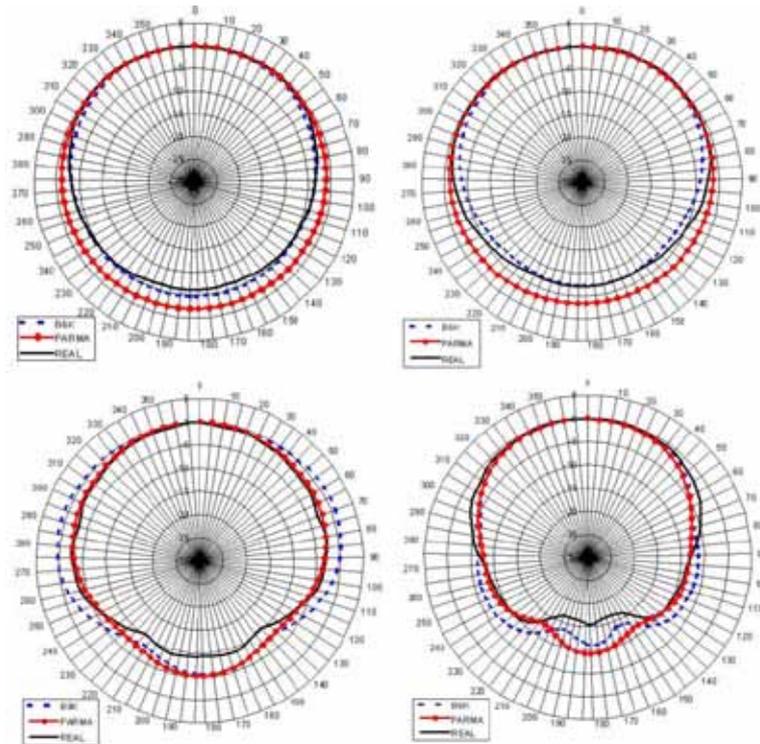


Abbildung 23: Polardiagramm von verschiedenen Kunstköpfen sowie dem menschlichen Kopf bei 250 Hz (links oben), 500 Hz (rechts oben), 1 kHz (links unten) und 2 kHz (rechts unten) [Far03]

Da auf dem Messbogen insgesamt 8 Messlautsprecher montiert sind, wird zuletzt noch das Übersprechen zwischen den verschiedenen Messlautsprechern betrachtet.

In einem Leistungsverstärker, wie er für die Ansteuerung der Messlautsprecher verwendet wird, kommt es zu einem elektrischen Übersprechen zwischen Kanälen. Dieses elektrische Übersprechen kann durch einen geeigneten Schaltungsaufbau jedoch weitestgehend minimiert werden und beträgt bei dem verwendeten Mehrkanalverstärker weniger als -90 dB.

Ein größeres Problem stellt das akustische Übersprechen zwischen den Messlautsprechern dar. Zum Einen sind die Messlautsprecher nicht schwingungsfrei auf dem Messbogen montiert und können durch Körperschallübertragung von einem angesteuerten Lautsprecher zum Mitschwingen angeregt werden. Zum anderen sind die Messlautsprecher auch über das Luftvolumen akustisch miteinander verkoppelt, bei einem kleinen Raumvolumen fällt dieser Umstand stärker ins Gewicht.

Um ein eventuelles akustisches Übersprechen nachzumessen wird ein Vibrometer verwendet. Dieses kann mittels Laserstrahl die Auslenkung einer Membran detektieren.

Es wird ein Messlautsprecher zuerst direkt mit einem Signal bespielt und die Membranbewegung gemessen, anschließend wird bei gleicher Messung der benachbarte Lautsprecher angesteuert.

Bezogen auf den bei aktiver Ansteuerung gemessenen Membranhub ist der Membranhub bei passiver Ansteuerung durch einen Benachbarten Lautsprecher um 43 dB geringer. Der gleiche Wert wird für die Membrangeschwindigkeit gemessen.

Dieser Wert darf jedoch nicht direkt als das resultierende Übersprechen interpretiert werden, vielmehr müsste auch die Phasenbeziehung zwischen den Lautsprechermembranen in Betrachtet werden. Schwingt die passiv angesteuerte Membran nämlich gegenphasig der aktiv angesteuerten Membran des benachbarten Lautsprechers, würde der Messlautsprecher als Resonator fungieren und dem Schallfeld sogar Energie entziehen.

Da eine solche Betrachtung im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt wurde, wurde ein maximales Übersprechen von -43 dB zwischen zwei direkt benachbarten Messlautsprechern angenommen. Da für die Messungen des Polardiagrammes pro Abtastpunkt immer nur ein Lautsprecher angesteuert werden darf, hätte diese eine falsche Quelle zufolge welche ein Signal mit -43 dB gegenüber dem eigentlichen Messsignal wiedergibt. Betrachtet man 2D-Polardiagramme von beliebigen Audiomessungen, sieht man dass diese meistens nur Werte bis -30 dB gegenüber einem Maximalwert darstellen. Eine solche Skalierung wird auch für die Darstellung der im PKW gemessenen 3D-Polardiagramme gewählt. Eine durch das Übersprechen entstehende, falsche Quelle mit 43 dB geringerem Signalpegel gegenüber dem Messsignalpegel hat also keinen relevanten Einfluss auf die gemessenen Daten – entweder scheint der verursachte Messfehler im Polardiagramm gar nicht auf oder ist im Verhältnis zum eigentlichen Messwert minimal.

2.2.5 Messprozedur

Die Messungen mit dem Messbogen Innenraum des PKW werden in einer schallisolierten Messhalle durchgeführt. Zuerst wird das Mikrofonarray an der entsprechenden Position (*Dachbedieneinheit* oder *Handgriff Fahrer*) angebracht und anschließend der Messbogen mit der Montagevorrichtung befestigt.

Der Messbogen wird nacheinander manuell in die für das jeweilige Messraster möglichen Elevationswinkelstellungen (vgl. Abbildung 15) gebracht. Die Winkel werden mit Hilfe einer digitalen Wasserwaage auf +/- 0.1 Grad genau eingestellt und können durch die arretierbare Scharniere der Montagevorrichtung für die Dauer der Messung exakt eingehalten werden.

Für die Impulsantwortmessungen geben die 8 Messlautsprecher nacheinander ein Messsignal (Abschnitt 2.4.2) wieder und es werden jeweils die Ausgangssignale der 4 im Mikrofonarray verbauten Mikrofonsensoren einzeln aufgezeichnet. Dieser Vorgang wird für alle Elevationswinkel wiederholt. Anschließend wird der Messbogen abmontiert, wie in Abschnitt 2.1.1 um 180° gedreht und für eine erneute Messung wieder montiert. Auch dieser zweite Messdurchgang wird für alle Elevationswinkel durchgeführt. Abbildung 24 zeigt ein einige Impressionen des Messvorgangs.



Abbildung 24: Messung mit dem Messbogen im PKW, Winkelkontrolle mit digitaler Wasserwaage

2.3 Messungen mit dem künstlichen Mund

Zusätzlich zur Impulsantwortmessung mit dem Messbogen mit 33 cm Radius werden auch Messungen mit einem künstlichen Mund, welcher in einem Kunstkopf⁷ verbaut ist, durchgeführt. Der Kunstkopf wird für die Messungen mittels Befestigung am Sitz in 4 verschiedene Quellpositionen gebracht. Diese entsprechen potentiellen Fahrer- und Beifahrer-Positionen für Personen unterschiedlicher Körpergröße, eine Auflistung ist im Anhang in Tabelle 0-3 zu finden. Der Pegel bei der Messung beträgt 3 cm vor dem künstlichen Mund 94 dB SPL bei 1 kHz. Abbildung 25 zeigt den Kunstkopf im PKW an einer Fahrerposition.



Abbildung 25: Kunstkopf im Auto, gut zu sehen sind auch die zwei verschiedenen Varianten des Mikrofonarrays an den Positionen *Dachbedieneinheit* (rot) und *Handgriff Fahrer* (grün)

2.4 Impulsantwortmessungen

Die Impulsantworten werden mit einem Sinussweep gemessen, welcher in Abschnitt 2.4.2. näher beschrieben wird. Die Impulsantworten werden mit einer Länge von 8192 Samples aufgezeichnet, was bei der verwendeten Abtastkarte von 44,1 kHz einer Aufnahmedauer von ca. 186 ms entspricht.

⁷ Der verwendete Kunstkopf ist das Modell HMS II.3 von Head Acoustics.

Nach [Ton02] kommt es im Innenraum eines vergleichbaren PKW zu einer Nachhallzeit T_{30} von maximal 180 ms bei Frequenzen $f < 200 \text{ Hz}$. Diese im Verhältnis zur Raumgröße lange Nachhallzeit für tiefe Frequenzen ist durch Raumresonanzen bedingt. Ab 500 Hz kommt es zu einer mittleren Nachhallzeit von maximal 100 ms. Eine Aufnahmedauer von 186 ms ist daher auch ausreichend um im PKW selbst sehr späte, energieschwache Reflexionen zu erfassen.

Die gemessenen Impulsantworten werden mittels einer FFT mit 8192 Punkten in den Frequenzbereich transformiert, wo durch Zusammenfassen und Amplitudenmittelung mehrerer Frequenzbins auch eine Betrachtung in Oktav- und Terzbändern möglich ist. Die Grenz- und Mittenfrequenzen dieser Bänder werden im Anhang in Tabelle 0-1 und Tabelle 0-2 aufgelistet.

2.4.1 Entzerrung

Da die verwendeten Messlautsprecher einen sehr unebenen Betragsfrequenzgang sowie eine Streuung untereinander besitzen, müssen die mit dem Messbogen gemessenen Impulsantworten nachträglich entzerrt werden. Für die Entzerrung einer Impulsantwort mit dem Frequenzgang eines Messlautsprechers wird dieser üblicherweise im Freifeld bzw. einem bedämpften Messraum mit einem Druckempfänger mit möglichst linearem Frequenzgang vermessen⁸. Aus dem durch diese Messung gewonnenen Frequenzgang des Messlautsprechers wird durch Division im Frequenzbereich ein Filter generiert mit welchem dann die Impulsantwort entzerrt werden kann.

Für die Entzerrung von mit dem Messbogen gewonnenen Impulsantworten, ist die Frequenzgangmessung jedes einzelnen vom Messbogen abmontierten Messlautsprechers jedoch nicht optimal. Der Messbogen und die darauf befindlichen Messlautsprecher stellen eine besitzen mehrere reflektierende Flächen verfälschen somit das im PKW herrschende Schallfeld und damit die Messung. Durch den Abstand Messabstand von 33 cm zum Mikrofonarray an der Grenzfläche trifft die erste, durch die Grenzfläche und die Gehäusefront des Messlautsprechers verursachte Reflexion ca. 2 ms nach dem Direktschall wieder am Mikrofonarray ein. Positive und destruktive Interferenz der Reflexion mit dem Direktschall bewirken einen sehr ausgeprägten Kammfilter (vergl. Abbildung 27). Zusätzlich wird das Messsignal auch noch an den anderen 7 Messlautsprechern reflektiert, es kommt zu einer komplexen Überlagerung verschiedener Kammfilter.

Ideal wäre es daher diese Kammfiltereffekte ebenfalls bei der Entzerrung der Impulsantworten zu berücksichtigen. Um dies zu bewirken, werden die Frequenzgänge der einzelnen Messlautsprecher im montierten Zustand am Messbogen gemessen, welcher wiederum wie später bei den Messungen im PKW an einer Grenzfläche montiert ist.

⁸ Als Messmikrofon wird ein Modell der Firma G.R.A.S Sound&Vibration verwendet, welches sowohl über einen linearen Frequenz- als auch Phasengang verfügt.

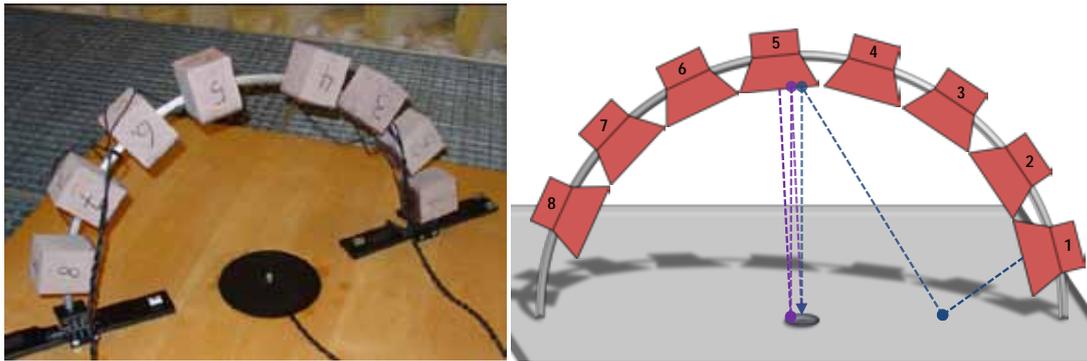


Abbildung 26: Messbogen an einer schallharten Grenzfläche montiert und entstehende Reflexionspfade

Betrachtet man die so gemessenen Betragsfrequenzgänge der einzelnen Messboxen in Abbildung 27, erkennt man dass die starken, durch die Reflexion bedingten Einbrüche erst ab ca. 10 kHz relevant werden, was am oberen Rand des für diese Arbeit betrachteten Frequenzbereichs liegt.

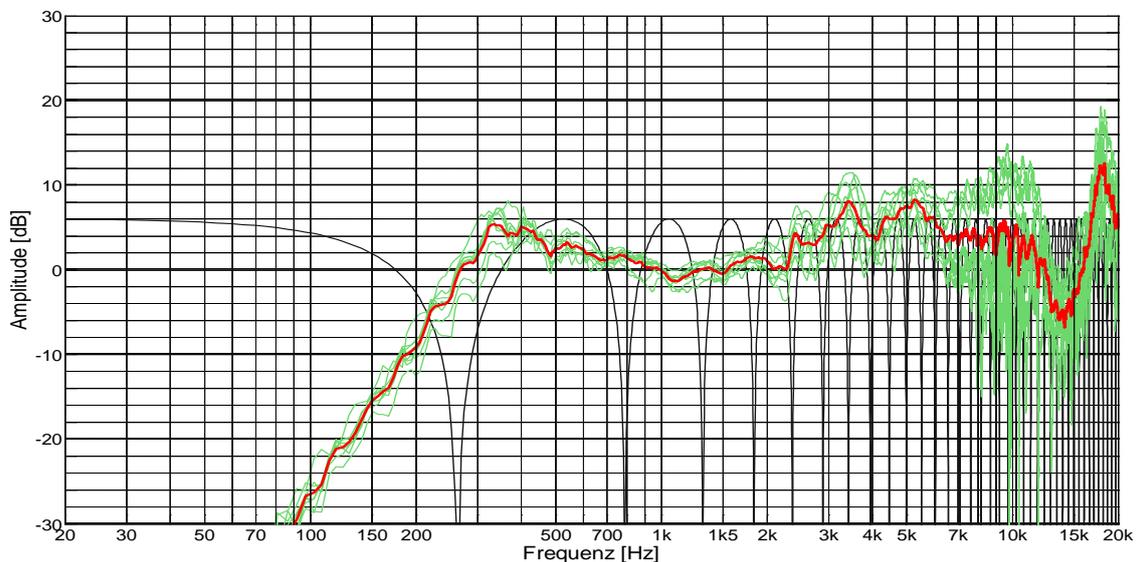


Abbildung 27: Betragsfrequenzgänge der Messboxen im Halbraum (grün bzw. gemittelt rot) und ein durch Reflexion zwischen Grenzfläche und Messlautsprecher entstehender Kammfilter (schwarz)

Die starke Schwankung der Betragsfrequenzgänge der einzelnen Messlautsprecher hat mehrere Gründe. Betrachtet man noch einmal Abbildung 26 rechts, erkennt man, dass die Pfade der ersten Reflexionen für jeden Lautsprecher unterschiedlich sind. Für die Lautsprecher 4 und 5 wird die Reflexion und der damit verbundene Kammfilter am ausgeprägtesten sein, für die seitlichen Lautsprecher 1 und 8 am wenigsten.

In Abbildung 21 war bereits zu sehen, dass die Betragsfrequenzgänge der einzelnen Lautsprecher auch bei Messungen im bedämpften Raum untereinander um bis zu 6 dB schwanken. Die den Messlautsprechern verbauten Breitband-Chassis weisen also eine hohe Streuung untereinander auf, was die Schwankung der Betragsfrequenzgänge in Abbildung 27 weiter verstärkt.

Zusätzlich ist für dieses Verhalten auch noch das verwendete Messmikrofon verantwortlich. In Abbildung 26 links ist zu sehen wie die Frequenzgänge bei Montage des Messbogens an der Grenzfläche gemessen werden. Ein Druckempfänger wird so in die Grenzfläche eingebaut, dass die Membran parallel dazu liegt. Als „Adapter“ für diesen Einbau wird eine Plastikplatte mit ca. 15 cm Durchmesser verwendet.

Die Richtcharakteristik eines solchen Druckempfängers ist nur bis ca. 1 kHz kugelförmig, für höhere Frequenzen kommt es zur Ausbildung einer Richtwirkung [Sch08]. Diese Richtwirkung ist abhängig vom Schalleinfallswinkel und wird durch den sogenannten Druckstau an der Mikrofonmembran verursacht. Hohe Frequenzen werden beim Eintreffen an der Mikrofonmembran in alle Richtungen reflektiert bzw. gestreut, wodurch es zu Interferenz mit den einfallenden Schallwellen kommt. Das Schallfeld vor der Mikrofonmembran wird demnach gestört, der vom Mikrofon erfasste Schalldruck ist von den Interferenzen abhängig [Gra07]. Tiefe Frequenzen sind vom Druckstau nicht betroffen, da sie um das Mikrofon herum gebeugt werden. Durch den Einbau eines Druckempfängers in eine Grenzfläche werden diese Beugung sowie die Störung des Schallfeldes durch das Mikrofon unterbunden, man erhält eine gleichmäßige Halbkugelcharakteristik über den gesamten Frequenzbereich. In [Mül90] wird durch Berechnungen und Messungen gezeigt, dass die Form der Grenzfläche entscheidend für die Richtcharakteristik eines solchen Grenzflächenmikrofones ist. Vermessen wird unter anderem auch die Richtcharakteristik eines Grenzflächenmikrofons an einer kreisförmigen Scheibe mit 11 cm Durchmesser - Abbildung 28 zeigt die gemessene Richtcharakteristik. Es zeigt sich, dass die Richtcharakteristik für Frequenzen $f > 2 \text{ kHz}$ nicht mehr halbkugelförmig ist.

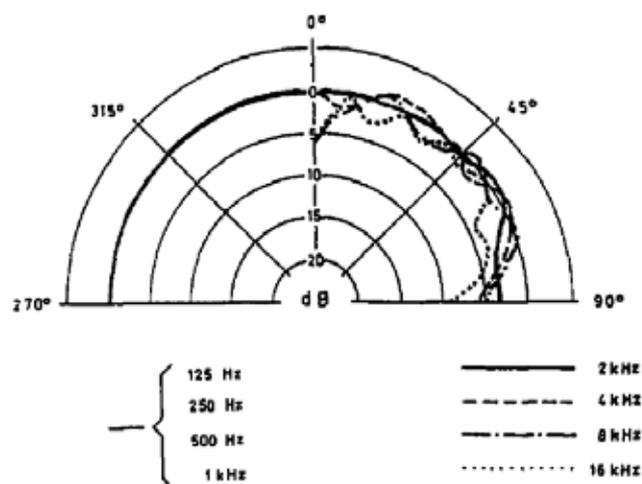


Abbildung 28: Richtcharakteristik eines Druckempfängers an einer Scheibe mit 11,5 cm Durchmesser [Mül90]

In [Mül90] wird diese Verzerrung der Richtcharakteristik auf Beugungseffekte an den Kanten der Grenzfläche zurückgeführt. Für die Grenzfläche mit ca. 15 cm Durchmesser, an welcher die in Abbildung 27 gezeigten Betragsfrequenzgänge gemessen werden, sind ähnliche Effekte zu erwarten. Die Empfindlichkeit des an der Grenzfläche befindlichen Messmikrofones

ist also abhängig vom Schalleinfallswinkel – die Messungen der Lautsprecher aus unterschiedlichen Winkeln werden somit für hohe Frequenzen zusätzlich verfälscht.

Die in Abbildung 27 zu erkennenden Kammfiltereffekte treten im PKW nur dann auf, wenn die Grenzfläche, an der das Mikrofonarray vermessen wird, parallel zur Gehäusefront der Messlautsprecher liegt. Also nur bei Messpositionen bei denen der Messbogen normal zum Dachhimmel oder Fensterscheibe steht. Dies ist nur bei einem der vielen Elevationswinkel, in die der Messbogen bei einer Messung im PKW gebracht wird, der Fall. Bei allen anderen Positionen sind die durch Reflexionen hervorgerufenen Kammfiltereffekte weit weniger bis gar nicht ausgeprägt.

Immer vorhanden sind jedoch Reflexionen, welche zwischen den verschiedenen Messlautsprechern auftreten. Die in Abbildung 29 dargestellten Reflexionspfade haben, ebenso wie eine Reflexion zwischen Grenzfläche und Messlautsprecher, einen Kammfilter zufolge. Da diese Reflexionspfade kürzer sind als jene zwischen Grenzfläche und Messlautsprecher, kommt es zu Verzögerungen von weniger als 1 ms gegenüber dem Direktschall und somit zu Kammfiltereffekten ab höheren Frequenzen.

Um nur diese bei jeder Winkelstellung vorkommenden Kammfilter bei der Entzerrung der Impulsantworten zu berücksichtigen, werden die Messlautsprecher am Messbogen montiert. Bei der Entzerrkurvenmessung wird der Messbogen aber nicht an einer Grenzfläche befestigt, sondern im bedämpften Messraum aufgehängt.

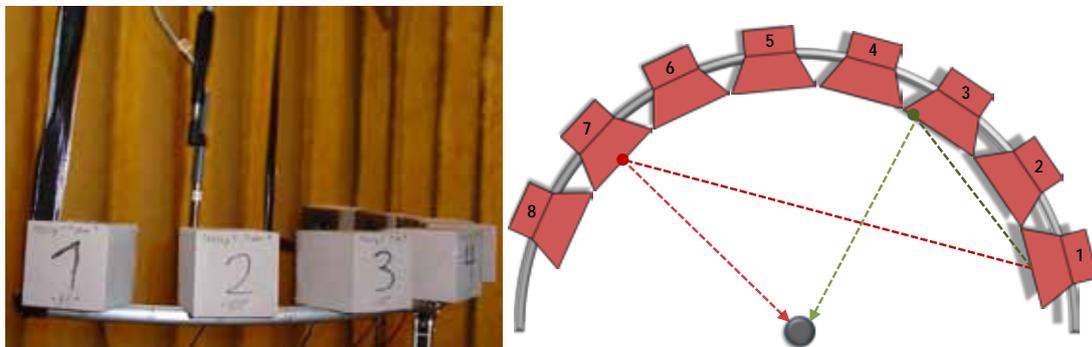


Abbildung 29: Entzerrkurvenmessung „schwebend“ im Messraum und mögliche Reflexionspfade

Mit diesen gemessenen Frequenzgängen können die gemessenen Impulsantworten je nach für die Messung verwendeter Messbox individuell entzerrt werden. Um extreme Verstärkungen in den Bereichen zu vermeiden, welche außerhalb der Grenzfrequenzen der Messlautsprecher liegen, wurden die Impulsantworten nur im Bereich zwischen 150 Hz und 15 kHz entzerrt. Abbildung 30 zeigt die resultierenden Entzerrkurven für alle 8 Messlautsprecher.

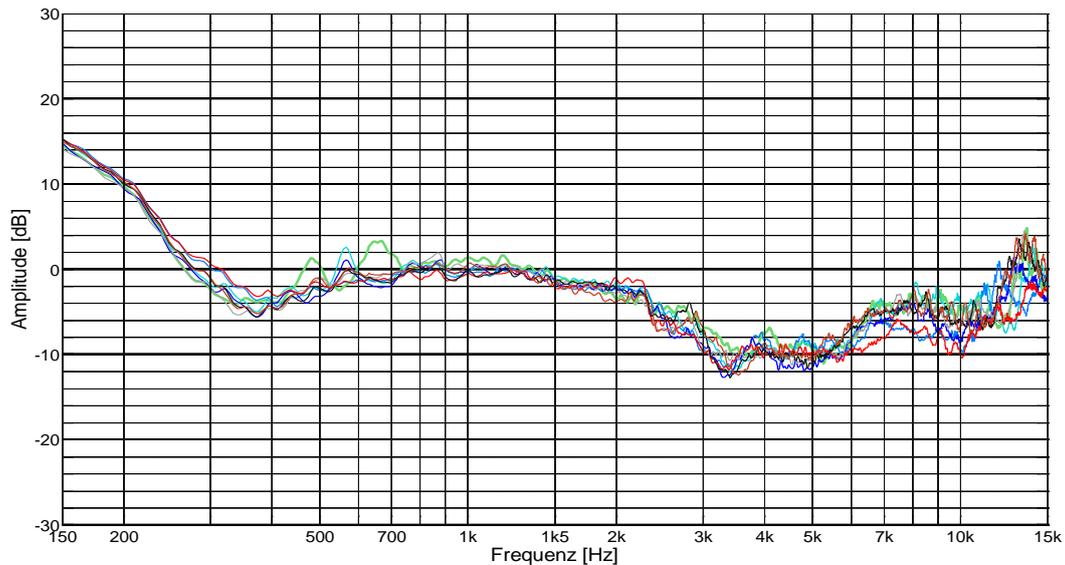


Abbildung 30: Entzerrkurven für die 8 Messlautsprecher im Bereich von 150 Hz bis 15 kHz

2.4.2 Messsignal - Sweep

Für die Messungen der Impulsantworten wird ein Sinussweep von 20 Hz bis 22 kHz verwendet. Wie in Abschnitt 2.2.4 gezeigt wurde, besitzen die verwendeten Messlautsprecher einen Pegelabfall ab ca. 300 Hz – bei 200 Hz ist der Schalldruck bereits um 10 dB geringer als bei 1 kHz (vgl. Abbildung 21). Die für das Beamforming des Mikrofonarrays verwendeten Mikrofonkapseln sind für Sprachsignale optimiert und haben bei 200 Hz ebenfalls eine um 10 dB geringere Empfindlichkeit als bei 1 kHz (vgl. Abbildung 3). Dieser Pegelabfall des Messsystems zu tiefen Frequenzen bewirkt eine Verschlechterung der *SNR* bei der Messung. Um den Signal-Störabstand auch bis zur unteren Grenzfrequenz des betrachteten Frequenzbereichs möglichst konstant zu halten, ist es sinnvoll ein Messsignal zu verwenden welches diesen Pegelabfall kompensiert.

In [Mül01] wird eine Methode vorgestellt, welche es möglich macht einen Sinussweep im Frequenzbereich zu generieren welcher einen vorgegebenen Amplitudenverlauf besitzt. Dies geschieht durch eine Manipulation der Gruppenlaufzeit, welche bei einem Sweep genaue Auskunft darüber erteilt, zu welcher Zeit gerade welche Frequenz durchfahren wird [Mül08]. Verbringt der Sweep längere Zeit in einem Frequenzabschnitt, bedeutet das eine Erhöhung der Energie für diesen Bereich. Der Pegel des Zeitsignals wird dabei nicht verändert, wodurch es auch nicht zu Übersteuerungen kommen kann.

Für den für die Messung im der Impulsantworten im PKW verwendeten Sinussweep wurde ein Amplitudenverlauf vorgegeben, welcher von 400 Hz bis 100 Hz eine Steigung mit 30 dB pro Dekade aufweist, bei noch tieferen Frequenzen beträgt die Verstärkung konstant 20 dB. Abbildung 31 zeigt den resultierenden Energieverlauf des Messsignals.

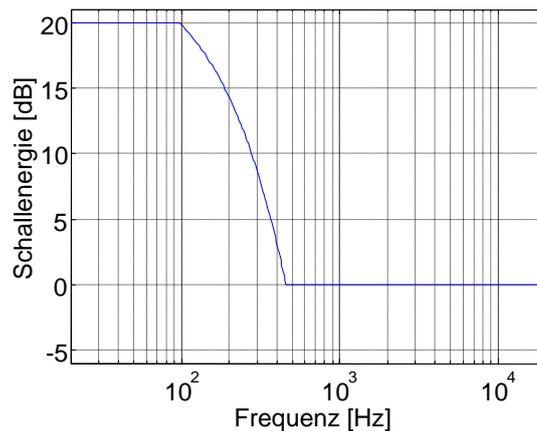


Abbildung 31: Amplitudenverlauf und Zeitsignal verwendeten Sinussweeps

2.5 Fahrgeräuschaufzeichnung

Da die Qualität der Sprachübertragung mit ein Mikrofon auch stark von etwaigen Störgeräuschen abhängt, wird das Fahrgeräusch im Inneren eines fahrenden PKW für eine für spätere Betrachtungen aufgezeichnet. Die Aufnahmen des Fahrgeräusches erfolgen bei den vier Geschwindigkeiten 50, 70, 100 und 130 km/h auf der Freilandstraße bzw. der Autobahn. Die Aufzeichnung über eine Dauer von mindestens 30 Sekunden erfolgt mit dem Mikrofonarray an den Positionen *Dachbedieneinheit* und *Handgriff Fahrer*. Die Messungen werden bei gutem Wetter ohne Regen oder nasser Fahrbahn durchgeführt. Weiters wird darauf geachtet dass während der Messung keine zufälligen Störgeräusche wie überholende Autos oder Hupsignale mit aufgenommen werden.

3 AUSWERTUNG DER MESSDATEN

Insgesamt werden im Rahmen der Arbeit 3 Arten von Messungen durchgeführt:

- Messung eines 3D-Polardiagrammes des Mikrofonarrays im PKW
- Aufzeichnung des Fahrgeräusches bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten mit dem Mikrofonarray
- Aufzeichnung von Impulsantworten mit einem Kunstkopf als Quelle an potentiellen Fahrer- und Beifahrerposition.

In diesem Kapitel wird die Auswertung der Messdaten beschrieben. Die verschiedenen Methoden der Auswertung betrachten das Mikrofonverhalten an der Grenzfläche im PKW, die Beschaffenheit des zu Fahrgeräusches und die Akustik im Inneren eines PKW.

3.1 Mikrofonverhalten

In diesem Abschnitt werden die Messungen, welche mit dem Messbogen durchgeführt werden, ausgewertet.

3.1.1 3D-Polardiagramme

Polardiagramme allgemein

Die aus der Messung des Mikrofonarrays im PKW gewonnenen Messdaten werden für die Darstellung eines 3D-Polardiagrammes verwendet. Der Pegel der gemessenen Impulsantwort zwischen einem am Messbogen montiertem Lautsprecher und dem Mikrofonarray ist dabei der Empfindlichkeit einer mit dem Mikrofonarray synthetisierten Richtcharakteristik für die jeweilige Richtung proportional.

Wird die Impulsantwort mittels diskreter Fourier Transformation (DFT) in den Frequenzbereich transformiert, kann zudem die Empfindlichkeit für bestimmte Frequenzen oder, durch Mittelwertbildung der Empfindlichkeit über mehrere Frequenzbins, für ein Frequenzband bestimmt werden.

Für die Darstellung eines 3D-Polardiagrammes wird ein Kugelkoordinatensystem verwendet, wobei der Radius der Empfindlichkeit in dB für die jeweilige Einfallsrichtung entspricht. Angezeigt wird ein Bereich von 0 bis -30 dB, die einzelnen Empfindlichkeiten werden üblicherweise auf die maximale Empfindlichkeit normiert und in dB umgerechnet. Erfolgt die Normierung auf das Maximum des betrachteten Frequenzbereichs, kann keine Aussage über die Empfindlichkeit relativ zu anderen Frequenzen getroffen werden. Es ist daher bei einer Betrachtung des Richtverhaltens im Frequenzbereich üblich, auf die maximale Empfindlichkeit bei 1 kHz zu normieren. Wird im Freifeld bei 200 Hz eine Empfindlichkeit von -15 dB auf der Hautachse des Mikrofons gemessen, bedeutet das dann das das Mikrophon für Schalleinfall von Vorne bei 200 Hz um 15 dB weniger Empfindlich ist als bei 1 kHz. Zum Ablesen der Empfindlichkeit ist eine Skala eingezeichnet, wobei der äußerste Kreis die 0 dB Linie darstellt, jeder weitere Kreis nach innen bedeutet eine Schrittweite von -10 dB.

Typische Richtcharakteristika erster Ordnung sind symmetrisch um ihre Hauptachse, weshalb es im Freifeld ausreichend ist nur ein 2D-Polardiagramm zu messen. Hierfür erfolgt die Messung der Mikrofonempfindlichkeit auf einer Kreisebene durch die Hauptachse des Mikrofons, wobei das akustische Zentrum des Mikrofons (im Normalfall die Einsprechöffnung) in der Mitte dieser Kreisebene liegt. Im Innenraum eines PKW ist eine solche Messung aufgrund von begrenzender Flächen wie Windschutzscheibe und Seitenscheibe nicht möglich.

Desweiteren kann aufgrund von Reflexionen und daraus resultierender Kammfiltereffekte nicht von einer rotationssymmetrischen Richtcharakteristik ausgegangen werden.

Daher wird auf der durch Grenzflächen limitierten Teilkugelfläche um das Mikrofonarray ein begrenztes 3D-Polardiagramm gemessen.

3D-Polardiagramme im akustisch bedämpften Messraum

Das verwendete Mikrofonarray ist wie in Kapitel 2.1 beschrieben ein Grenzflächenmikrofonarray. Für Grenzflächenmikrofone wird üblicherweise eine Druckempfängerkapsel bündig in eine große ebene Fläche eingebaut, als Richtcharakteristik ergibt sich zumindest für Frequenzen bis 1 kHz eine Halbkugel (vgl. Kapitel 2.4.1).

Bei dem verwendeten Mikrofonarray kommen neben einer Kugelkapsel auch 3 Druckdifferenzempfänger mit Nierencharakteristik zum Einsatz. Um den Einfluss auf die Richtcharakteristik eines Mikrofons mit Nierencharakteristik durch die Anbringung an einer Grenzfläche festzustellen, erfolgt eine Messung des Mikrofonarrays im bedämpften Messraum. Als Grenzfläche wird eine ca. 10x10 cm große Metallplatte verwendet, wie in Abbildung 32 zu sehen. Da die Messungen im bedämpften Messraum in der gleichen Konfiguration wie bei der Messung im PKW an der Messposition Dachbedieneinheit stattfinden, wird in der Elevation nur ein Winkelbereich von 10° bis 130° Grad erfasst.



Abbildung 32: Vermessung des Mikrofonarrays im Messraum mit identer Konfiguration wie im PKW

Abbildung 33 zeigt das Polardiagramm für die Nierenkapsel *Mic1* (vgl. 2.1.1) in Oktavbändern. Die Kapsel weist bei dieser Messung an der Grenzfläche eine Richtcharakteristik auf, welche nicht einer idealen, halben Niere entspricht. Stattdessen bildet sich speziell für hohe Frequenzen eine Keule in Richtung eines Elevationswinkels von ca. 70° aus⁹. Die Hauptachse des Mikrofones, also die Richtung der maximalen Empfindlichkeit im Freifeld, ist als rote Linie eingezeichnet.

⁹ Das Mikrofonarray wurde im Messraum am Boden liegend vermessen, zur besseren Vergleichbarkeit wird es allerdings so dargestellt wie es sich im PKW montiert befinden würde.

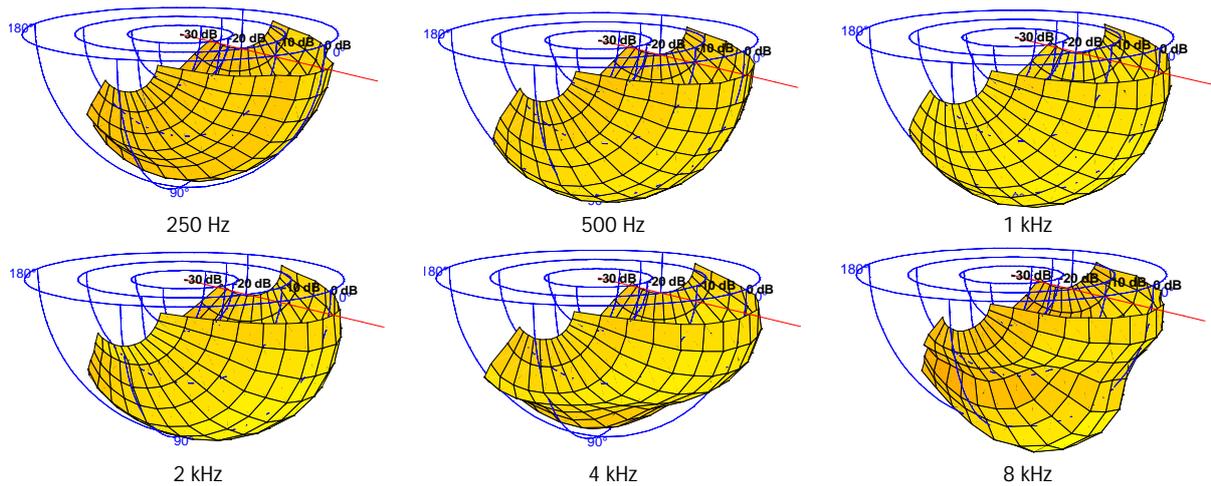


Abbildung 33: 3D-Polardiagramm des Druckdifferenzempfängers Mic1 im Mikrofonarray

Der bei dieser Messung abgetastete Bereich, umfasst fast ausschließlich den vorderen Teil der Richtcharakteristik. Um auch die Empfindlichkeit eines an der Grenzfläche angebrachten Nierenmikrofones für rückwärtigen Schalleinfall zu betrachten, zeigt Abbildung 34 das Polardiagramm des Druckdifferenzempfängers *Mic2* in der Draufsicht. Zur besseren Orientierung ist eine ideale Nierencharakteristik als rote Hilfslinie eingezeichnet, welche die gleiche Ausrichtung wie *Mic2* besitzt. Da *Mic2* gegenüber *Mic1* um 120° gedreht ausgerichtet ist (vgl. Abbildung 2), liegt die Löschrichtung im erfassten Messbereich. Man sieht dass die maximale Dämpfung für rückwertigen Schalleinfall bei 2 kHz erreicht wird und fast 20 dB beträgt. Für hohe Frequenzen wird diese Löschung zunehmend schlechter und auch hier bildet sich wiederum einer Keule in Richtung der Hautachse.

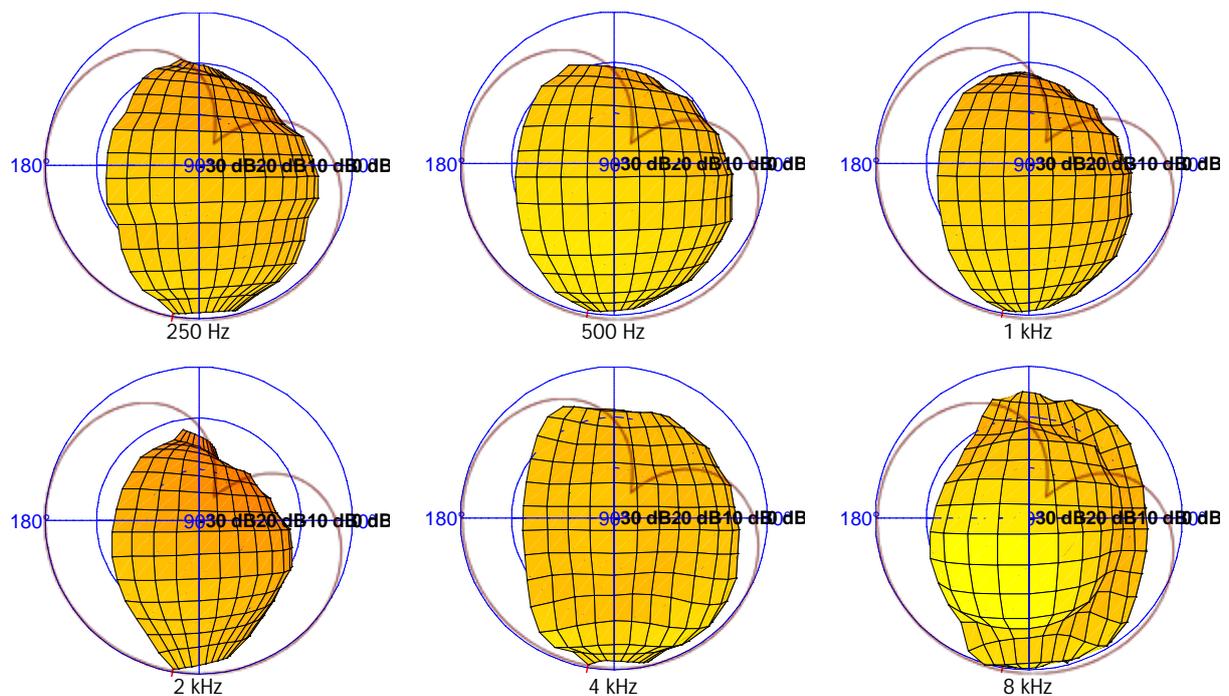


Abbildung 34: 3D-Polardiagramm des Druckdifferenzempfängers Mic2 in der Draufsicht

3D-Polardiagramme im PKW

Wie eingangs erwähnt, wurde im stark bedämpften Messraum mit der gleichen Konfiguration wie im PKW an der Mikrofonposition *Dachbedieneinheit* gemessen, weshalb ein Vergleich der 3D-Polardiagramme von *Mic1* und *Mic2* im Messraum und im PKW erfolgen kann. Abbildung 35 zeigt das Polardiagramm der Mikrofonkapsel *Mic1* im Mikrofonarray für die gleichen Oktavbänder wie in Abbildung 33.

Vergleicht man die beiden Richtcharakteristika erkennt man, dass *Mic1* im PKW in den Oktavbändern um 2 und 4 kHz weniger empfindlich für Schalleinfall normal auf die Grenzfläche ist. Es scheint in diesen Frequenzbereichen zu Auslöschungen durch Reflexionen zu kommen.

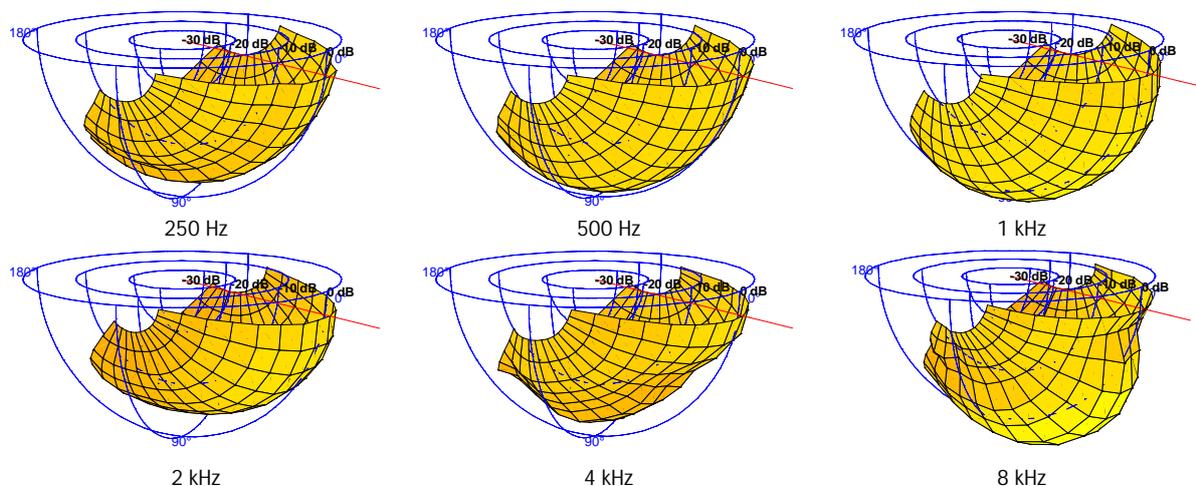


Abbildung 35: 3D-Polardiagramm des Druckdifferenzempfängers *Mic1* im PKW

Um die Dämpfung aus der Lösrichtung zwischen einem Mikrofon im Messraum und im PKW Innenraum visuell zu bewerten, zeigt Abbildung 36 das 3D-Polardiagramm von *Mic2* im PKW in der Draufsicht. Beim Vergleich mit Abbildung 34 zeigt sich das die Dämpfung für rückwertigen Schalleinfall generell geringer ist als bei Messungen im bedämpften Raum, die Dämpfung erreicht maximal 10 dB. Der Grund hierfür ist, dass selbst bei einer Beschallung des Mikrofons von hinten Reflexionen über Umwege zur Vorderseite des Mikrofons gelangen und somit einen höheren Ausgangspegel bewirken.

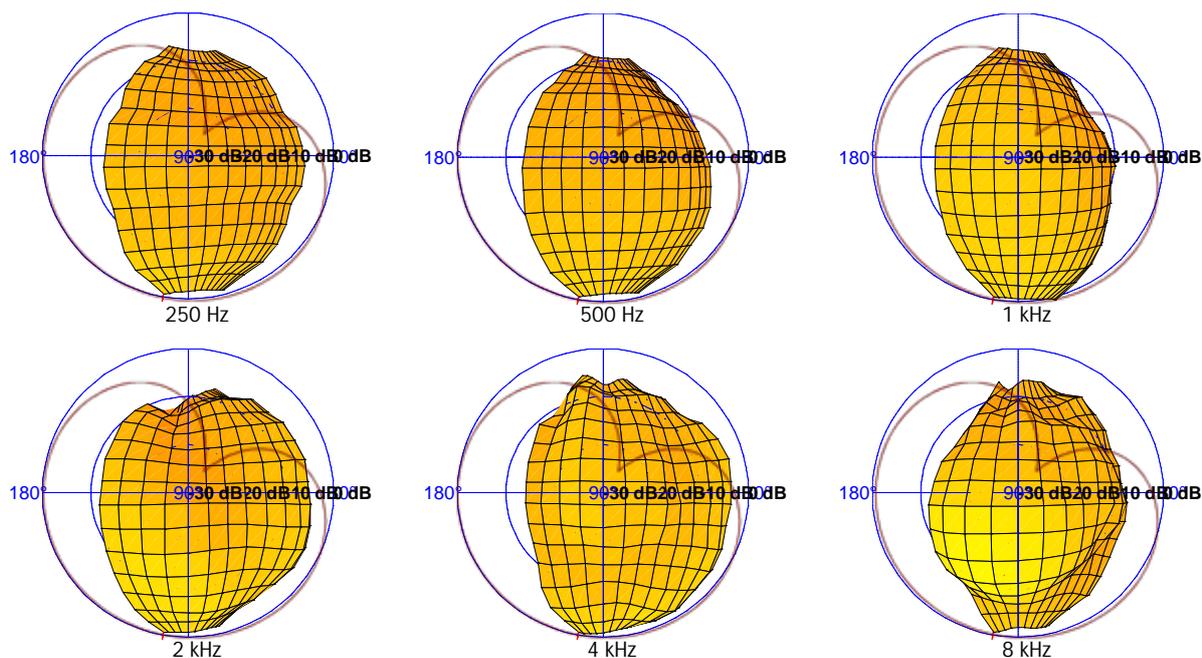


Abbildung 36: 3D-Polardiagramm des Druckdifferenzempfängers Mic2 im PKW in der Draufsicht

Im Anhang IV sind die 3D-Polardiagramme der Mikrofonarray-Kapseln *Mic1* und *Mic2* für die Position *Handgriff Fahrer* im PKW für Terzbänder abgebildet. In Abbildung 69 zeigt sich Unempfindlichkeit des Mikrofons für Schalleinfall von unten in einem Bereich von 400 Hz bis 1 kHz, darüber bildet sich wie für die Position *Dachbedieneinheit* eine Keule nach unten aus.

In der Draufsicht auf das 3D-Polardiagramm von *Mic2* in Abbildung 70 (das Mikrofon zeigt hier in Richtung Seitenscheibe) erkennt man dass die Dämpfung für rückwärtigen Schalleinfall bei ca. 1 kHz fast 20 dB beträgt, was eine Verbesserung um 10 dB gegenüber der Position *Dachbedieneinheit* bedeutet. Durch die Position des Mikrofons an einer Raumkante, kann bei einer Beschallung von hinten kein Schall über Reflexionspfade in die Einsprechrichtung gelangen, weshalb die Löschung in etwa so gut ist wie im Messraum. Für hohe Frequenzen wird die Löschung zunehmend schlechter, im 10 kHz Band wird die Nierenkapsel einer kugelförmigen Richtcharakteristik immer ähnlicher.

3.1.2 Bündelungsmaß und Direktivitätsmaß

Einer der wichtigsten Parameter für akustische Wandler ist der Bündelungsgrad oder seine logarithmische Form, das Bündelungsmaß.

Bündelungsmaß allgemein

In [Sch08] wird der Bündelungsgrad γ definiert als das quadrierte Verhältnis zwischen Freifeld-Übertragungsfaktor M_0 und Diffusfeld-Übertragungsfaktor M_{Diff} .

$$\gamma = \left(\frac{M_0}{M_{Diff}} \right)^2 \quad (3.1)$$

Für das Bündelungsmaß Γ ergibt sich dann folglich

$$\Gamma = 10 \log \gamma = 10 \log \left(\frac{M_0}{M_{Diff}} \right)^2. \quad (3.2)$$

Speziell der Diffusfeld-Übertragungsfaktor kann nicht ohne weiteres bestimmt werden, es wäre hierzu eine Hallkammer notwendig. In der Praxis wird γ deswegen aus Messungen des Richtungsfaktors bestimmt.

In einem Kugel-Koordinatensystem mit φ als Azimut und θ als Elevation gibt der Richtungsfaktor das Verhältnis zwischen Mikrofonempfindlichkeit aus beliebiger Richtung und Mikrofonempfindlichkeit auf der Hauptachse an.

$$s(\varphi, \theta) = \left(\frac{M(\varphi, \theta)}{M(0^\circ, 0^\circ)} \right) \quad (3.3)$$

Für Berechnung des Bündelungsgrades wird der Richtungsfaktor quadriert, über alle Winkel integriert und auf eine vollständige Kugelfläche bezogen. Bei der Integration wird der Richtungsfaktor noch mit dem Kugelflächenelement dS (3.5) gewichtet.

$$\gamma = \frac{4\pi r^2}{\oint_S s^2(\varphi, \theta) dS} \quad (3.4)$$

mit

$$dS = r^2 \cdot \sin \varphi d\varphi d\theta. \quad (3.5)$$

Ist die Richtcharakteristik um $\varphi = 0^\circ$ rotationssymmetrisch, vereinfacht sich die Gleichung zu

$$\gamma = \frac{4\pi r^2}{\int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} s^2(\varphi, \theta) \cdot r^2 \cdot \sin \varphi d\theta d\varphi} = \frac{2}{\int_0^{2\pi} s^2(\varphi) \cdot \sin \varphi d\varphi}. \quad (3.6)$$

In der Praxis hat man nur eine endliche Anzahl m von gemessenen Richtungsfaktoren $s(\varphi_j)$ zur Verfügung, welche meist mit einem Drehstativ in konstanten Winkelschritten $\Delta\varphi = \frac{\pi}{m}$ gemessen werden. Folglich muss man das Integral durch numerische Approximation bestimmen. Somit wird Gleichung (3.6) zu

$$\gamma = \frac{2}{\frac{\pi}{m} \sum_{j=1}^m s^2(\varphi_j) \cdot \sin \varphi_j}. \quad (3.7)$$

Tabelle 3-1 zeigt die Bündelungsgrade und Bündelungsmaße für die wichtigsten rotationssymmetrischen Richtcharakteristiken erster Ordnung.

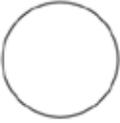
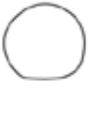
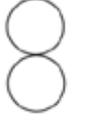
Charakteristik	Kugel	Breite Niere (typ.)	Niere	Superniere	Hyperniere	Acht
Bild $ s(\varphi) $						
Bündelungsgrad DF = γ	1	1,89	3	3,73	4	3
Bündelungsmaß DI = Γ [dB]	0	2,5	4,8	5,7	6	4,8

Tabelle 3–1: Bündelungsgrad und Maß für Verschiedene Richtcharakteristika erster Ordnung [Sch08]

Ist die Richtcharakteristik nicht rotationssymmetrisch muss der Richtungsfaktor $s(\varphi, \theta)$ für eine ganze Kugelfläche bestimmt werden. Für Messungen wie sie im Rahmen dieser Arbeit stattfinden, ist eine solche Abtastung nicht möglich (vgl. Kapitel 2.2.1). Bei einer Abtastung der ganzen Kugelfläche gibt es nur eine endliche Anzahl von Messpunkten und somit gemessenen Richtungsfaktoren $s(\varphi_j, \theta_i)$, was wie in (3.7) zu einer numerischen Integration führt. Setzt man Gleichung (3.5) in (3.4) ein, soll gelten

$$\gamma = \frac{4\pi r^2}{\int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} s^2(\varphi, \theta) \cdot r^2 \cdot \sin \varphi \, d\theta \, d\varphi} = \frac{4\pi r^2}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n w_i s^2(\varphi_j, \theta_i)}. \quad (3.8)$$

Ob eine solche exakte Lösung erreicht wird, hängt von der Wahl der Gewichte w_j ab. In der Literatur findet man zwei Möglichkeiten zur Berechnung der Gewichte. In [Wil73] werden die Gewichte geometrisch als Flächen, die die Messpunkte umgeben, berechnet. Diese Flächengewichte verhalten sich umgekehrt proportional zur Messpunktdichte. An den Polkappen, wo die Messpunkte dichter beisammen liegen, sind die umgebenden Flächen kleiner, ebenso die Gewichte dieser Messwerte. Am Äquator, wo die Messpunktdichte geringer ist, sind die Gewichte größer.

Für die geometrische Berechnung der Flächengewichte teilt man eine Kugelfläche in Mantelringe, wobei sich die Grenzen der Mantelringe zwischen zwei auf einem Meridian liegenden Messpunkten befinden. Diese Mantelringe werden anschließend durch die Anzahl der gemessenen Azimut-Winkel geteilt und man erhält somit das Flächengewicht für einen bestimmten Elevations-Winkel. Dieser Vorgang ist graphisch in Abbildung 37 dargestellt.

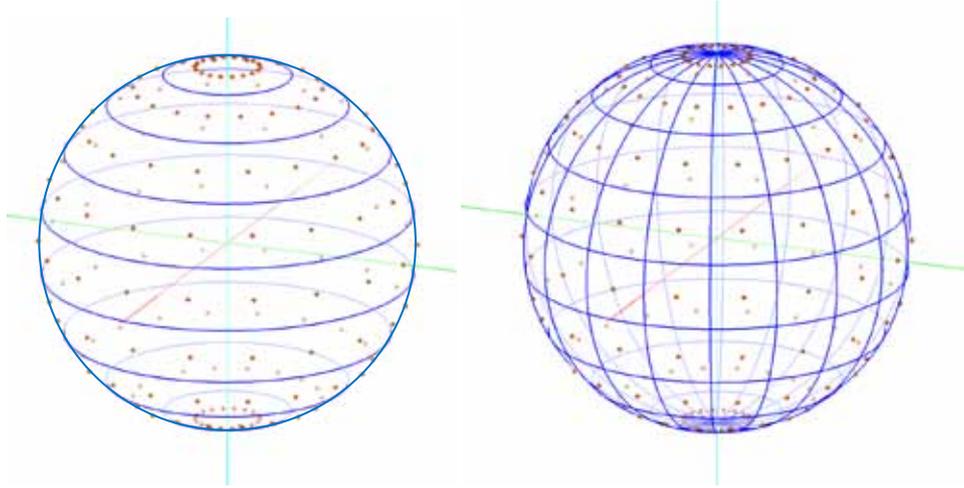


Abbildung 37: Berechnung der Flächengewichte (rechts) aus Mantelringen (links)

In [Ger751] werden diese Flächengewichte zwar als gute Näherung, jedoch nicht als exakte Lösungen beschrieben. Eine Möglichkeit Gleichung (3.8) exakt zu lösen ist die Berechnung von Quadratur-Gewichten. Diese können für gewisse Abtastkonfigurationen berechnet werden und stellen eine exakte Lösung dar [Atk80]. Die Abtastung muss dafür so gewählt werden dass die Elevations-Winkel θ_i und die Azimut-Winkel φ_j in regelmäßigen Abständen zwischen 0 und π bzw. 2π liegen. Bei symmetrischer Verteilung der Messwerte zum Äquator gilt [Sne94]

$$\sum_{i=1}^{L+1} \frac{1}{2} (2 - \delta_{L+1,i}) w_i \cos 2n\theta_i = \frac{-1}{4n^2 - 1} \quad n = 0, 1, \dots, L \quad (3.9)$$

wobei $\delta_{L+1,i}$ das Kronecker Delta ist. Das Kronecker Delta ist wie folgt definiert:

$$\delta_{x,y} = \begin{cases} 1 \forall x = y \\ 0 \forall x \neq y \end{cases} \quad (3.10)$$

In Matrixschreibweise ist diese Gleichung in (3.11) zu sehen.

$$\begin{pmatrix} 1 & \dots & 1 & 1 \\ \cos 2\theta_1 & \dots & \cos 2\theta_L & \cos 2\theta_{L+1} \\ \cos 4\theta_1 & \dots & \cos 4\theta_L & \cos 4\theta_{L+1} \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ \cos 2L\theta_1 & \dots & \cos 2L\theta_L & \cos 2L\theta_{L+1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_L \\ \frac{1}{2}w_{L+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1/3 \\ -1/15 \\ \vdots \\ -1 \\ \frac{-1}{4L^2-1} \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

Vergleicht man die so berechneten Quadraturgewichte mit den Flächengewichten für eine Elevationsauflösung von 10 Grad, sieht man dass sich diese kaum unterscheiden (Abbildung 38). In [Pom08] wurden die Flächengewichte hinsichtlich ihrer Eignung für eine Zerlegung in *Kugelflächenfunktionen* für ausreichend befunden. Für die vorliegende Arbeit werden für alle weiteren Berechnungen deshalb die einfacheren Flächengewichte verwendet.

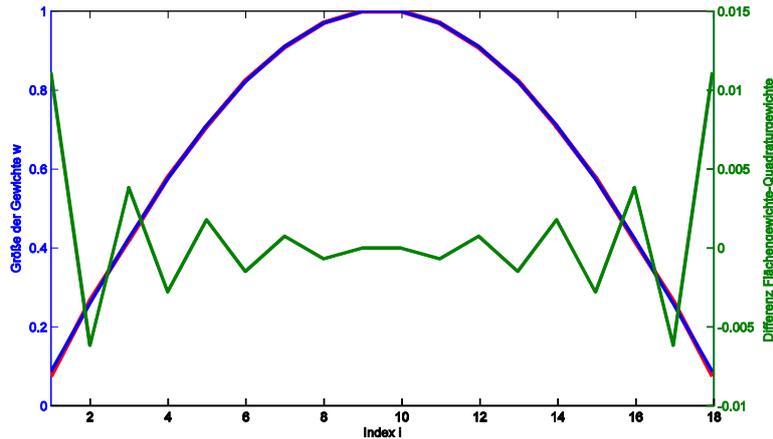


Abbildung 38: Quadraturgewichte (rot) und Flächengewichte (blau) bzw. die Differenz (grün)

Mit dem Wissen über die Gewichte w_i kann man nun mit Gleichung (3.8) bzw. (3.2) das Bündelungsmaß berechnen.

Frequenzabhängiges Bündelungsmaß

Richtcharakteristika von akustischen Wandler-elementen sind frequenzabhängig. Für tiefe Frequenzen wird die Richtcharakteristik meist Breiter, zu hohen Frequenzen hin setzt eine Bündelung ein. Muss man also ein Mikrofon mit dem Parameter Bündelungsmaß bestmöglich beschreiben, wird das Bündelungsmaß über die Frequenz definiert-Erweitert man nun Gleichung (3.8) bzw. (3.2) um die Abhängigkeit von f , erhält man das frequenzabhängige Bündelungsmaß $\Gamma(f)$.

$$\Gamma(f) = 10 \log \gamma(f) = 10 \log \left(\frac{4\pi r^2}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n w_i s^2(\varphi_j, \theta_i, f)} \right) \quad (3.12)$$

Das frequenzabhängige Bündelungsmaß wird im Allgemeinen für hohe Frequenzen größer. So kommt es durch den Druckstau vor der Mikrofonmembran (vgl. Kapitel 2.4.1) auch bei Druckempfängern abhängig vom Membrandurchmesser zu einer Bündelung der Richtcharakteristik und somit zu Bündelungsmaßen $\Gamma(f) > 0$ [Sch08]. Diese frequenzabhängigen Bündelungsmaße werden aber nur dann größer als Null, wenn die Hauptachse in Gleichung (3.3) mit $\vartheta_0, \theta_0 = 0^\circ$ definiert ist, wobei diese Achse normal auf der Mikrofonmembran steht. Abbildung 39 zeigt das von ϑ_0 und f abhängige Polardiagramm eines Kugelmikrofons.

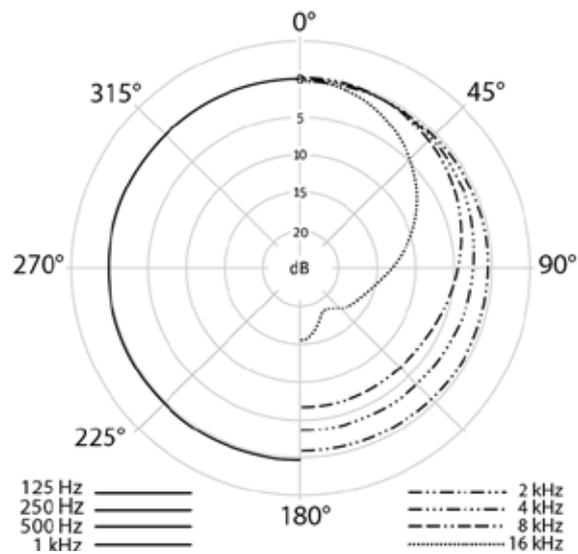


Abbildung 39: Polardiagramm eines Druckempfängers mit 22 mm Membrandurchmesser [Sch08]

Kann bei einer idealen Kugelcharakteristik die Definition der Hauptachse noch beliebig erfolgen, ist diese bei einem realen Kugelmikrofon somit ausschlaggebend für die Berechnung des Bündelungsmaßes. Erfolgt die Definition der Hauptachse z.B. fälschlicher Weise parallel zur Mikrofonmembran mit $\vartheta_0, \theta_0 = 90^\circ$, ist der frequenzabhängige Richtungskfaktor wie folgt beschrieben:

$$s(\varphi, \theta, f) = \left(\frac{M_0(\varphi, \theta, f)}{M_0(90^\circ, 90^\circ, f)} \right). \quad (3.13)$$

Für hohe Frequenzen $f > 10 \text{ kHz}$ ergeben sich somit für Druckempfänger, mit der in Abbildung 39 dargestellten Richtcharakteristik, negative Werte für das Bündelungsmaß. Das Mikrofon ist für die falsch definierte Hauptachse weniger empfindlich als wie in andere Richtungen.

Für die korrekte Berechnung des Bündelungsmaßes muss die Hauptachse also immer in Richtung der maximalen Empfindlichkeit des Mikrofons definiert werden. Bei Messungen im Freifeld ist diese im Allgemeinen für alle Frequenzen gleich und liegt normal auf der Mikrofonmembran.

Richtungsbezogenes Direktivitätsmaß im PKW

Wie bereits in Abschnitt 3.1.1, wird das Array auch im akustisch bedämpften Messraum mit dem Messbogen vermessen – mit identer Abtastung und erfassbarem Winkelbereich wie an der Position *Dachbedieneinheit* im PKW (siehe Abbildung 32).

Abbildung 40 zeigt die strake Frequenzabhängigkeit der Richtcharakteristik des im Array verbauten Druckempfängers als 3D-Polardiagramm¹⁰. Ab ca. 2 kHz erkennt man dass die Richtcharakteristik zunehmend flacher wird, im Bereich von 2.5 kHz bis 4 kHz ist das Mikrofon

¹⁰ Das Mikrofonarray wurde zwar im Messraum am Boden liegend vermessen, zur besseren Vergleichbarkeit wird es allerdings so dargestellt wie es sich im PKW montiert befinden würde.

entlang der Grenzfläche sogar empfindlicher als in Richtung der normal auf der Mikrofonmembran stehenden Hauptachse (rot). Ab 4 kHz kommt es zur Ausbildung einer Keule (vgl. Abbildung 28).

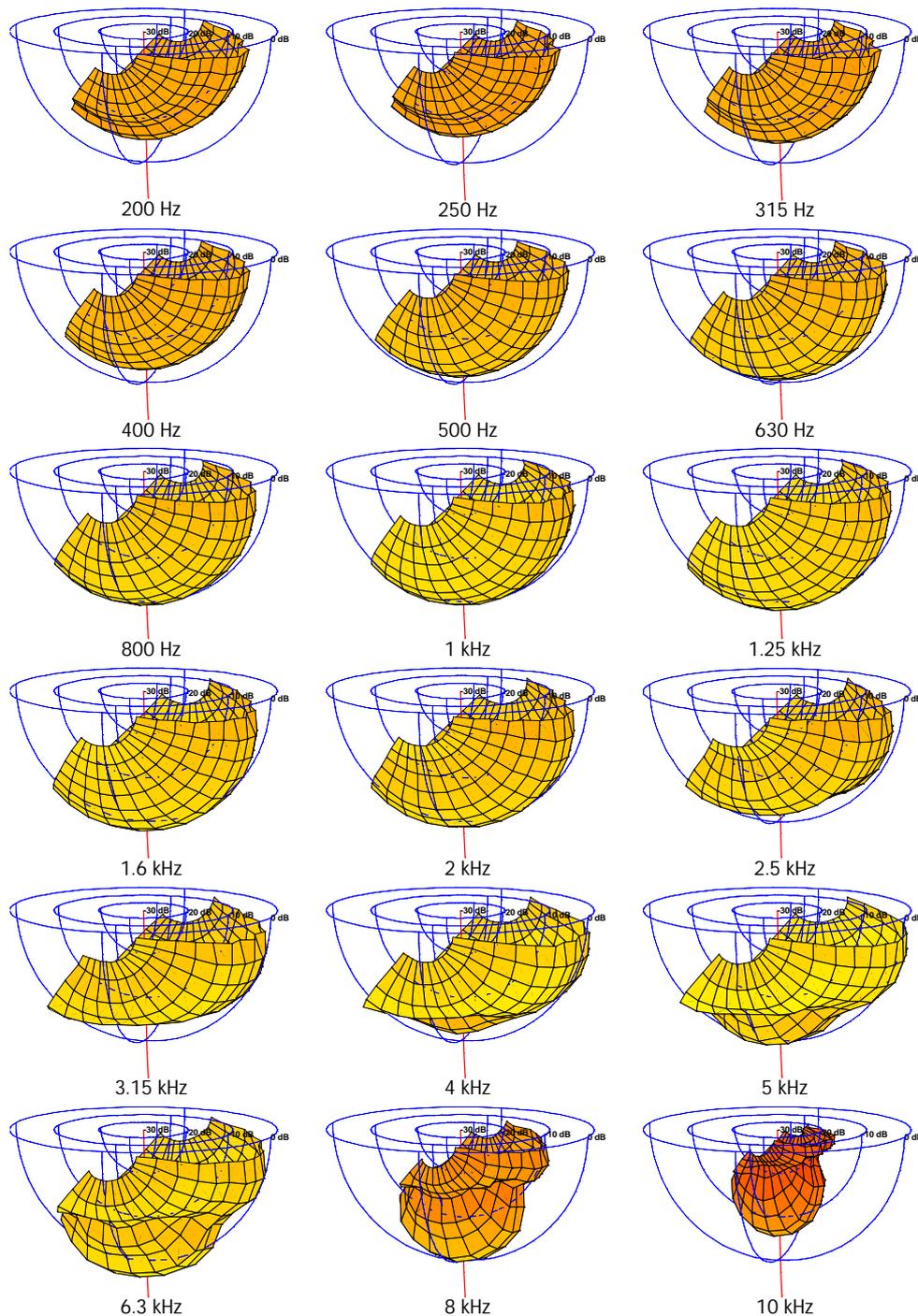


Abbildung 40: Bündelungsverhalten eines Druckempfängers an der Grenzfläche, normiert auf 1 kHz

Bei einer Berechnung des Bündelungsmaß (bezogen auf die Hauptachse) für das Terzband mit 3.15 kHz Mittenfrequenz ergibt sich ein negativer Wert – für eine korrekte Berechnung des Bündelungsmaßes muss für jede Frequenz eine eigene Hauptachse anhand der Richtung der

maximalen Empfindlichkeit festgelegt werden. Da das Bündelungsmaß per Definition positiv ist¹¹, wird eine neue Größe eingeführt: Das richtungsbezogene Direktivitätsmaß $\Gamma_{\varphi_0, \theta_0}$.

Prinzipiell wird das Direktivitätsmaß genauso berechnet wie das Bündelungsmaß, jedoch ist es Abhängig von einer Bezugsrichtung, bestehend aus den Bezugswinkeln φ_0 und θ_0 . Somit wird Gleichung (3.3) zu

$$s_{\varphi_0, \theta_0}(\varphi, \theta) = \left(\frac{M(\varphi, \theta)}{M(\varphi_0, \theta_0)} \right) \quad (3.14)$$

und Gleichung (3.8) zu

$$\gamma_{\varphi_0, \theta_0} = \frac{4\pi r^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_i s_{\varphi_0, \theta_0}^2(\varphi_j, \theta_i)}. \quad (3.15)$$

So wie das Bündelungsmaß ist das Direktivitätsmaß frequenzabhängig, aufgrund der ohnehin vielen Indizes wird aber auf den zusätzlichen Index f verzichtet.

Das Direktivitätsmaß bezieht sich immer auf die Richtung φ_0, θ_0 . Dies macht vor allem als Qualitätsmaß für Messungen Sinn, bei denen es eine definierte Quellposition gibt. Das Bündelungsmaß sagt zwar aus wie gut diffuser Störschall, gegenüber einer Quelle die auf der Hauptachse liegt, unterdrückt wird. Befindet sich die Quelle jedoch nicht auf dieser Achse, kann ein Mikrofon mit hohem Bündelungsmaß mitunter schlechtere Signal-Störabstände bewirken als ein Kugelmikrofon. Das Direktivitätsmaß hingegen gibt an wie gut die Bündelung in eine gewisse Richtung ist – ein negatives Direktivitätsmaß bedeutet, dass der Nutzschall der Quelle gegenüber dem Störschall unterdrückt wird.

Als Beispiel wird ein Mikrofon mit optimaler Supernierencharakteristik angenommen. Vor dem Mikrofon ($\varphi = 0^\circ, \theta = 0^\circ$) und hinter dem Mikrofon ($\varphi = 180^\circ, \theta = 0^\circ$) befindet sich je eine Quelle, in Abbildung 41 durch einen roten und blauen Ball dargestellt. Das Bündelungsmaß für dieses Mikrofon ist aufgrund der Unabhängigkeit von einer Quellposition für beide Quellen $\Gamma = 4,8$ dB.

Das richtungsbezogene Direktivitätsmaß beträgt für die rote Quelle $\Gamma_{0^\circ, 0^\circ} = 4,8$ dB und für die blaue Quelle $\Gamma_{180^\circ, 0^\circ} = -5,6$ dB. Dieser Wert sagt aus, dass Schall von der blauen Quelle schlechter aufgenommen wird als diffus einfallender Schall.

¹¹ Das kleinste mögliche Bündelungsmaß besitzt die Kugelcharakteristik mit $\Gamma = 0$.

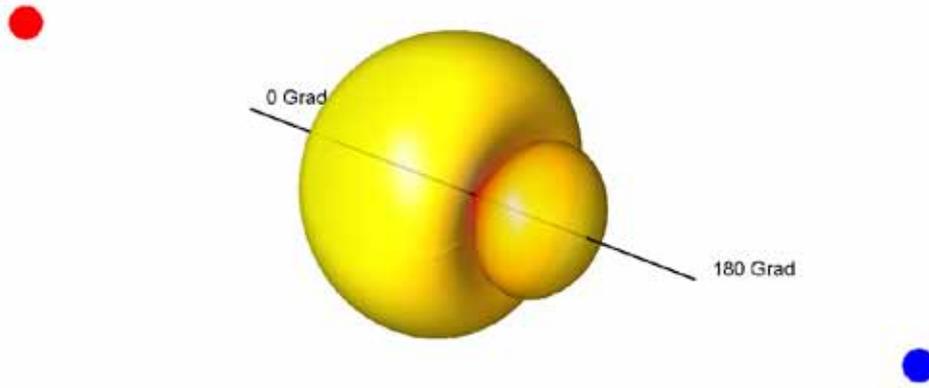


Abbildung 41: Mikrofon mit Supertiercharakteristik und zwei Quellen (rot und blau)

Als Quellposition für die Berechnung des richtungsbezogenen Direktivitätsmaßes im PKW werden potentielle Sprecherpositionen gewählt. Durch die Verwendung des Mikrofonarrays zur Messdatenerfassung kann für die Berechnung ein simuliertes Mikrofon mit einer, in der horizontalen Ebene beliebig ausgerichteten Richtcharakteristik erster Ordnung verwendet simuliert.

Zuvor werden die Mikrofonkapseln des Mikrofonarrays wie schon in Abschnitt 3.1.1 einzeln betrachtet. Das 3D-Polardiagramm des im Mikrofonarray verbauten Druckempfängers wurde bereits in Abbildung 40 dargestellt. Abbildung 42 zeigt nun das Direktivitätsmaß $\Gamma_{0^\circ,90^\circ}$ in Terzbändern, für eine Quelle auf der in Abbildung 40 rot dargestellten Bezugsachse. Es zeigt sich dass das Direktivitätsmaß für einen Bereich von 2.5 kHz bis 4 kHz negativ wird.

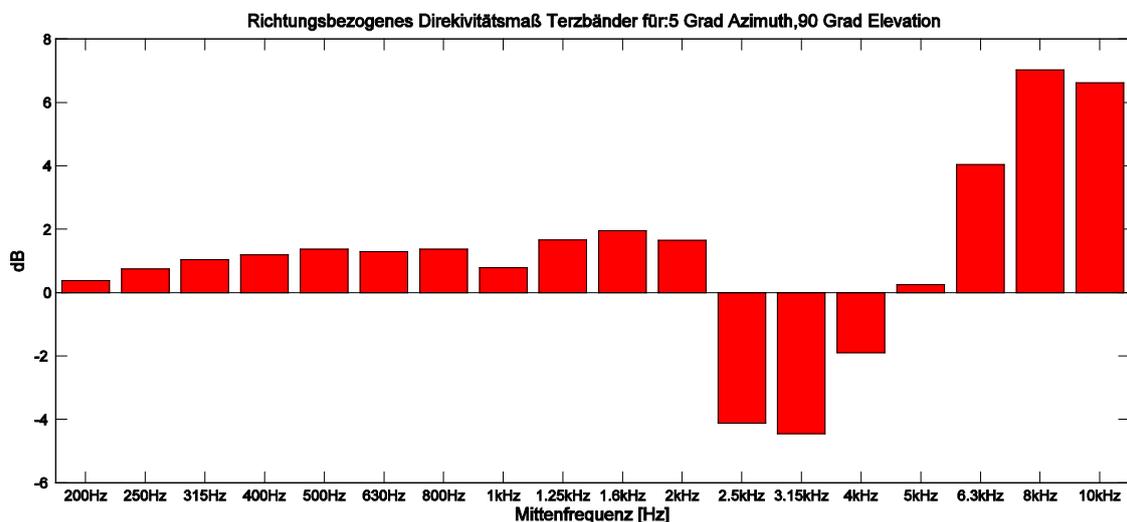


Abbildung 42: Direktivitätsmaß $\Gamma_{5^\circ,90^\circ}$ des Druckempfängers an der Grenzfläche im Messraum

Dieses Ergebnis deckt sich mit den Erkenntnissen welche bei der Betrachtung des 3D-Polardiagrammes gewonnen wurden. Allerdings ist eine Bezugsposition mit $\varphi = 0^\circ, \theta = 90^\circ$, also genau unter der Mikrofonposition *Dachbedieneinheit* im PKW, keine typische Sprecherposition.

In Abbildung 43 ist das richtungsbezogene Direktivitätsmaß $\Gamma_{-55^\circ,40^\circ}$ für Messdaten, welche im PKW an der Mikrofonposition *Dachbedieneinheit* erfasst wurden, dargestellt¹². Die für die Berechnung verwendeten Empfindlichkeiten sind als 3D-Polardiagramme über Oktavbänder gemittelt in Abbildung 44 zu sehen. Die rote Linie stellt die Bezugsrichtung zur Berechnung des Direktivitätsmaßes dar, zeigt also auf die Sprecherposition. Für 1 kHz und 8 kHz zeigt sich eine starke Empfindlichkeit für Schalleinfall von vorne auf das Mikrofonarray, weshalb das Direktivitätsmaß für diese Frequenzbänder entsprechend klein wird.

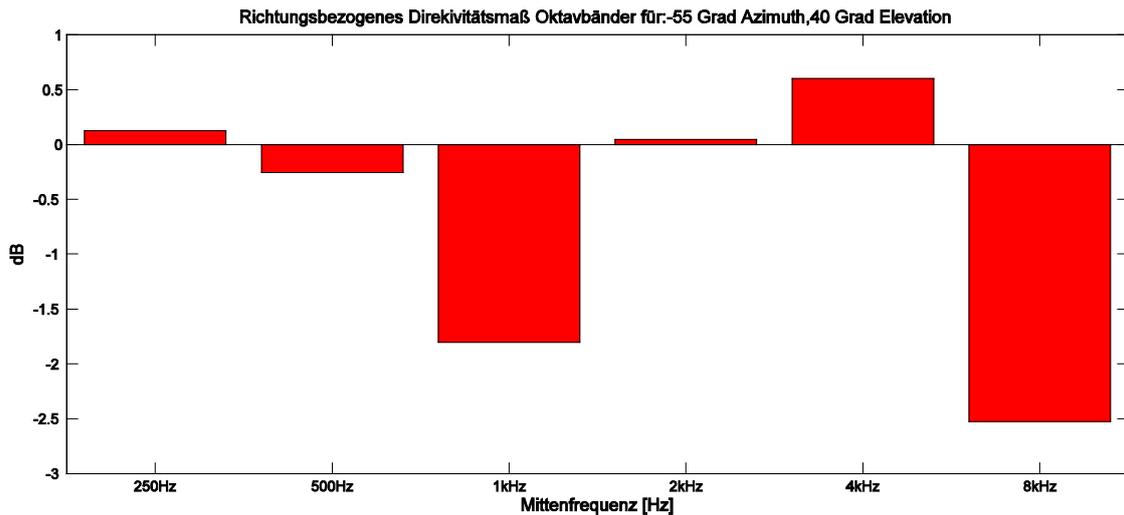


Abbildung 43: Direktivitätsmaß $\Gamma_{-55^\circ,40^\circ}$ des Druckempfängers an der Position *Dachbedieneinheit*

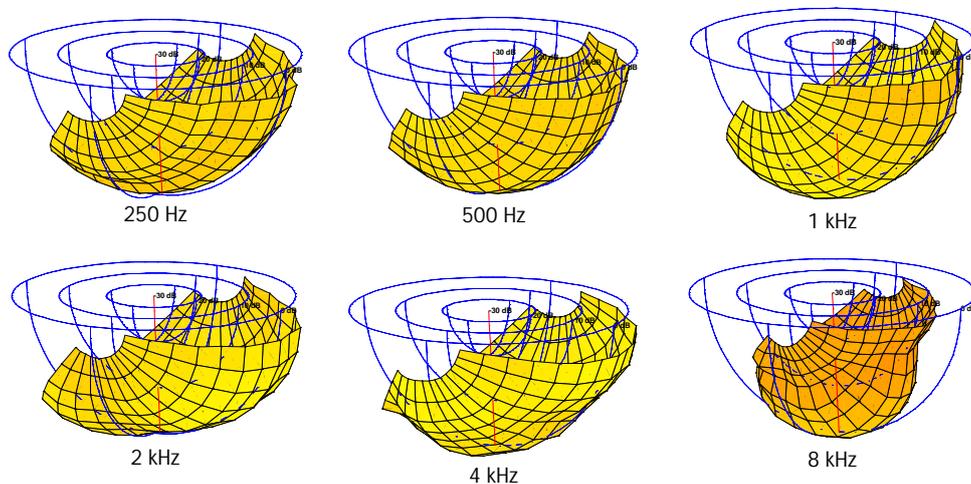


Abbildung 44: Bündelungsverhalten des Druckempfängers im PKW an der Position *Dachbedieneinheit*

3.1.3 Optimale Mikrofonausrichtung

Anhand des richtungsbezogenen Direktivitätsmaßes ist es möglich, eine darauf hin optimierte Mikrofonausrichtung für eine bestimmte Quellposition zu berechnen. Bei Annahme

¹² Die Quellposition $\varphi = -55^\circ, \theta = 40^\circ$ ist eine von vier potentiellen Sprecherpositionen welche vermessen wurden, und entspricht einem „Fahrer M“ mit ca. 175 cm Körpergröße. Alle vermessenen Sprecherpositionen sind im Anhang in Tabelle 0–3 aufgelistet.

eines diffusen Störschalls wird dieser bestmöglich unterdrückt. Hierbei wird die Eigenschaft des Mikrofonarrays ausgenutzt, welche es möglich macht eine Richtcharakteristik erster Ordnung in eine beliebige Richtung in der horizontalen Ebene auszurichten.

Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Mikrofone sind primär für die Sprachübertragung ausgelegt. Zum einen werden die zur Sprachsteuerung der Fahrzeugelektronik genutzt, vor allem aber werden sie für den Mobilfunk verwendet.

In der Mobilfunktechnik werden Audiodaten meist mit einer Abtastrate von 8 kHz übertragen werden, was einen Nutzfrequenzbereich bis maximal 4 kHz bedeutet [WikGSM]. Für die Berechnung der optimalen Mikrofonausrichtung wird daher nur das Direktivitätsmaß in diesem Frequenzbereich berücksichtigt, zusätzlich wird noch eine spektrale Gewichtung durchgeführt. Die *International Telecommunication Union* schlägt in [Itu99] für die Berechnung des *D-Value* eine spektrale Gewichtung, wie sie in Abbildung 45 zu sehen ist, vor. Der *D-Value* ist ebenfalls eine Maß für die Bündelung eines Mikrofons, allerdings wird hier direkt der Unterschied zwischen einem gerichteten Mikrofon und einem Kugelmikrofon mit Hilfe von Fahrgeräuschaufzeichnungen und künstlicher Sprache gemessen [Vda04]. Die Gewichte für die Berechnung des *D-Value* sind daher auch für die Berechnung einer optimalen Mikrofonausrichtung eine gute Wahl.

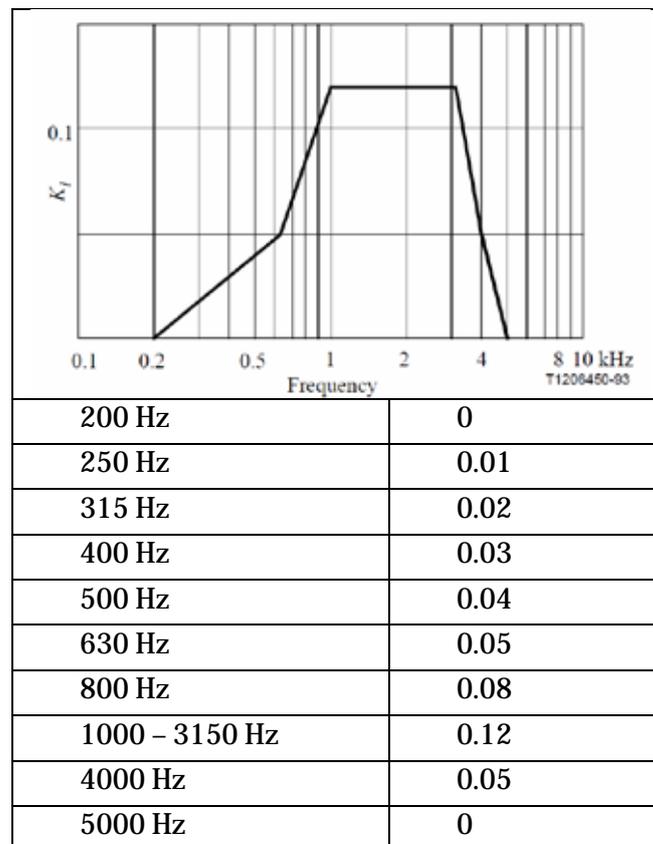


Abbildung 45: Gewichte für die Berechnung des *D-Value* [Itu99]

Die optimale horizontale Mikrofonausrichtung kann anhand der aufgezeichneten Messdaten für die Mikrofonpositionen *Dachbedieneinheit* und *Handgriff Fahrer* im PKW berechnet werden.

Es werden für die Berechnung die Richtcharakteristika Niere, Superniere und Hyperniere berücksichtigt, sowie verschiedene Quellpositionen, welche verschiedene Fahrer- bzw. Beifahrergrößen repräsentieren. In Abbildung 46 wird das Ergebnis einer solchen Berechnung für die Position *Dachbedieneinheit* gezeigt, in diesem Fall für eine(n) FahrerIn mit ca. 175 cm Körpergröße als Quellposition.

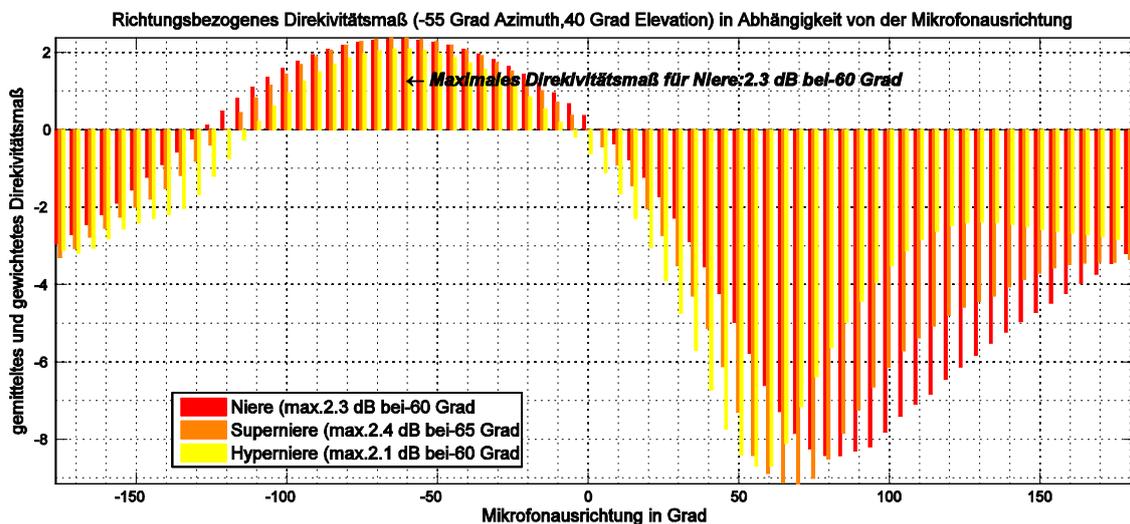


Abbildung 46: Direktivitätsmaß in Abhängigkeit von der Mikrofonausrichtung an der Position *Dachbedieneinheit* im PKW für verschiedene Richtcharakteristika und eine definierte Quellposition

Wie im Freifeld muss auch im PKW das Mikrofon auf die Quelle ausgerichtet werden um ein maximales Direktivitätsmaß zu erreichen, es kommt also zu keiner relevanten Verzerrung der Richtcharakteristika durch den Einbau im PKW. Das Direktivitätsmaß wird zunehmend kleiner, wenn das Mikrofon von der Quellposition weg zeigt. Für die Niere wird das kleinste Direktivitätsmaß erreicht wenn die Richtcharakteristika fast entgegengesetzt der Quelle zeigt (Ausrichtung auf +80°). Dies ist auch zu erwarten, da die Niere ihre maximale Löschung für rückwärtigen Schalleinfall aufweist und bei einer solchen Ausrichtung zur Schallquelle viel empfindlicher für diffusen Störschall als für das Quellsignal ist. Es zeigt sich auch, dass die Richtcharakteristika Superniere und Hyperniere weniger steil zur Quellposition ausgerichtet werden müssen um ihr minimales Direktivitätsmaß zu erreichen, da diese ihre Löschrichtung nicht wie die Niere bei 180° relativ zur Hauptrichtung besitzen, sondern seitlich bei 125° bzw. 110°.

Sowohl die Richtcharakteristika Superniere, als auch die Niere besitzen allgemein ein besseres Direktivitätsmaß als die Hyperniere. Wie in Tabelle 3-1 zu entnehmen ist, müsste das Bündelungsmaß, aus welchem sich das Direktivitätsmaß ja ableitet, für die Richtcharakteristika Hyperniere eigentlich höher als für die anderen verwendeten Richtcharakteristika sein.

Bei der verwendeten Richtcharakteristika handelt es sich jedoch nicht um eine „echte“ Hyperniere, sondern um eine Hyperniere welche mit einem Mikrofonarray simuliert wird. Wie bereits in Kapitel 2.1 gezeigt, handelt es sich bei dem verwendeten Mikrofonarray nicht um eine perfekt koinzidente Anordnung, weshalb in Abschnitt 2.1.3 bereits eine Methode zum

Laufzeitausgleich zwischen den einzelnen Mikrofonkapseln des Arrays vorgestellt wurde. Dieser Laufzeitausgleich, welcher die Synthese definierter Richtcharakteristika erst ermöglicht, funktioniert jedoch nur für eine definierte Schalleinfallrichtung. Bei Messungen im Freifeld ist dies kein Problem, da die Schalleinfallrichtung gleich der bekannten Quellposition ist. Im Innenraum eines PKW, kommt es aber aufgrund von Reflexionen zu Schalleinfall aus mehreren Richtungen, für welchen der Laufzeitausgleich nicht mehr funktioniert.

Um diese Überlegung zu validieren wird auf die Messdaten zurückgegriffen, welche im Messraum mit dem Messbogen und identer Abtastkonfiguration wie im PKW erfasst werden. Mit diesen Daten wird ebenfalls für die gleiche Quellposition wie in zuvor die optimale Mikrofonausrichtung berechnet. Das Ergebnis ist in Abbildung 47 zu sehen. Es zeigt sich, dass im Freifeld, wo die einwandfreie Funktion des Laufzeitausgleichs und somit des Beamformings vorausgesetzt werden kann, die vom Bündelungsmaß bekannte Hierarchie zutrifft: Bei optimaler Ausrichtung erreicht die Hypernierencharakteristik das maximale Direktivitätsmaß, die Niere das niedrigste. Vergleicht man die Werte noch einmal mit jenen aus Tabelle 3-1, erkennt man, dass auch die Verhältnisse der Direktivitätsmaße der verschiedenen Richtcharakteristika zueinander gut mit jenen der Bündelungsmaße übereinstimmen. So ist der Unterschied zwischen Niere und Superniere ein größerer als jener zwischen Superniere und Hyperniere.

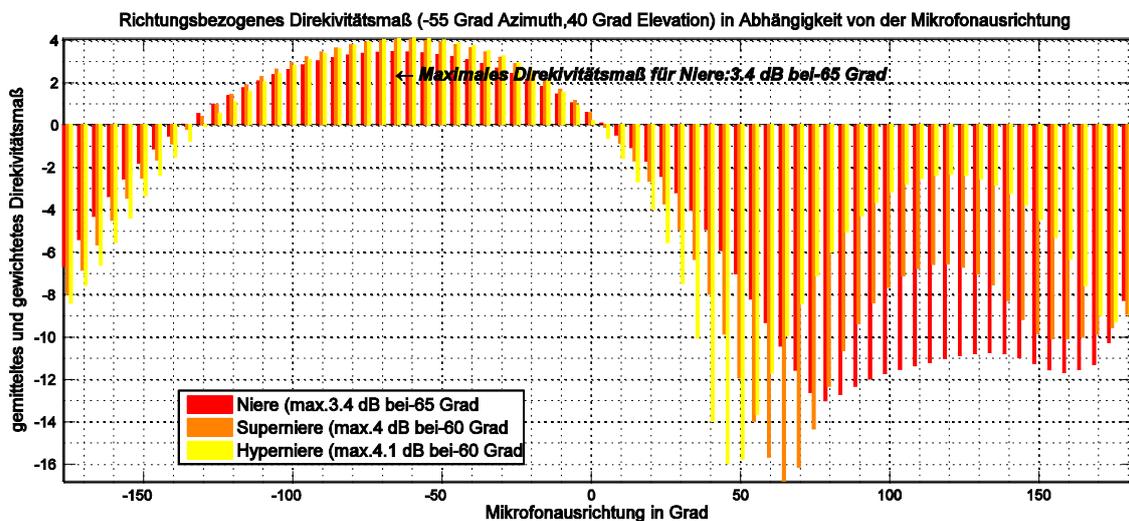


Abbildung 47: Direktivitätsmaß in Abhängigkeit von der Mikrofonausrichtung im an einer Grenzfläche im bedämpften Messraum für verschiedene Richtcharakteristiken und eine definierte Quellposition

Wie bereits aus der Definition des Direktivitätsmaßes in Abschnitt 3.1.2 hervorgeht, ist das Direktivitätsmaß für eine Quellposition auf der Hautachse des Mikrofons ident mit dem Bündelungsmaß. Für eine Berechnung des Bündelungsmaßes für nicht rotationssymmetrische Richtcharakteristika mit ist eine Abtastung einer ganzen Kugelfläche um das Mikrofon herum notwendig. Bei Mikrofonen an einer ebenen Grenzfläche genügt eine Abtastung auf einer Halbkugelfläche um die gesamte Richtcharakteristik des Mikrofones zu erfassen.

Im Innenraum eines PKW ist die Abtastung einer Halbkugel mit dem verwendeten Messbogen nicht möglich, wodurch die Berechnung des Direktivitätsmaßes verfälscht wird. Speziell bei der Ausrichtung einer synthetisierten Richtcharakteristik auf eine Fahrer- oder Beifahrerposition ist das berechnete Direktivitätsmaß zu gering.

Abbildung 48 verdeutlicht den entstehenden Fehler: Links ist eine ideale Niere zu sehen, wie sie bei der Abtastung über eine ganze Halbkugelfläche erfasst werden würde. Das Direktivitätsmaß bei Bezug auf die Hauptachse und somit auch das Bündelungsmaß sind 4,7 dB. Rechts ist die gleiche Niere zu sehen, allerdings so wie sie durch die Messvorrichtung an der Position *Dachbedieneinheit* erfasst wird. Dadurch dass die Rückseite der Richtcharakteristik, welche die stärksten Einbrüche in der Empfindlichkeit beinhaltet, nicht zur Gänze erfasst wird sinkt das berechnete Direktivitätsmaß auf 3,7 dB.

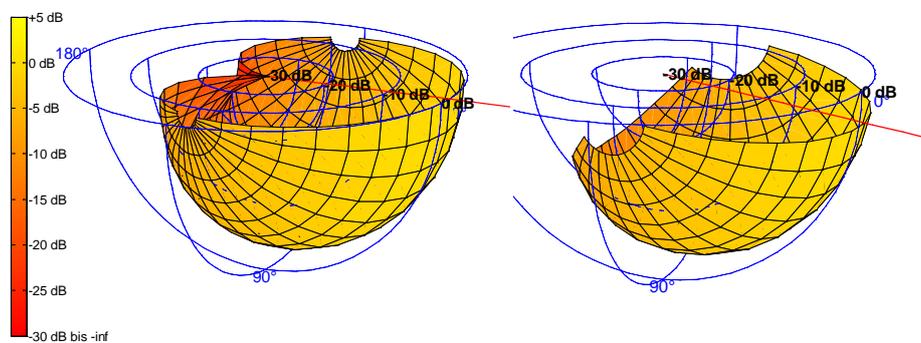


Abbildung 48: ideale Niere für eine Halbkugel- und die im PKW abgetastete Teilkugelfläche

Bei einer Abtastung an der Position *Handgriff Fahrer* wird nur bis zu einem Elevationswinkel von $\theta = 90^\circ$ abgetastet, wodurch das Direktivitätsmaß auf nur 2,3 dB sinkt. Das maximal erreichbare Direktivitätsmaß kann also, auch bei Mikrofon-Ausrichtung und Bezug auf die Quellposition, bei nicht vollständiger Erfassung einer Halbkugel nie so hoch wie das Bündelungsmaß sein. Dieser Umstand erklärt die gegenüber den theoretischen Bündelungsmaßen kleinen Direktivitätsmaße in Abbildung 46 und Abbildung 47.

Die durch dieses maximal erreichbare Direktivitätsmaß bestimmte optimale Mikrofonausrichtung ist auch für weitere Quellpositionen bei der Mikrofonposition *Dachbedieneinheit* fast ident gegenüber der Ausrichtung im Freifeld. Es wird daher auf weitere Grafiken verzichtet, das maximal erreichbare Direktivitätsmaß $\Gamma_{\varphi_0, \theta_0}$ sowie die dazugehörige horizontale Mikrofonausrichtung α für die 4 Quellpositionen im PKW ist für die Mikrofonposition *Dachbedieneinheit* in Tabelle 3-2 zu sehen.

	Fahrer S ($\varphi_0 = -55^\circ$)	Fahrer M ($\varphi_0 = -55^\circ$)	Fahrer L ($\varphi_0 = -55^\circ$)	Beifahrer M ($\varphi_0 = +55^\circ$)
Niere	$\Gamma_{\varphi_0, \theta_0} = 2,5 \text{ dB}$ $\alpha = -65^\circ$	$\Gamma_{\varphi_0, \theta_0} = 2,3 \text{ dB}$ $\alpha = -60^\circ$	$\Gamma_{\varphi_0, \theta_0} = 2,1 \text{ dB}$ $\alpha = -60^\circ$	$\Gamma_{\varphi_0, \theta_0} = 2,4 \text{ dB}$ $\alpha = +65^\circ$
Superniere	$\Gamma_{\varphi_0, \theta_0} = 2,5 \text{ dB}$ $\alpha = -70^\circ$	$\Gamma_{\varphi_0, \theta_0} = 2,4 \text{ dB}$ $\alpha = -65^\circ$	$\Gamma_{\varphi_0, \theta_0} = 2,2 \text{ dB}$ $\alpha = -60^\circ$	$\Gamma_{\varphi_0, \theta_0} = 2,3 \text{ dB}$ $\alpha = +60^\circ$
Hyperniere	$\Gamma_{\varphi_0, \theta_0} = 2,1 \text{ dB}$ $\alpha = -65^\circ$	$\Gamma_{\varphi_0, \theta_0} = 2,1 \text{ dB}$ $\alpha = -60^\circ$	$\Gamma_{\varphi_0, \theta_0} = 1,9 \text{ dB}$ $\alpha = -60^\circ$	$\Gamma_{\varphi_0, \theta_0} = 1,8 \text{ dB}$ $\alpha = +60^\circ$

Tabelle 3-2: Direktivitätsmaß für die optimale Mikrofonausrichtung für die Position *Dachbedieneinheit*

Für die Mikrofonposition *Handgriff Fahrer* ist das maximal erreichbare Direktivitätsmaß $\Gamma_{\varphi_0, \theta_0}$ sowie die dazugehörige horizontale Mikrofonausrichtung α in Tabelle 3-3 aufgeführt. Hier ist das Direktivitätsmaß immer kleiner als Null, wodurch ein optimales Kugelmikrofon robuster gegenüber diffusem Störgeräusch wäre als die jeweilige Richtcharakteristik.

	Fahrer S ($\varphi_0 = +105^\circ$)	Fahrer M ($\varphi_0 = +105^\circ$)	Fahrer L ($\varphi_0 = +105^\circ$)	Beifahrer ($\varphi_0 = +95^\circ$)
Niere	$\Gamma_{\varphi_0, \theta_0} = -1,1 \text{ dB}$ $\alpha = +120^\circ$	$\Gamma_{\varphi_0, \theta_0} = -1,1 \text{ dB}$ $\alpha = +120^\circ$	$\Gamma_{\varphi_0, \theta_0} = -0,4 \text{ dB}$ $\alpha = +135^\circ$	$\Gamma_{\varphi_0, \theta_0} = -0,8 \text{ dB}$ $\alpha = +100^\circ$
Superniere	$\Gamma_{\varphi_0, \theta_0} = -1,4 \text{ dB}$ $\alpha = +115^\circ$	$\Gamma_{\varphi_0, \theta_0} = -1,2 \text{ dB}$ $\alpha = +115^\circ$	$\Gamma_{\varphi_0, \theta_0} = -0,6 \text{ dB}$ $\alpha = +140^\circ$	$\Gamma_{\varphi_0, \theta_0} = -1 \text{ dB}$ $\alpha = +100^\circ$
Hyperniere	$\Gamma_{\varphi_0, \theta_0} = -1,6 \text{ dB}$ $\alpha = -85^\circ$	$\Gamma_{\varphi_0, \theta_0} = -1,4 \text{ dB}$ $\alpha = +115^\circ$	$\Gamma_{\varphi_0, \theta_0} = -0,6 \text{ dB}$ $\alpha = +110^\circ$	$\Gamma_{\varphi_0, \theta_0} = -1,4 \text{ dB}$ $\alpha = -80^\circ$

Tabelle 3-3: Direktivitätsmaß für die optimale Mikrofonausrichtung für die Position *Handgriff Fahrer*

Betrachtet man das Polardiagramm der für die Quellposition Fahrer M optimal ausgerichteten Nierencharakteristik in Abbildung 49 links, erkennt man wieso es zu diesen negativen Werten für das Direktivitätsmaß kommt. Da das 3D-Polardiagramm ist auf die Empfindlichkeit in Richtung der Quelle normiert ist, erkennt man dass die Richtcharakteristik für Schalleinfall von vorne um fast 10 dB empfindlicher ist als für Schall von der Quelle.

Um die Messergebnisse möglichst neutral ohne vorweggenommene Optimierung zu erfassen, wurde das Mikrofonarray an beiden vermessenen Mikrofonpositionen horizontal ohne Neigung montiert. Dadurch zeigen die eigentlichen Keulen der Richtcharakteristika immer über die Quellpositionen hinweg, was sich speziell an der Position *Handgriff Fahrer* durch einen größeren Elevationswinkel zu den Quellpositionen bemerkbar macht. Eine auch vertikal auf die Quellposition ausgerichtete Richtcharakteristik würde sicherlich ein positives Direktivitätsmaß bewirken.

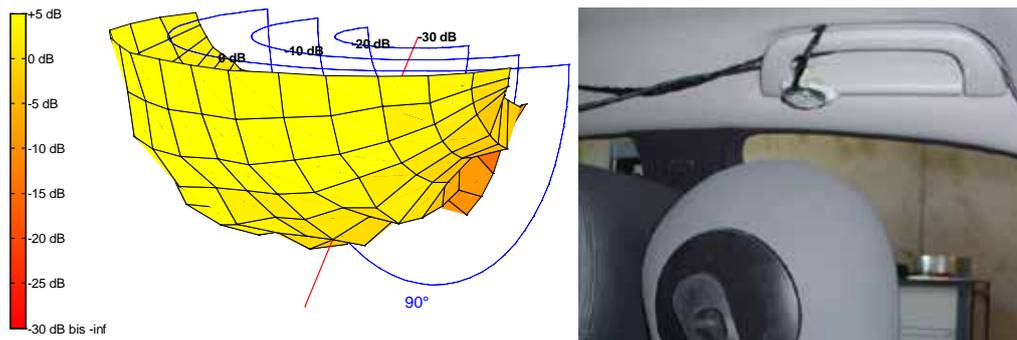


Abbildung 49: 3D-Polardiagramm einer für die Quellposition Fahrer M optimal ausgerichteten Nierencharakteristik (links) und Mikrofonarray-Montage (rechts) an der Position *Handgriff Fahrer*

3.1.4 Zusammenfassung Mikrofonverhalten

In diesem Kapitel wurden 3D-Polardiagramme eines im PKW an einer Grenzfläche montierten Mikrofones dargestellt. Es zeigt sich, dass sich Richtcharakteristika im Inneren eines PKW geringfügig verändern. Bei gerichteten Mikrofonen ist die Dämpfung für Schalleinfall aus der Rückseite geringer als bei Messungen im Freifeld.

Es wird auch gezeigt, dass eine Berechnung des Bündelungsmaßes mit im PKW erfassten Messdaten nicht zulässig ist. Es wird daher das richtungsabhängige Direktivitätsmaß eingeführt. Der Vorteil des Direktivitätsmaßes gegenüber dem Bündelungsmaß ist, dass es Bezug auf eine Quellposition nimmt und somit aussagekräftigere Werte für die Unterdrückung eines Störgeräusches gegenüber einem Nutzsignal aus definierter Richtung liefert.

Bei der Bestimmung einer optimalen Mikrofonausrichtung stellt sich heraus, dass sich die Richtung der Maximalen Empfindlichkeit eines Mikrofones durch den Einbau im PKW nicht verändert. Für eine optimale Unterdrückung von diffusem Störschall sollte die im Freifeld gemessene Hauptrichtung eines Mikrofones auch im Innenraum eines PKW direkt auf die Quelle ausgerichtet sein.

3.2 Fahrgeräusch

In diesem Kapitel wird das im PKW auftretende Störgeräusch betrachtet, welches sich aus Motorenlärm, Fahrbaumlärm und Windgeräusch zusammensetzt und zusammengefasst als Fahrgeräusch bezeichnet wird.

3.2.1 Beschaffenheit des Fahrgeräusches

So wie bei allen Messungen im PKW, wird auch für die Fahrgeräuschaufzeichnung das Mikrofonarray verwendet. Neben 3 gerichteten Mikrofonkapseln für das Beamforming, ist im Mikrofonarray auch ein Druckempfänger mit Kugelcharakteristik verbaut. Um den spektralen Verlauf des Fahrgeräusches zu betrachten, werden damit erstellte Aufnahmen des Fahrgeräusches verwendet.

Die ca. 9 Sekunden langen Aufnahmen, welche vorher auf etwaige Störgeräusche wie Hupen oder Rumpeln überprüft wurden, werden in ca. 180 ms lange Ausschnitte zerteilt und jeweils mit einer DFT in den Frequenzbereich transformiert. Die Spektren der Signalausschnitte werden jeweils mit dem Frequenzgang des Kugelmikrofones entzerrt, anschließend werden die Betragsspektren berechnet und über alle Signalausschnitte gemittelt. Die resultierenden, geglätteten Betragsspektren für vier Fahrgeschwindigkeiten (50, 70, 100 und 130 km/h) an je zwei Positionen (*Dachbedieneinheit* und *Handgriff Fahrer*) sind in Abbildung 50 dargestellt.

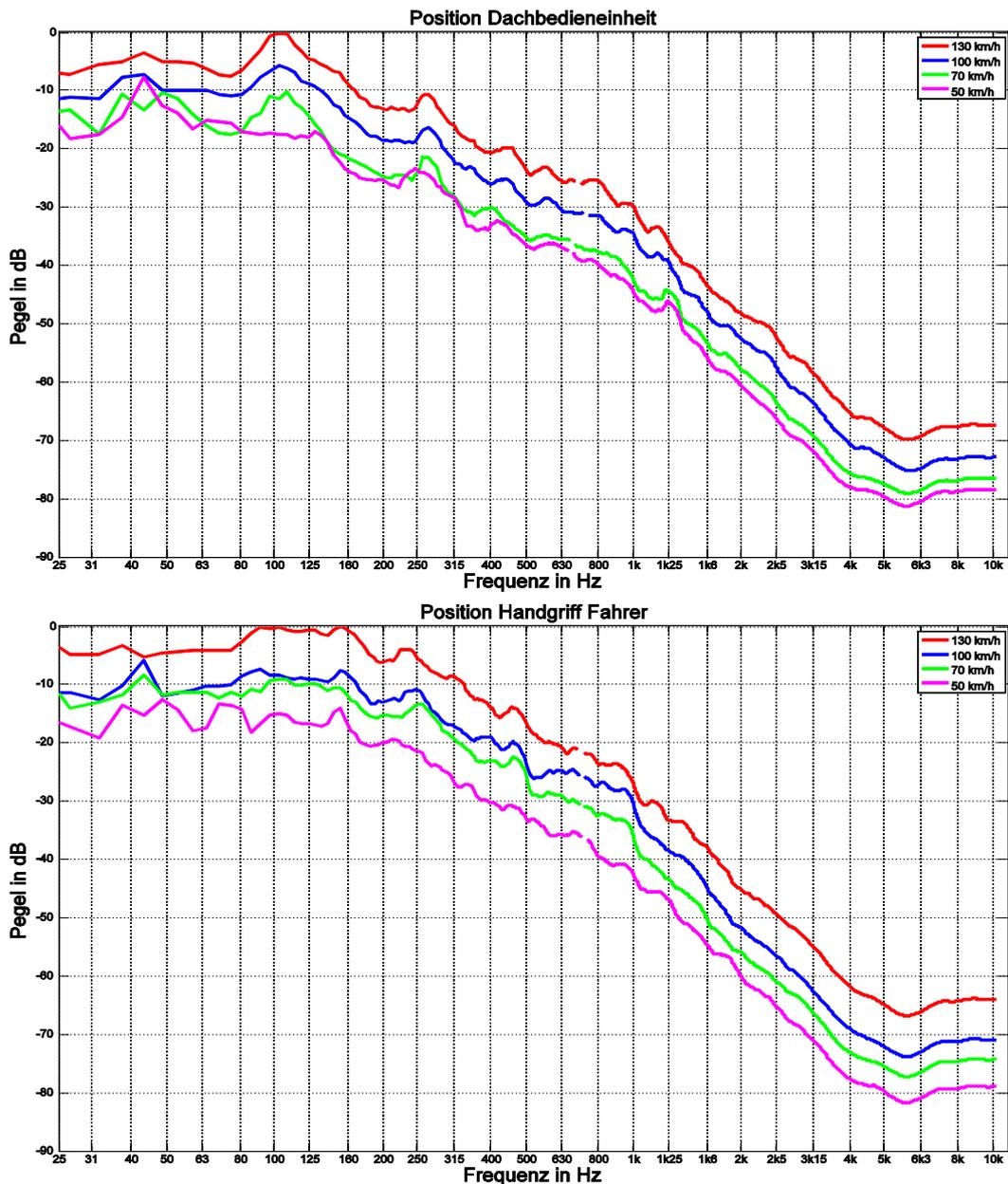


Abbildung 50: Fahrgeräuschspektren für die Positionen *Dachbedieneinheit* (oben) und *Handgriff Fahrer*

Die Betragsspektren der Fahrgeräusche sind für alle Geschwindigkeiten sehr ähnlich, der Gesamtpegel steigt mit der Fahrgeschwindigkeit an. Bis ca. 100 Hz hat das Fahrgeräusch einen gleichmäßigen Pegelverlauf, danach fällt der Pegel mit etwa 40 dB pro Dekade. Spitzen im

Spektrum wie z.B. bei ca. 100, 250 und 315 Hz sind Resonanzfrequenzen, die durch die Geometrie des PKW Innenraums entstehen.

Reduziert man die Fahrgastzelle eines PKW auf ihren seine Grundform, entsteht diese einem Schuhkarton. Für solche Quaderräume ist die Berechnung der Resonanzfrequenzen, auch Moden genannt, hinlänglich bekannt [Mai08]. Die Moden können mit

$$f_{n_x/n_y/n_z} = \left(\frac{c}{2}\right) \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (3.16)$$

berechnet werden, wobei l_x, l_y und l_z Breite, Länge und Höhe des Raumes und n die Ordnung der Moden beschreibt.

In ihrer Resonanzwirkung am ausgeprägtesten sind axiale Moden, welche zwischen zwei parallel gegenüberliegenden Wänden entstehen. Sie treten dann auf wenn zwei der Ordnungszahlen n_x, n_y oder n_z gleich Null sind. Verstärkt Werden diese Resonanzfrequenzen noch durch Moden höherer Ordnung, die nahe derselben Frequenz liegen, verstärkt, spricht man von Mehrfachmoden. In Abbildung 51 sind die Moden für den in diese Arbeit verwendeten PKW mit den Maßen $l_x = 1,3 \text{ m}$, $l_y = 2,7 \text{ m}$ und $l_z = 1,3 \text{ m}$ dargestellt. Wie stark die Resonanzwirkung bei verschiedenen Frequenzen ist, wird durch eine Gewichtung je nach Häufigkeit und Ordnung gezeigt, wobei Moden niedriger Ordnungen höher Gewichtet werden.

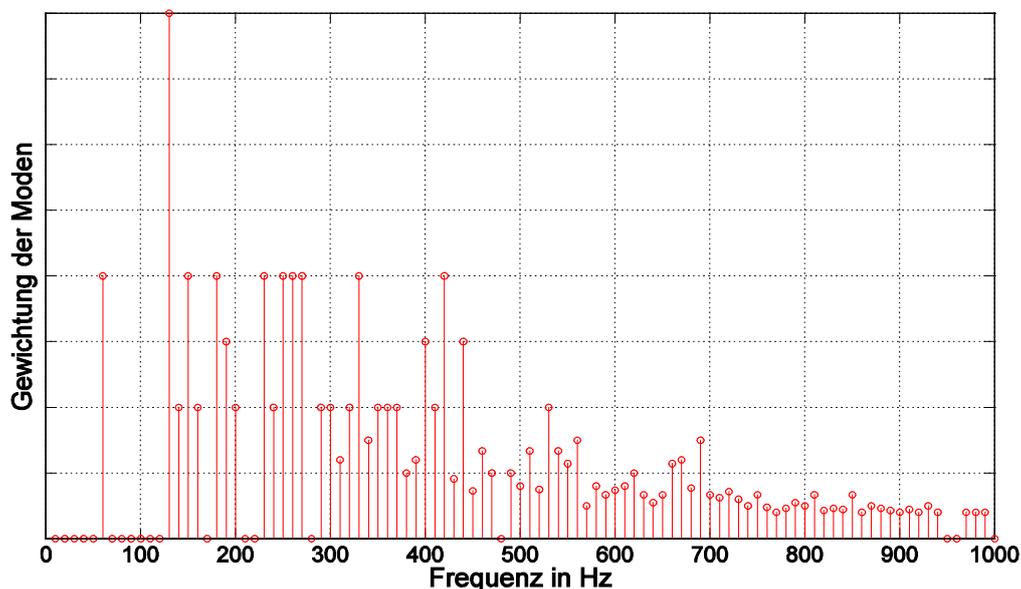


Abbildung 51: Zu erwartende Moden im Inneren des PKW, gewichtet nach Ordnung und Häufigkeit

Betrachtet man mit dieser Kenntnis noch einmal die Resonanzspitzen in Abbildung 50, lassen sich speziell die berechneten Moden mit hoher Gewichtung wiederfinden.

3.2.2 Richtungsabhängigkeit des Fahrgeräusches

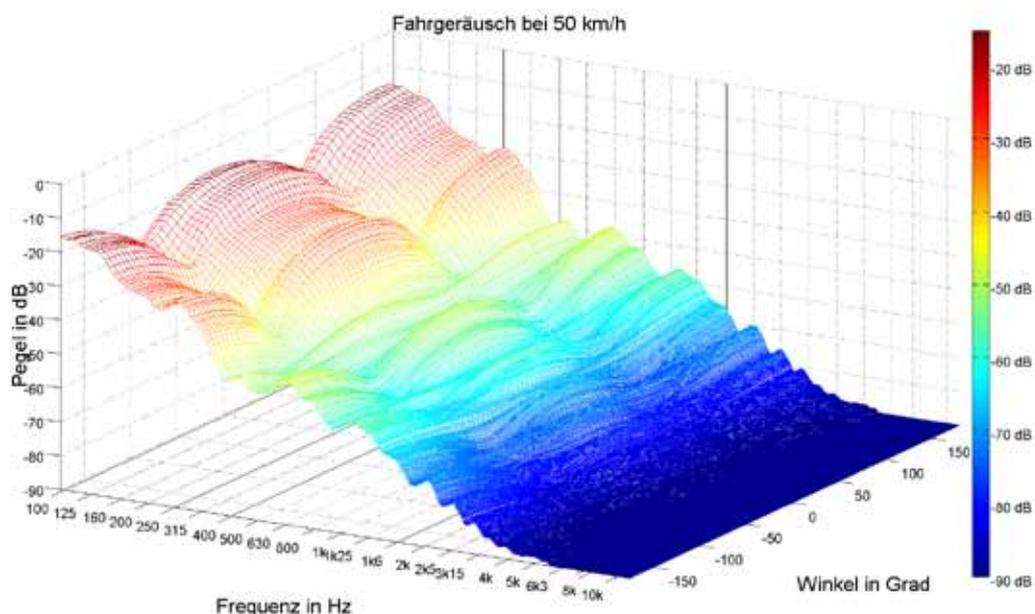
Neben der Analyse des Fahrgeräusches durch die Aufnahmen mit dem Kugelmikrofon, kann das Fahrgeräusch mit dem Mikrofonarray auch in Abhängigkeit der Einfallsrichtung zu

betrachtet werden. Da das Fahrgeräusch bei konstanter Geschwindigkeit als stationär betrachtet werden kann, wird für die richtungsabhängige Analyse eine modifizierte Version des Spektrogrammes bzw. des Wasserfalldiagrammes verwendet.

Ein Spektrogramm stellt den Frequenzverlauf eines Signals über die Zeit dar. Die X-Achse repräsentiert die Zeit, die Y-Achse die Frequenz und die Amplitude wird farblich dargestellt. Wird die Amplitude auf einer zusätzlichen Z-Achse dargestellt, spricht man von einem Wasserfalldiagramm. Das für diese Arbeit eingeführte *räumliche Wasserfalldiagramm* verzichtet auf die Darstellung des Frequenzverlaufs über die Zeit und zeigt auf der X-Achse stattdessen den horizontalen Schalleinfallswinkel des jeweiligen Signalspektrums.

Es werden hierfür die Fahrgeräuschaufzeichnungen, welche mit dem Mikrofonarray an der Position *Dachbedieneinheit* durchgeführt wurden, verwendet. Mit dem Mikrofonarray wird die Richtcharakteristik Superniere simuliert und in 5 Grad-Schritten virtuell gedreht. Für jeden Winkel (X-Achse) wird das jeweilige berechnete Betragsspektrum des Fahrgeräusches entlang der Y-Achse dargestellt. Zusätzlich wird das Spektrum mit dem Frequenzgang der simulierten Superniere entzerrt um den Einfluss des Mikrofonfrequenzganges zu kompensieren.

In Abbildung 52 ist das *räumliche Wasserfalldiagramm* für die zwei Fahrgeschwindigkeiten 50 km/h und 130 km/h zu sehen.



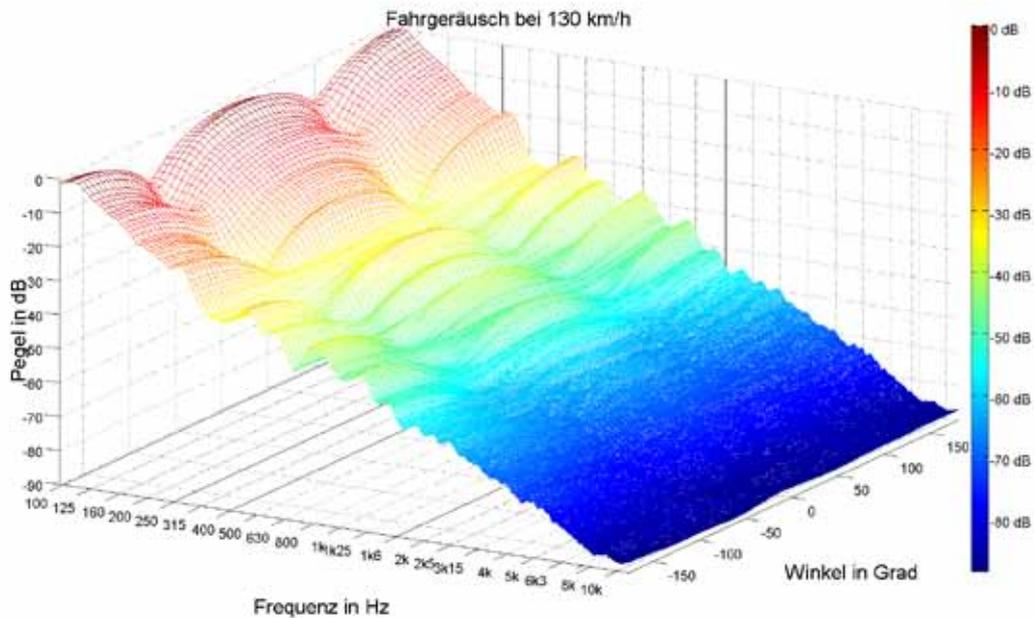
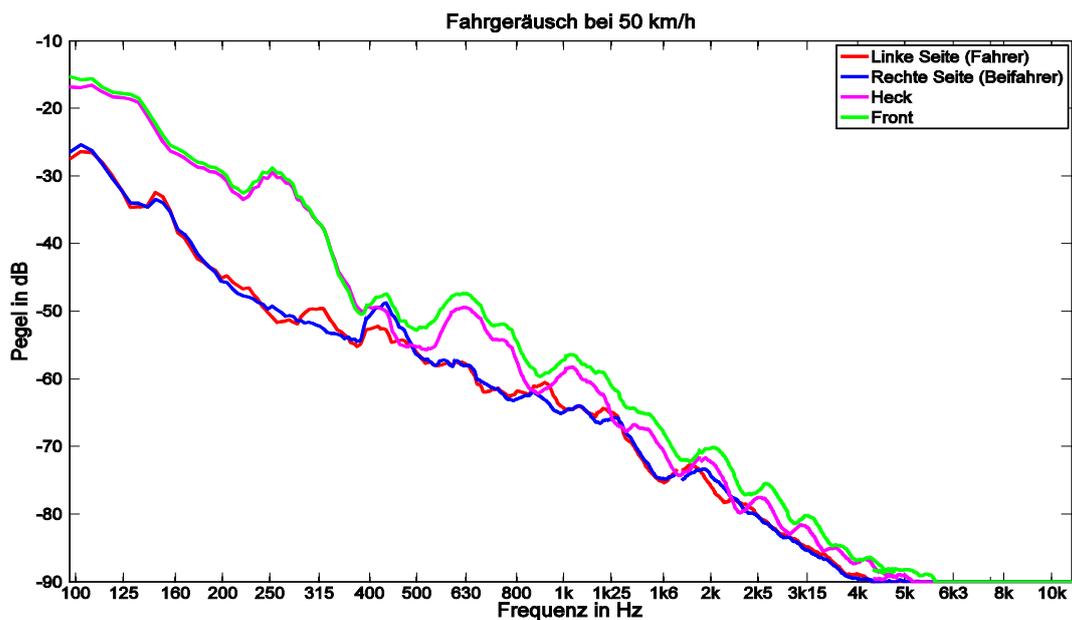


Abbildung 52: Räumliches Wasserfalldiagramm für zwei verschiedene Fahrgeschwindigkeiten

Durch die Richtcharakteristik Superniere zeigen die jeweiligen Richtungsspektren nicht nur das Spektrum des Signals welches genau aus dieser Richtung kommt. Entsprechend des polardiagrammes wird auch den Schall, welcher aus anderen Richtungen kommt, mit aufgezeichnet und geht in die Berechnung des Betragsspektrums mit ein. Trotz dieser Unschärfe erkennt man eine Richtungsabhängigkeit des Betragsspektrums des Fahrgeräusches.

Am deutlichsten ist der Unterschied zwischen dem Spektren des Fahrgeräusches welches von der Front bzw. Heck des PKW herrührt, und jenem von den Fahrzeugseiten. Das Spektrum des Fahrgeräusches aus diesen vier Richtungen ist in Abbildung 53 für die Fahrgeschwindigkeiten 50 und 130 km/h zu sehen.



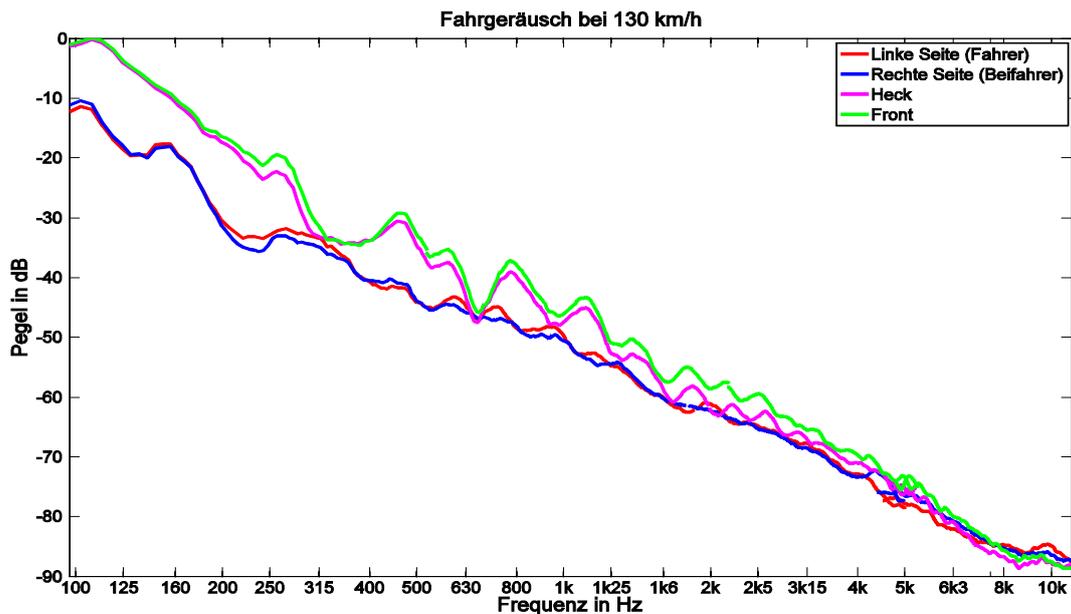


Abbildung 53: Fahrgeräusch aus den Richtungen Links, Rechts, Heck und Front bei 50 und 130 km/h

Das Fahrgeräusch von der Front bzw. dem Heck weist einen um bis zu 20 dB höheren Anteil an tieffrequenten Komponenten auf. Die Ursache darin ist das Rollgeräusch, welches die Reifen auf der Fahrbahn selbst verursachen. Die Antriebsachsen des PKW und somit die Reifen befinden sich an der Front bzw. am Heck, das tieffrequente Rollgeräusch kommt demnach hauptsächlich aus diesen Richtungen. Das Fahrgeräusch welches aus den Richtungen der PKW Seiten kommt weist ab ca. 2 kHz einen ähnlichen Pegel auf, wie jenes aus Richtung Front bzw. Heck auf. Speziell bei höheren Fahrgeschwindigkeiten handelt es sich um den Lärm, welcher durch den Fahrtwind entsteht. Das Vorbeiziehen der Luft am PKW verursacht Turbulenzen welche akustisch ein breitbandiges Rauschen bewirken. Diese Turbulenzen sind von der Fahrgeschwindigkeit abhängig. In Abbildung 53 erkennt man, dass der Pegelunterschied zu hohen Frequenzen zwischen den verschiedenen Richtungen bei 130 km/h geringer ist als bei 50 km/h. Das Windgeräusch an den Seiten des PKWs ist bei 130 km/h deutlich lauter und reicht näher an den Pegel des Reifenlärms heran. Der Lärm durch den Fahrtwind erklärt auch den leichten Pegelunterschied des Fahrgeräusches aus Richtung Heck und Front. Der an der Fahrzeugfront eintreffende Fahrtwind bewirkt dort ein um 1-2 dB lauterer Fahrgeräusch als aus Richtung PKW Heck.

Zusammengefasst zeigt das *räumliche Wasserfalldiagramm*, dass das stark richtungsabhängige Fahrgeräusch aus Richtung der PKW-Seiten den geringsten Pegel ausweist. Soll möglichst wenig Fahrgeräusch mit einem Mikrofon aufgenommen werden, bringt demnach eine Mikrofonausrichtung zu den Fahrzeugseiten mit $\pm 90^\circ$ Azimuth die besten Ergebnisse.

3.2.3 Bewertung des Fahrgeräusches

Um die Erkenntnisse über das Mikrofonverhalten und die Richtungsabhängigkeit des Fahrgeräusches zusammengefasst zu betrachten, werden aus den mit dem künstlichen Mund gemessenen Impulsantworten und den Fahrgeräuschaufzeichnungen Signal-Störabstände (engl. *Signal-to-Noise Ratio*, kurz *SNR*) berechnet (3.17). Ein positiver SNR Wert bedeutet, dass das Nutzsignal, in diesem Fall ein(e) potentieller/potentielle SprecherIn, besser übertragen wird als das Störgeräusch und wird daher in dieser Arbeit als „gut“ bewertet.

$$SNR = 20 \cdot \log \frac{\text{Nutzsignalpegel}}{\text{Störgeräuschpegel}} \quad (3.17)$$

Hierfür wird das Betragsspektrum der Impulsantwortmessung und der Fahrgeräuschaufzeichnungen mit den *D-Value* Koeffizienten gewichtet (vgl. Abschnitt 3.1.3.). Die Berechnung des Signal-Störabstandes erfolgt für 3 simulierte Richtcharakteristika (Niere, Superniere, Hypernieren) bei Mikrofonausrichtungen in der horizontalen Ebene in 10° Schritten für 4 potentielle Sprecherpositionen. In Tabelle 3–4 und Tabelle 3–5 sind die maximal erreichbaren SNR Werte für die Fahrgeschwindigkeiten 50 und 100 km/h angegeben. Ebenfalls angegeben ist die Mikrofonausrichtung α bei der dieser maximale SNR-Wert erreicht wird.

	Fahrer S ($\varphi_0 = -55^\circ$)	Fahrer M ($\varphi_0 = -55^\circ$)	Fahrer L ($\varphi_0 = -55^\circ$)	Beifahrer ($\varphi_0 = +55^\circ$)
Niere	SNR = 5,8 dB $\alpha = -80^\circ$	SNR = 5,9 dB $\alpha = -80^\circ$	SNR = 6,1 dB $\alpha = -75^\circ$	SNR = 5,3 dB $\alpha = +75^\circ$
Superniere	SNR = 5,2 dB $\alpha = -80^\circ$	SNR = 5,4 dB $\alpha = -80^\circ$	SNR = 5,6 dB $\alpha = -75^\circ$	SNR = 4,9 dB $\alpha = +80^\circ$
Hypernieren	SNR = 4,5 dB $\alpha = -80^\circ$	SNR = 4,7 dB $\alpha = -80^\circ$	SNR = 4,9 dB $\alpha = -80^\circ$	SNR = 4,2 dB $\alpha = +85^\circ$

Tabelle 3–4: Maximale SNR Werte und Mikrofonausrichtung bei 50 km/h, Position *Dachbedieneinheit*

	Fahrer S ($\varphi_0 = -55^\circ$)	Fahrer M ($\varphi_0 = -55^\circ$)	Fahrer L ($\varphi_0 = -55^\circ$)	Beifahrer ($\varphi_0 = +55^\circ$)
Niere	SNR = -3,1 dB $\alpha = -70^\circ$	SNR = -3 dB $\alpha = -70^\circ$	SNR = -2,8 dB $\alpha = -70^\circ$	SNR = -4,1 dB $\alpha = +80^\circ$
Superniere	SNR = -3,7 dB $\alpha = -75^\circ$	SNR = -3,6 dB $\alpha = -75^\circ$	SNR = -3,3 dB $\alpha = -75^\circ$	SNR = -4,7 dB $\alpha = +85^\circ$
Hypernieren	SNR = -4,5 dB $\alpha = -80^\circ$	SNR = -4,3 dB $\alpha = -80^\circ$	SNR = -4,1 dB $\alpha = -80^\circ$	SNR = -5,4 dB $\alpha = +90^\circ$

Tabelle 3–5: Maximale SNR Werte und Mikrofonausrichtung bei 100 km/h, Position *Dachbedieneinheit*

Es zeigt sich, dass die in Bezug auf einen bestmöglichen Signal-Störabstand berechnete Mikrofonausrichtung ein Kompromiss aus der in Abschnitt 3.1.3 (für ein bestmögliches Direktivitätsmaß) berechneten Mikrofonausrichtung und der in Abschnitt 3.2.3 (für bestmögliche Störgeräuschunterdrückung) bestimmten Ausrichtung ist.

Wie schon bei der Berechnung des Direktivitätsmaßes bewirkt eine simulierte Nierencharakteristik bessere Werte als die Richtcharakteristika Superniere und Hypernieren, obwohl diese eigentlich ein höheres Bündelungsmaß besitzen. Die Ursache dieses Verhaltens liegt daran, dass ein Laufzeitausgleich zwischen den Kapselsignalen des Mikrofonarrays für diffusen Schalleinfall nicht möglich ist.

Die schlechten SNR Werte bei der Fahrgeschwindigkeit 130 km/h sind dahin zurück zu führen, dass die Impulsantwortmessungen mit einem Pegel von 94 dB SPL (bei 1 kHz) vor dem künstlichen Mund durchgeführt wurden. Bei einer Entfernung von ca. 45 cm zum Mikrofonarray ergibt sich durch die Pegelabnahme umgekehrt proportional zur Entfernung ein Nutzsignalpegel von 70 dB am Mikrofon [Gra06]. Ein(e) menschliche(r) FahrerIn würde seine Sprechlautstärke an den Pegel des Umgebungsgeräusches anpassen und somit bei dem bei einer Fahrgeschwindigkeit von 130 km/h entstehenden Lärm wesentlich lauter sprechen, was wiederum einen besseren SNR Wert zur Folge hätte [Lom11].

Abbildung 71 im Anhang V zeigt den maximal erreichbaren Signal-Störabstand (SNR) im Verhältnis zu den Signal-Störabständen welche bei direkter Ausrichtung auf die Quellposition bzw. durch die in Abschnitt 3.1.3 berechnete „optimale“ Ausrichtung erreicht werden. Es zeigt sich, dass durch die Kenntnis des Richtverhaltens des Mikrofones im PKW und einer entsprechenden Mikrofonausrichtung, der Signal-Störabstand geringfügig verbessert werden kann (je nach Quellposition bis zu 0,5 dB). Durch Berücksichtigung des Richtverhaltens und der Beschaffenheit des Fahrgeräusches, wie es bei einer optimierten Ausrichtung entsprechend dem SNR Wert der Fall ist, kann der Signal-Störabstand um bis zu 1 dB verbessert werden.

3.2.4 Zusammenfassung Fahrgeräusch

In diesem Kapitel wurde das im PKW auftretende Fahrgeräusch betrachtet. Das Fahrgeräusch besitzt viel Energie im Bassbereich, der Pegel fällt ab ca. 100 Hz mit in etwa 40 dB pro Oktave. Der Pegel des Fahrgeräusches ist geschwindigkeits- und richtungsabhängig.

Durch die Verwendung eines Mikrofonarrays wird gezeigt, dass das Fahrgeräusch bei einer fixen Mikrofonposition mit bis zu 10 dB Pegelunterschied aus verschiedenen Richtungen empfangen wird. Am leisesten ist das Fahrgeräusch aus Richtung der PKW-Seiten, am lautesten aus Richtung Front und Heck. Es stellt sich heraus, dass ein Mikrofon in einem PKW für eine optimale Unterdrückung des Fahrgeräusches am besten auf die Seite des PKW ausgerichtet wird.

Die Mikrofonausrichtung für optimale Aufnahme eines Sprechers, bei gleichzeitig bestmöglicher Unterdrückung des Fahrgeräusches, ist ein Kompromiss zwischen Ausrichtung auf die PKW Seiten und Ausrichtung auf den/die SprecherIn.

3.3 Akustik des PKW Innenraumes

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, werden neben den Messungen mit dem Messbogen auch Impulsantwortmessungen mit dem künstlichen Mund durchgeführt. Der in einem Kunstkopf verbaute künstliche Mund wird für diesen Zweck an unterschiedlichen Stellen im PKW positioniert, welche potentielle Sprecherpositionen darstellen. In diesem Kapitel werden die so erfassten Messdaten verwendet um Reflexionen, welche bei der Schallausbreitung im Innenraum eines PKW entstehen, im Zeitbereich zu erkennen und zu klassifizieren.

3.3.1 Räumliche Impulsantwort

Durch die Verwendung des Mikrofonarrays kann eine Richtcharakteristik erster Ordnung simuliert und beliebig in einer horizontalen Ebene ausgerichtet werden. Für die *räumliche Impulsantwort* wird diese Möglichkeit genutzt, um den zeitlichen Verlauf der Impulsantwort richtungsabhängig zu betrachten. Es werden dafür die mit dem Mikrofonarray (an der Position *Dachbedieneinheit*) und dem künstlichen Mund erfassten Daten einer Impulsantwortmessung verwendet. In der Berechnung wird mit dem Mikrofonarray eine Richtcharakteristik simuliert, welche über einen horizontalen Winkelbereich von 360° gedreht wird um somit nur den Schalleinfall aus der jeweiligen Richtung zu analysieren.

Impulsringe

Für die richtungsabhängige Betrachtung der Impulsantwort wird mit dem Mikrofonarray eine Nierencharakteristik simuliert, da diese die beste Dämpfung für von hinten einfallenden Schall bietet. Die mit dem Mikrofonarray synthetisierte Nierencharakteristik besitzt gegenüber seitlich einfallendem Schall eine Dämpfung von ca. 6 dB (vgl. Abbildung 10). Dadurch wird auch Schall, welcher nicht exakt aus Hauptachse des Mikrofones kommt, mit aufgezeichnet und die *räumliche Impulsantwort* dadurch entsprechend verfälscht.

Die *räumliche Impulsantwort* soll dafür genutzt werden, um Reflexionen und deren Herkunftsrichtung zu erkennen. Um in einer Impulsantwort vorhandene Reflexionsmuster besser erkennbar zu machen, bietet sich die Autokorrelation an. Die Autokorrelation ist die Korrelation eines Signals mit sich selbst. Bei der Autokorrelation diskreter Signale wird demnach eine Wertefolge mit einer um m Samples verschobenen Version von sich selbst multipliziert und gemittelt. Nimmt m mehrere Werte an, führt dies zur Autokorrelationsfunktion.

$$g(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot x(n+m) \quad \text{für } m = -(N-1) \dots (N+1) \quad (3.18)$$

Die Autokorrelationsfunktion hat bei $m = 0$ immer ihr Maximum, weitere lokale Maxima werden immer dann erreicht, wenn zwischen verschobenem und nicht verschobenem Signal eine Beziehung besteht [WikAK]. Im Falle einer Impulsantwort sind solche lokalen Maxima $g(m)$ auf eine Reflexion nach m Samples zurückzuführen.

Da das Phasenverhältnis der Reflexionen zum Direktschall für diese Betrachtungen nicht relevant ist, wird für die Darstellung der Betrag der Autokorrelationsfunktion verwendet. Da die Autokorrelationsfunktion symmetrisch um $r(0)$ ist, werden nur Werte $m \geq 0$ für die Berechnung verwendet. Diese Maßnahmen führen zu einer modifizierten Autokorrelationsfunktion $g'(m)$, wie sie Gleichung (3.19) beschreibt.

$$g'(m) = \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot x(n+m) \right| \quad \text{für } m = 0 \dots (N+1) \quad (3.19)$$

Die Werte $g'(m)$ für alle Mikrofonausrichtungen werden vor der Darstellung noch auf ihr gemeinsames Maximum normiert und in dB umgerechnet, weshalb auf den Normierungsterm $\frac{1}{N}$ aus Gleichung (3.18) in Gleichung (3.19) verzichtet wird.

Für die Darstellung der Autokorrelationsfunktionen der *räumlichen Impulsantworten* wird ein Zylinderkoordinatensystem verwendet, wobei der Winkel ϕ die Schalleinfallrichtung, von dessen Impulsantwort die die Autokorrelationsfunktion berechnet wird, angibt. Die so entstehenden Darstellungen werden in dieser Arbeit als *Impulsringe* bezeichnet. Abbildung 54 zeigt den Zusammenhang zwischen Zylinderkoordinatensystem und solchen *Impulsringen*, wobei die Winkeldefinitionen aus Kapitel 2.2.1 übernommen werden.

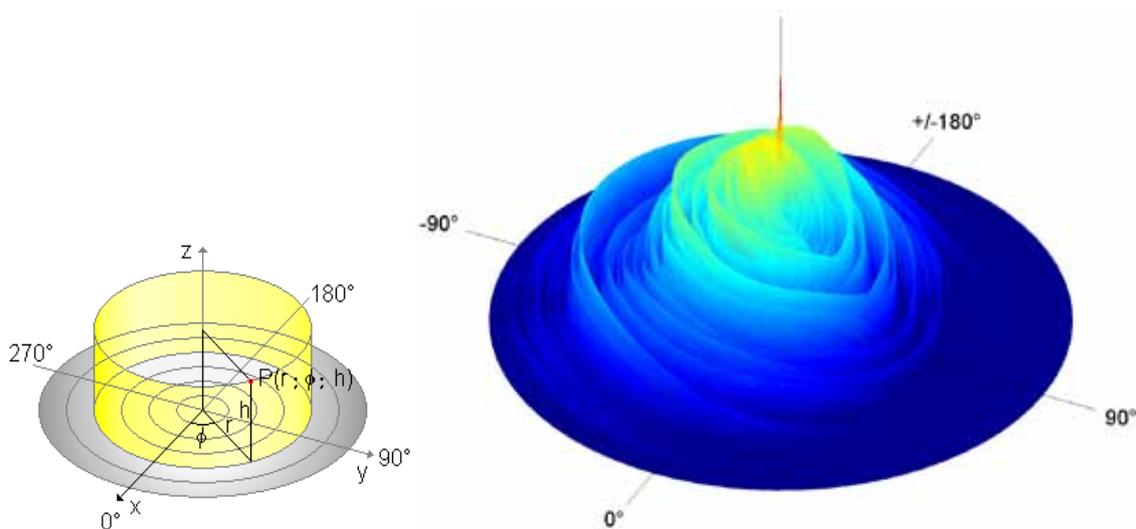


Abbildung 54: Darstellung der räumlichen Impulsantwort als Impulsringe in Zylinderkoordinaten ([WikZK])

In der 3D-Darstellung solcher *Impulsringe* sind die Reflexionen als kreisförmige „Berge“ zu erkennen. Das Maximum eines solchen „Berges“ lässt auf den Ursprung der jeweiligen Reflexion

schließen. Um diese lokalen Maxima der *Impulsringe* zu kennzeichnen, wird ein einfacher Algorithmus angewandt. Es werden hierfür die Maxima jedes *Impulsringes* ausgewertet und mit dem Mittelwert aus vorangegangenen Werten der Autokorrelationsfunktion für einen Winkelbereich von $\pm 15^\circ$ verglichen. Ist der Maximalwert um 6 dB höher als der Mittelwert der vorangegangenen Autokorrelationswerte, handelt es sich um lokales Maximum in der Autokorrelation und somit um eine Reflexion. Diese Maxima sind in den Impulsring-Darstellungen durch schwarze Punkte gekennzeichnet.

Zur genaueren Erkennung von Reflexionen werden die *Impulsringe* in der Draufsicht betrachtet. Abbildung 55 zeigt die *Impulsringe* für die ersten 10 ms nach dem Direktschall für die Quellposition Fahrer M. Danach treten keine Reflexionen mit mehr als -20 dB Pegel gegenüber dem Direktschall auf, weshalb hier eine genauere Betrachtung entfällt. Die Quellposition bei der Messung ist mit einer roten Linie angedeutet.

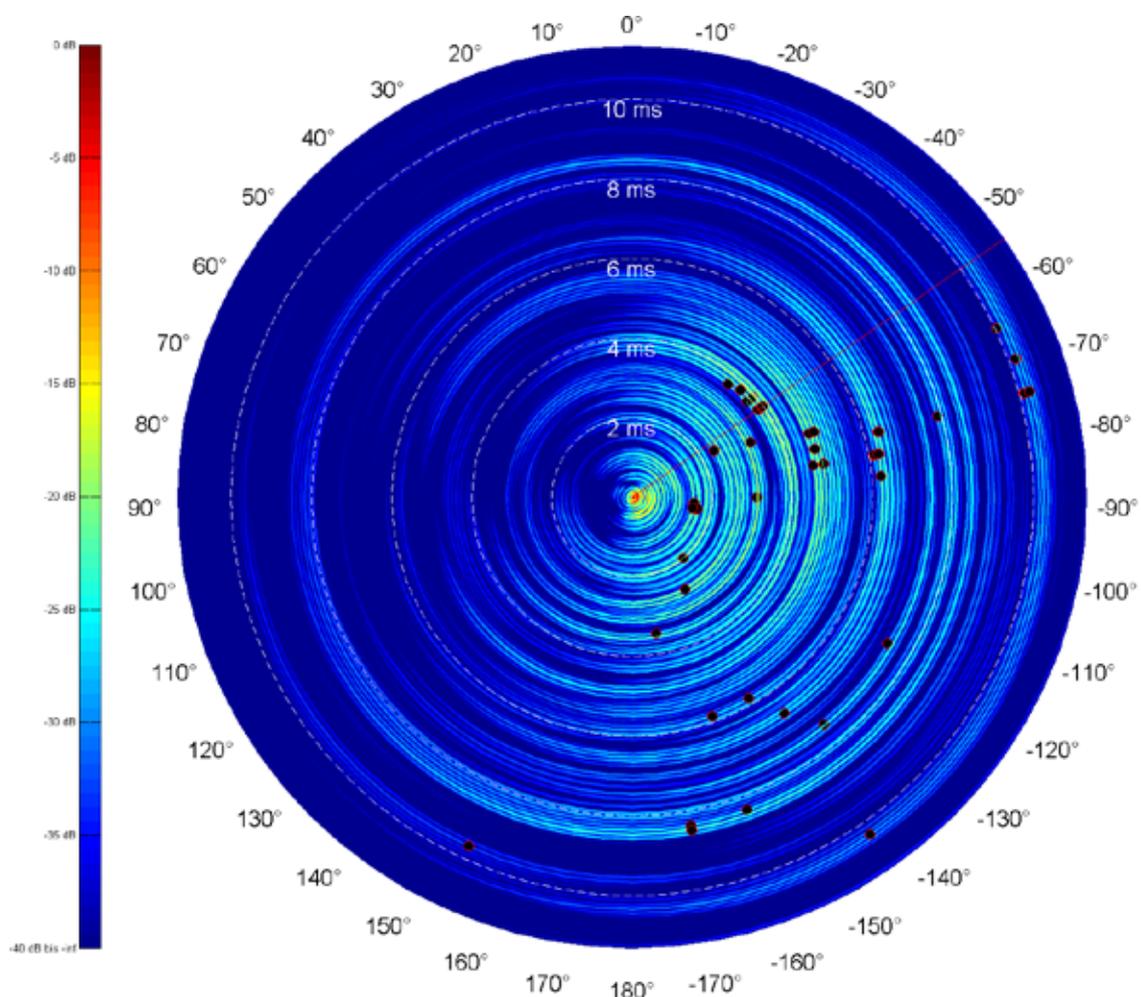


Abbildung 55: Impulsringe für die Quellposition Fahrer M für die ersten 10 ms nach dem Direktschall

Die ersten am Mikrofonarray eintreffenden Reflexionen kommen aus Richtung der Seite des PKW. Es handelt sich hierbei um Reflexionen an der Fensterscheibe der Fahrerseite. Abbildung 56 zeigt beispielhaft Reflexionspfade, welche im PKW entstehen können sowie die dadurch verursachten Laufzeiten.

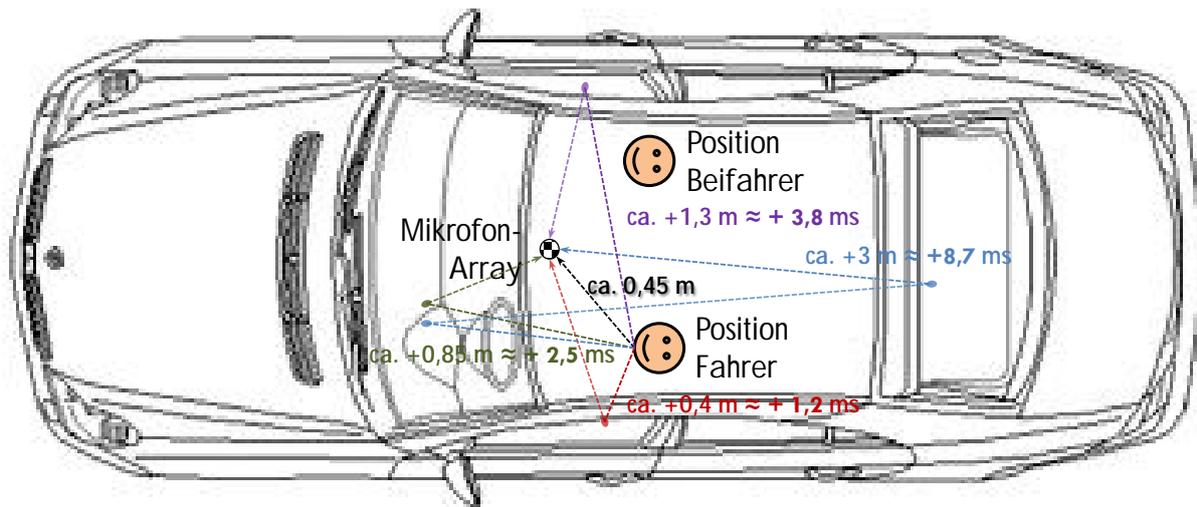


Abbildung 56: Mögliche Reflexionspfade im PKW und deren Längenunterschied zum direkten Schallweg

Reflexionen aus Richtung der Fahrzeugseite sind hauptsächlich bis 6 ms nach dem Direktschall auszumachen, hier verlängert sich der Reflexionspfad zu Fensterscheibe/Fahrersitz. Neben Reflexionen aus Richtung der PKW Seiten kommen Reflexionen auch aus Richtung der PKW Front. Hier wird der Schall an der Windschutzscheibe und dem Armaturenbrett reflektiert.

Abbildung 72 bis Abbildung 74 im Anhang V zeigen die *Impulsringe* für einen Zeitbereich bis 10 ms nach dem Direktschall für die restlichen 3 Quellpositionen (vgl. Tabelle 0–3), Abbildung 75 bis Abbildung 78 zeigen eine Vergrößerung des Zeitbereichs bis 5 ms, in welchem alle Reflexionen mit mehr als -15 dB Pegel liegen. Auch für die anderen Quellpositionen zeigen sich ähnliche Reflexionsmuster, Reflexionen kommen vor allem aus Richtung der entsprechenden Fahrzeugseite sowie der PKW Front.

In den Vergrößerungen des Bereichs bis 5 ms (Anhang V) erkennt man für die Positionen Fahrer S, M und L eine stark ausgeprägte Reflexion unmittelbar nach dem Direktschall aus Richtung der PKW Front. Für die Quellposition Beifahrer M ist diese Reflexion nicht auszumachen. Abbildung 57 zeigt eine Gegenüberstellung der *Impulsringe* der ersten Millisekunde nach dem Direktschall für die Quellpositionen Fahrer M und Beifahrer M. Die nur bei der Quellposition Fahrer M auszumachende Reflexion nach ca. 0,4 ms ist rot eingekreist.

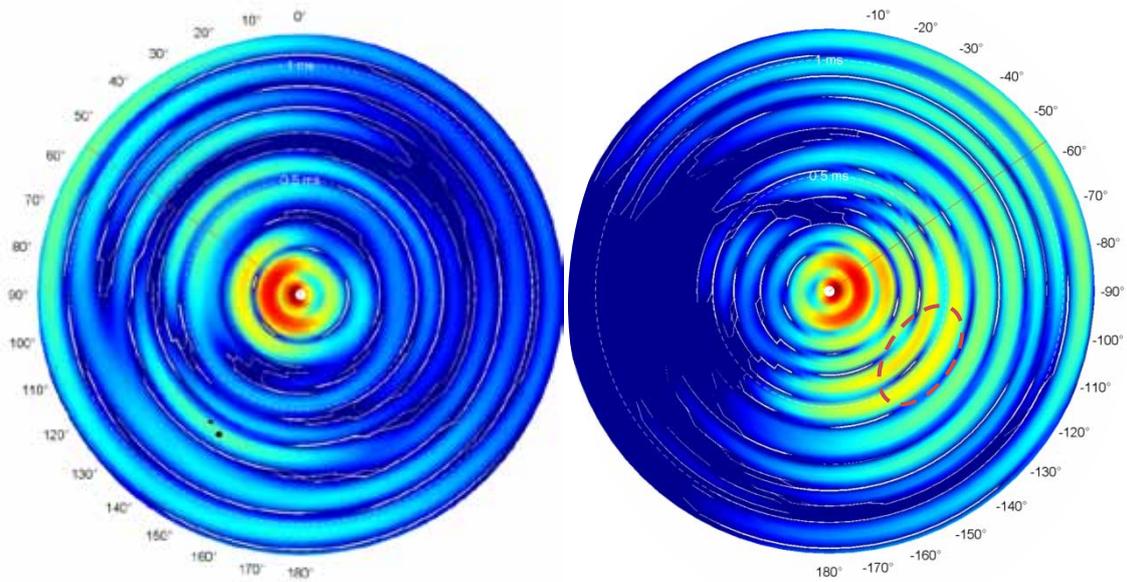


Abbildung 57: Impulsringe der ersten Millisekunde nach dem Direktschall für die Quellposition Beifahrer M (links) und Fahrer M (rechts)

Abbildung 58 zeigt das Mikrofonarray an der Position *Dachbedieneinheit*, wie es für die Messung der räumlichen Impulsantworten und der daraus gewonnenen *Impulsringe* verwendet wird. Man erkennt, dass der Rückspiegel bei der Messung nicht gerade, sondern schräg in Richtung Fahrerposition ausgerichtet ist. Der Rückspiegel befindet sich ca. 7 cm hinter dem Mikrofonarray, die in Abbildung 57 betrachtete Reflexion macht gemäß der 0,4 ms Verzögerung einen Umweg von ca. 17 cm gegenüber dem Direktschall. Diese beiden Erkenntnisse sowie die Ursprungsrichtung der Reflexion von etwa -120° lassen darauf schließen, dass der schräg ausgerichtete Rückspiegel die Ursache für den Unterschied der räumlichen Impulsantwort der ersten Millisekunde zwischen einer Quellposition an Fahrer- und Beifahrerposition ist.



Abbildung 58: Mikrofonarray und Rückspiegel bei der Mikrofonposition *Dachbedieneinheit*

Ob Schall an einem Hindernis reflektiert wird oder nicht, hängt neben dem Absorptionskoeffizienten des Materials auch vom Verhältnis der charakteristischen Länge des Hindernisses zur Wellenlänge λ des Schalls ab, der sogenannten Helmholtz-Zahl [**WikHLM**].

$$He = \frac{L}{\lambda} \quad (3.20)$$

Ist die Helmholtz-Zahl sehr viel größer als eins, kommt es zu Reflexionen. Gilt $He \ll 1$, kommt es zur Beugung des Schalls um das Hindernis herum [Dega06]. Am Rückspiegel mit einer charakteristischen Größe von etwa 25 cm werden demnach nur Frequenzen höher als 2,5 kHz reflektiert.

Für eine Betrachtung der *Impulsringe* für verschiedene Frequenzen, wird das Zeitsignal deshalb vor der Autokorrelation mit einer Bandpass Filterbank in Oktavbänder aufgeteilt. In Abbildung 79 im Anhang V sind die so berechneten *Impulsringe* der ersten Millisekunde für die Quellpositionen Fahrer M und Beifahrer M zu sehen. Gezeigt werden nur die Oktavbänder mit 2 bis 8 kHz Mittenfrequenz, für Oktavbänder mit tieferen Mittenfrequenzen ist kein Unterschied zwischen Fahrer M und Beifahrer M auszumachen.

3.3.2 Reflexionserkennung durch Schallintensität

Ein anderes Verfahren zur Detektion von Reflexionen und deren Herkunftsrichtung wird in [Pul05] für das *Spatial Impulse Response Rendering* (SIRR) vorgestellt. Hierbei werden durch Verwendung eines Mikrofonarrays Die Richtungskomponenten des Schallintensitätsvektors berechnet. Der Schallintensitätsvektor wird im Zeitbereich definiert als

$$\mathbf{I}(t) = p(t) \cdot \mathbf{v}(t) \quad (3.21)$$

mit dem skalaren Schalldruck $p(t)$ und dem Schallschnellevektor $\mathbf{v}(t)$.

In einem Kartesischen Koordinatensystem wird die Schallintensität durch ihre Komponenten in X, Y, und Z-Richtung beschrieben, welche sich wiederum aus dem Skalar des Schalldrucks und den Richtungs-Komponenten der Schallschnelle zusammensetzen.

$$\mathbf{I}(t) = I_x(t)e_x + I_y(t)e_y + I_z(t)e_z = p(t)[v_x(t)e_x + v_y(t)e_y + v_z(t)e_z] \quad (3.22)$$

In der horizontalen Ebene kann der Winkel des momentanen Schalleintritts, welcher entgegengesetzt der Richtung der momentanen Schallintensität ist, durch die X und Y-Komponente berechnet werden.

$$\phi(t) = \tan^{-1} \frac{-I_y(t)}{-I_x(t)} \quad (3.23)$$

Zur Berechnung des Schalleinfallswinkels ϕ mit den Signalen eines Mikrofonarrays, kann das Kugelsignal W als Substitution der Schalldruckkomponente verwendet werden. Der Zusammenhang zwischen den Signalen X und Y und dem Schallschnellevektor in der Horizontalen Ebene ist in Gleichung (3.24) beschrieben, wobei Z_0 die Schallkennimpedanz ist.

$$\mathbf{v}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}Z_0} \mathbf{X}'(t) \quad \text{mit} \quad \mathbf{X}'(t) = X(t)e_x + Y(t)e_y \quad (3.24)$$

Um den Schalleinfall auch in Abhängigkeit von der Frequenz betrachten zu können, wird die *Short Time Fourier Transformation* (kurz *STFT*) angewandt. Bei der *STFT* wird ein Signal in kurze

Signalausschnitte unterteilt und diese jeweils mittels diskreter Fourier Transformation in den Frequenzbereich transformiert. Da bei der *STFT* immer Zeitfenster betrachtet werden, kann die momentane Schallintensität auf diesem Wege nicht mehr betrachtet werden. Pulkki et al. verwenden daher die in [Fah89] eingeführte *Wirkintensität* $I_a(\omega)$ (engl. *Active Intensity*), welche den zeitlichen Mittelwert der momentanen Schallintensität über die Frequenz beschreibt.

In Gleichung (3.25) ist die Formel zur Berechnung der *Wirkintensität* aus den Fourier-Transformierten des Schalldrucks $P(\omega)$ und der Schallschnelle $V(\omega)$ angeführt, der Operator $*$ steht für die komplexe Konjugation.

$$I_a(\omega) = 2\text{Re}\{P^*(\omega)V(\omega)\} \quad (3.25)$$

Aus Gleichung (3.24) und (3.25) folgt die Formel zur Berechnung der frequenzabhängigen *Wirkintensität* aus den Signalen des Mikrofonarrays mit

$$I_a(\omega) = \frac{\sqrt{2}}{Z_0} \text{Re}\{W^*(\omega)X'(\omega)\}. \quad (3.26)$$

Durch die Frequenzabhängigkeit der Richtungskomponenten der *Wirkintensität* wird aus Gleichung (3.23) für einen betrachteten Zeitabschnitt

$$\phi(\omega) = \tan^{-1} \frac{-I_y(\omega)}{-I_x(\omega)}. \quad (3.27)$$

Soundroses

Für die visuelle Auswertung der *Wirkintensität* werden die gleichen Messdaten wie in Abschnitt 3.3.1 verwendet, welche mit dem künstlichen Mund als Quelle und dem Mikrofonarray an der Position Dachbedieneinheit aufgezeichnet werden. Die Darstellung erfolgt in Form von *Soundroses*, wie sie auch in raumakustischer Simulationssoftware wie z.B. CATT-Acoustics zur Verwendung kommen. Es handelt sich hierbei um eine Darstellung der an einer Empfängerposition eintreffenden Schallereignisse für einen bestimmten Zeitabschnitt. Die Darstellung erfolgt in Polarkoordinaten, der Radius entspricht dem Betrag der Schallintensität in dB und der Winkel der Schalleinfallrichtung. Die Schallintensitäten je Winkel sind auf die gesamte Schallintensität für den betrachteten Zeitbereich normiert. Es wird der Schalleinfall für 6 Zeitabschnitte von je 3 ms Länge dargestellt.

Die Zeitfenster von 3 ms Länge werden bei einer Abtastrate von 44,1 kHz durch eine *STFT* der Mikrofonarray-Signale über 128 Samples lange Ausschnitte erreicht, wobei für eine bessere Frequenzauflösung ein Zero-Padding auf 256 Samples durchgeführt wird. Vor der diskreten Fourier Transformation (DFT) werden die Zeitausschnitte mit einem Hann-Fenster gewichtet. Durch die Signallänge von 256 Samples ergibt sich bei der DFT eine Frequenzauflösung von 172,3 Hz, weshalb eine Betrachtung der *Soundroses* in Oktavbändern (wie es z.B. in CATT

Acoustics möglich ist) speziell für die tiefen Frequenzbänder nicht sinnvoll ist¹³. Die für verschiedene Frequenzen berechneten Schallintensitäten werden daher in einer Darstellung zusammengefasst.

Abbildung 59 zeigt die durch die *Wirkintensität* berechneten Soundroses für die Quellposition Fahrer M. Hier erkennt man im ersten Zeitfenster bis 3 ms, dass die Richtung des Direktschalls nicht richtig detektiert wird. Statt einem Quellwinkel von -55° (vgl. Tabelle 0–3) wird ein Einfallswinkel von -70° detektiert. Dies liegt an dem bereits in Kapitel 2.1 beschriebenen Laufzeitunterschied zwischen den Kapseln des Mikrofonarrays. Zwar wird im gleichen Kapitel auch eine Methode zum Laufzeitausgleich vorgestellt, jedoch kann diese nur angewandt werden, wenn der Schalleinfallswinkel bekannt ist, was bei einer erstmaligen Abschätzung des Schalleinfallswinkels nicht vorausgesetzt werden kann. Für einen korrekten Laufzeitausgleich müsste ein iteratives Verfahren aus Winkelabschätzung → Laufzeitausgleich → erneute Winkelabschätzung usw. durchgeführt werden, was im Rahmen dieser Arbeit nicht stattfindet.

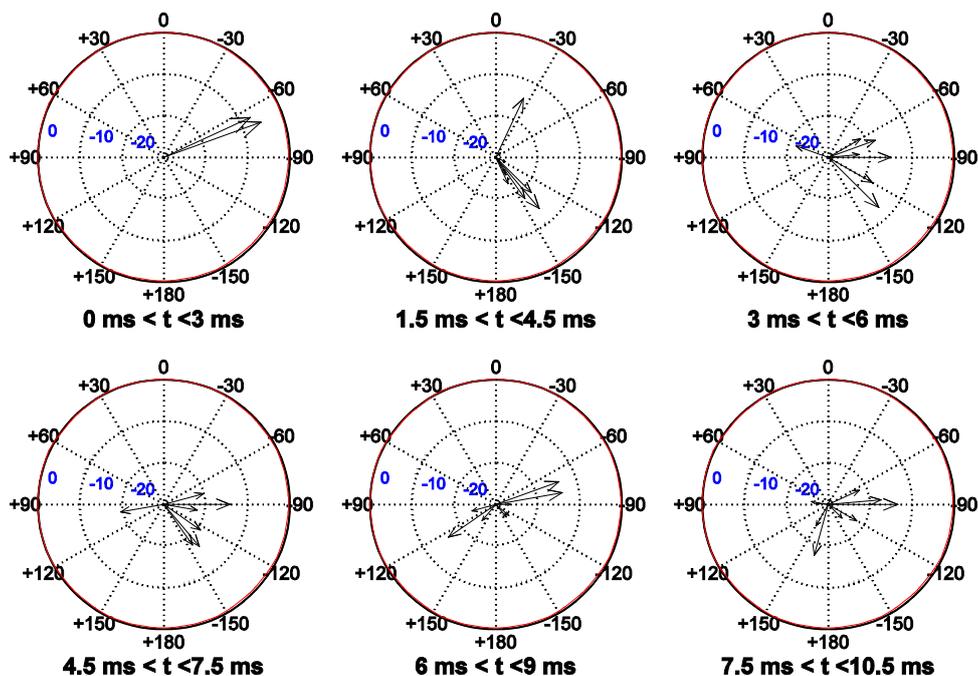


Abbildung 59: Soundroses für die Quellposition Fahrer M

So wie bei den *Impulsringen* (vgl. Abbildung 76) erkennt man auch bei den Soundroses neben dem Direktschall eine Reflexionen mit geringerer Intensität aus in etwa der Quellrichtung im Zeitbereich bis 3 ms. Diese kommt durch den kurzen Reflexionspfad über das Seitenfenster an der Fahrerseite zu Stande (vgl. Abbildung 56).

Auch in den folgenden zwei Zeitfenstern bis 6 ms kommt der reflektierte Schall hauptsächlich aus Richtung des Fahrer-Seitenfensters, was wahrscheinlich an einem

¹³ Im Oktavband mit 250 Hz Mittenfrequenz liegen bei einer DFT über 265 Samples immer nur zwei Frequenzbins, wodurch maximal zwei Schallereignisse detektiert werden können

Reflexionspfad über den Sitz oder den Boden liegt. Zusätzlich erkennt man auch Schalleinfall aus Richtung PKW-Front, welcher durch eine Reflexion an der Windschutzscheibe bzw. dem Armaturenbrett zustande kommt. Im Zeitfenster von 3 bis 6 ms bzw. 4,5 bis 7,4 ms ist auch eine Reflexion aus Richtung +90 Grad (Beifahrerseite) zu erkennen. In den letzten 2 Zeitfenstern bis 10,5 ms sind vor allem erneute Reflexionen aus Richtung des Fahrerseitenfensters und der PKW Front zu erkennen.

Die *Soundroses* für die Quellpositionen Fahrer S und L sind im Anhang VII zu finden, die folgende Abbildung 60 zeigt die *Soundroses* für die Quellposition Beifahrer M.

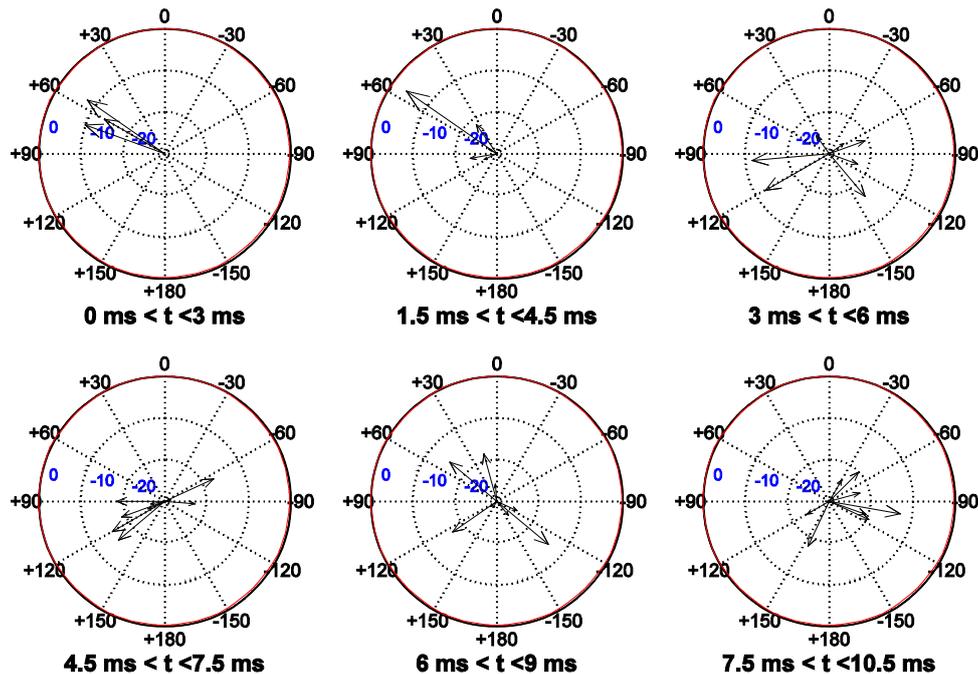


Abbildung 60: Soundroses für die Quellposition Beifahrer M

Im zweiten Zeitfenster bis 4,5 ms zeigt sich, dass kein Schalleinfall aus Richtung der PKW-Front detektiert wird. Dies deutet darauf hin, dass die in diesem Zeitfenster bei der Quellposition Fahrer M erkennbare Reflexion durch das an der Fahrerposition unterschiedlich beschaffene Armaturenbrett (Lenkrad, Anzeigen etc.) zu Stande kommt.

Die Zeitfenster von 3 bis 6 ms und 4,5 bis 7,5 ms verhalten sich ähnlich wie bei Fahrer M, die dort vorkommenden Reflexionen kommen entweder aus Richtung der Schallquelle (Seitenfenster/Sitzfläche) oder aus Richtung des gegenüberliegenden Fahrer-Seitenfensters. Im Zeitfenster von 6 bis 9 ms nach dem Direktschall unterscheidet sich das Reflexionsmuster, der einfallende Schall kommt sowohl aus Richtung der Front- als auch der Heckscheibe (vgl. Abbildung 56). Im letzten Zeitabschnitt bis 10,5 ms kommt der reflektierte Schall vor allem aus Richtung der Fahrer-Seite.

3.3.3 Zusammenfassung PKW-Akustik

In diesem Kapitel werden durch die Verwendung eines Mikrofonarrays die im PKW auftretenden Reflexionen klassifiziert. Es zeigt sich, dass im PKW Innenraum relevante Reflexionen in den ersten 10 ms (-20 dB) bzw. 5 ms (-15 dB) nach dem Direktschall eintreffen. Bei der typischen Mikrofonposition *Dachbedieneinheit* kommen Reflexionen in diesem Zeitraum vor allem durch die Seitenfenster an der jeweiligen Sprecherposition (FahrerIn oder BeifahrerIn) sowie über das Armaturenbrett und die Windschutzscheibe zu Stande. Für etwaige Reflexionen in der ersten Millisekunde ist auch die Position und Ausrichtung des Rückspiegels ausschlaggebend. Ob diese Reflexion einen positiven oder negativen Einfluss auf die Sprachübertragung haben, wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht festgestellt.

4 SIMULATION MIT CATT-ACOUSTICS

Die in Kapitel 3.3 gewonnenen Erkenntnisse über die Fahrzeugakustik sollen auch durch die Simulation in einer Raumakustiksoftware nachvollzogen werden. Als Modellierungstechnik wird die Methode der Strahlenverfolgung (engl. *Raytracing*) verwendet. Hierbei wird die kugelförmige Abstrahlung einer Schallquelle durch einzelne „Schallstrahlen“ angenähert, welche mit von der Richtcharakteristik abhängigem Pegel in alle Richtungen ausgesendet werden. Beim Eintreffen dieser Schallstrahlen auf ein Objekt kommt es zu einer Reflexion. Die Anzahl dieser Reflexionen welche ein Schallstrahl während seiner Ausbreitung erfährt, wird als Ordnung bezeichnet. Den Objekten werden für die Simulation frequenzabhängige Absorptionskoeffizienten zugewiesen, welche angeben wie stark ein Schallstrahl bei einer Reflexion abgeschwächt wird.

Ein Nachteil der Strahlenverfolgung ist, dass die Diffusion beim Auftreffen von Schall an rauen Oberflächen, in Abhängigkeit von der Anzahl der berechneten Schallstrahlen, nur bedingt berücksichtigt werden kann. Weiters kann das Beugungsphänomen (vgl. Kapitel 3.3.1) bei diesem Simulationsverfahren nicht berücksichtigt werden.

Neben der Strahlenverfolgung gibt es auch noch andere Verfahren z.B. die Finite- Elemente-Methode (kurz FEM) oder auch analytische Verfahren. In [Har07] erfolgt ein Vergleich dieser drei Verfahren für ein sehr vereinfachtes Modell eines PKW Innenraumes als Quaderform. Die Studie zeigt, dass die berechnete Schalldruckverteilung innerhalb des simulierten Quaderraumes mit der Methode der Strahlenverfolgung (bis zur Ordnung 3) ein sehr ähnliches Ergebnis wie die um vieles aufwändigere analytische Methode und eine EFM liefert.

Ob die Strahlenverfolgung auch bei einem etwas erweiterten Modell eines PKW Innenraumes ähnlich gute Ergebnisse liefert, soll in diesem Kapitel festgestellt werden.

4.1 Simulationsmodell

Als Simulationssoftware wird CATT Acoustics in der Version 8 verwendet. Dieses Programm benutzt eine erweiterte Form der Strahlenverfolgung, benannt *Randomized Tail-corrected Cone-tracing* [Dal95], auf welche im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen wird.

Das für die Simulation erstellte Modell des PKW Innenraumes wird auf das Wesentlichste reduziert und ist in Abbildung 61 zu sehen. Neben dem Fahrer- und dem Beifahrersitz sowie der Rückbank, dem Armaturenbrett und der Mittelkonsole wird auch der schräggestellte Rückspiegel im Simulationsmodell berücksichtigt. Aus den in Kapitel 3.3 gewonnenen Erkenntnissen geht hervor dass, dieser besonders in der ersten Millisekunde nach Eintreffen des Direktschalls eine starke Reflexion bewirkt.

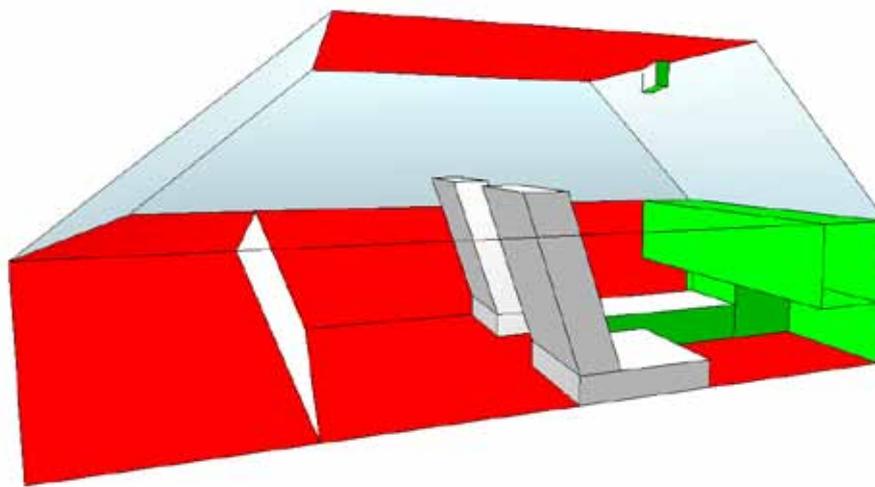


Abbildung 61: Vereinfachtes Modell des PKW Innenraumes für die Simulation

Für die verschiedenen Objekte werden Absorptionskoeffizienten aus einer Materialtabelle gewählt, welche den im PKW verwendeten Materialien nahe kommen. Es gibt insgesamt 4 Materialien, welche in Abbildung 61 mit einer jeweils unterschiedlichen Farbe dargestellt sind: Leder (weiß), Armatur (grün), Stoff (rot) und Glas (hellblau). Die genauen Absorptionskoeffizienten sind im Anhang VIII aufgelistet.

Die Position dieser Quelle bei der Simulation entspricht in etwa der Position Fahrer M im PKW (Anhang III, Tabelle 0–3). Die Richtcharakteristik dieser „Schallstrahlers“ wird der aus [Far03] entnommenen Richtcharakteristik eines künstlichen Mundes nachempfunden (vgl. Abbildung 23). Das virtuelle Mikrofon wird wie im PKW an der Position *Dachbedieneinheit* positioniert (vgl. Abbildung 15). Für die Simulation wurden 1000 Schallstrahlen verwendet, welche bis zur Ordnung 3 verfolgt werden.

4.2 Simulationsergebnisse

Die Software CATT Acoustics bietet umfangreiche Möglichkeiten der Auswertung einer raumakustischen Simulation. Im Rahmen dieser Arbeit werden die *Soundroses*, die

Reflektogramme und die berechneten Werte für die Nachhallzeit ermittelt und mit den akustisch gemessenen Daten verglichen.

4.2.1 Nachhallzeit

Die Nachhallzeit wird in CATT Acoustics sowohl als T_{30} und als T_{15} berechnet. Hierfür wird die Zeitspanne, welche für einen Pegelabfall von -5 dB bis -35 dB (T_{30}) bzw. -20 dB (T_{15}) benötigt wird, gemessen und anschließend multipliziert um die Nachhallzeit RT_{60} zu erhalten. Diese Nachhallzeit RT_{60} ist definiert als jene Zeit, die der Schalldruckpegel in einem Raum benötigt, um sich nach einem eingeschwungenen akustischen Zustand um 60 dB zu verringern [ÖNO].

In Abbildung 62 ist die durch die Strahlenverfolgung in Oktavbändern berechnete Nachhallzeit T_{30} für das Simulationsmodell angeführt. Ebenfalls angeführt sind die in [Ton02] gemessenen Nachhallzeiten T_{30} eines realen PKWs ähnlicher Bauart bei unterschiedlicher Personenbelegung.

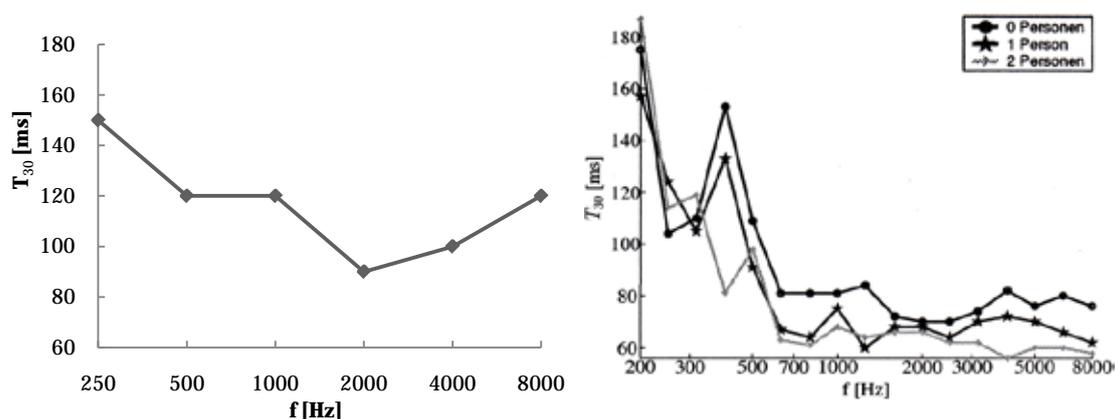


Abbildung 62: Berechnete Nachhallzeit T_{30} des Simulationsmodells (links) und gemessene Nachhallzeiten T_{30} eines realen PKW bei unterschiedlicher Personenbelegung (rechts, aus [Ton02])

Vergleicht man die in der Simulation gewonnenen Werte für die Nachhallzeit mit den real gemessenen Werten eines PKWs ohne Insassen, fällt dort vor allem die lange Nachhallzeit von ca. 160 ms bei 400 Hz auf. Verantwortlich dafür ist eine Resonanzüberhöhung, verursacht durch eine von der Fahrzeuggeometrie abhängige Raummode. In Kapitel 3.2 wurden bereits für den PKW, welcher für dieser Arbeit verwendet wurde, die zu erwarteten Raummoden berechnet – auch hier zeigte sich eine ausgeprägte Mode bei ca. 400 Hz (vgl. Abbildung 51).

In [Mur98] wird angemerkt das geometrische Modelle zur raumakustischen Simulation zwar gute Ergebnisse für hohe Frequenzen liefern, durch die Annäherung der Schallwellen als Strahlen versagen die Modelle aber im Bassbereich. Raummoden, spezielle bei kleinen Räumen, wirken sich hier stark auf die Schalldruckverteilung aus werden aber durch das Strahlenmodell nicht berücksichtigt.

Beim Simulationsmodell liefert im Mittel eine höhere Nachhallzeit als die reale Messung, speziell zu hohen Frequenzen. Der in [Ton02] vermessene PKW ist dem simulierten PKW zwar in der Größe sehr ähnlich, jedoch wird dort keine Aussage über die Beschaffenheit des Innenraumes getroffen. So ist es möglich, dass die Sitze statt mit Leder (wie im Simulationsmodell) mit Stoff überzogen sind, was die kürzere Nachhallzeit bei hohen Frequenzen begründen würde. Auch wird im Simulationsmodell nicht berücksichtigt dass die Die Sitze unter dem Überzug aus verschiedenen Lagen Schaumstoff bestehen, welche als Absorber auch für tiefere Frequenzen wirken.

4.2.2 Reflektogramm

Die Simulationmethode der der Strahlenverfolgung ermöglicht eine Verfolgung der Schallstrahlen um Reflexionen zu erkennen. Eine Möglichkeit der Analyse ist das Reflektogramm. Hier wird Pegel und Zeitpunkt des Eintreffens von Schallstrahlen an einer Empfängerposition dargestellt. Abbildung 63 zeigt das Reflektogramm der ersten 50 ms nach dem Direktschall, welches bei einer simulierten Schallquelle an der Position Fahrer M an der Empfängerposition *Dachbedieneinheit* entsteht. Ein Kreis markiert den Direktschall, blaue Balken sind diskrete Reflexionen erster und zweiter Ordnung, rote Balken sind diffuse Reflexionen erster Ordnung und schwarze Balken Reflexionen höherer Ordnungen.

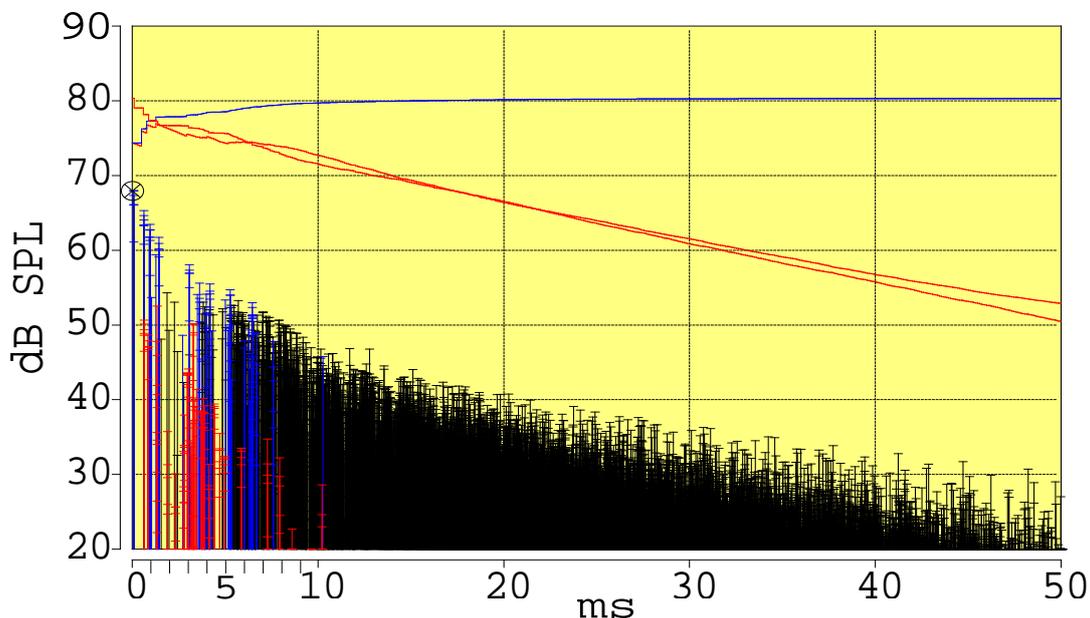


Abbildung 63: Reflektogramm der Simulation für die ersten 50 ms nach dem Direktschall

Bezogen auf einen Direktschallpegel von ca. 68 dB an der Mikrofonposition, liegen alle Reflexionen mit -20 dB Pegel in einem Zeitfenster bis 10 ms. Alle Reflexionen mit ca. -15 dB Pegel gegenüber dem Direktschall liegen in einem Zeitfenster bis 5 ms. Diese Beobachtungen werden auch in Kapitel 3.3.1 gemacht, was bereits eine gute Übereinstimmung des Simulationsmodelles mit der realen Messung belegt.

Vergleicht man das Reflexionsmuster der Simulation in den ersten 5 ms mit den gemessenen *Impulsringen* im Anhang V (Abbildung 76), erkennt man ebenfalls das Auftreten von ausgeprägten Reflexionsgruppen bei ca. 4 und 5 ms, sowie eine Gruppe von schwachen Reflexionen zwischen 2 und 3 ms nach dem Direktschall.

4.2.3 Soundroses

Noch interessanter als eine reine zeitliche Betrachtung des Reflexionseintreffens, ist die Bestimmung der Herkunftsrichtung. Für eine solche Analyse, wurden in Kapitel 3.3.2 bereits die *Soundroses* eingeführt. Anders als mit dem Mikrofonarray, wo eine Richtungsdetektion nur für die horizontale Ebene möglich ist, ermöglicht die Simulation mit der Strahlenverfolgung auch die Bestimmung des Elevationswinkels.

Abbildung 64 zeigt die *Soundroses*, welche bei einer Simulation in CATT Acoustics berechnet werden, für das Oktavband mit 1 kHz Mittenfrequenz. Der Kopf in der Kreismitte symbolisiert den Empfänger, also das virtuelle Mikrofon an der Position *Dachbedieneinheit*. Die verschiedenen Kreisradien bedeuten jeweils einen Pegelunterschied von 10 dB, wobei der äußere Ring (rot) die 0 dB Marke und der innerste Ring (ebenfalls rot) die -30 dB Marke gegenüber der Gesamtenergie pro Zeitabschnitt kennzeichnet. Die betrachteten Zeitfenster wurden gleich gewählt wie bei dem im PKW gemessenen *Soundroses* (Abbildung 59), für einen direkten Vergleich sind noch die Bezeichnungen für die Azimutwinkel zu beachten: Fr=0° Azimut, Rt=-90° Azimut, Lt=+90° Azimut, Bk=±180° Azimut. Ebenfalls ist zu beachten ist, dass in Abbildung 64 nur die *Soundroses* für das 1 kHz Band dargestellt werden, während die in Kapitel 3.3.2 berechneten *Soundroses* den gesamten Frequenzbereich von 180 Hz bis 11 kHz umfassen.

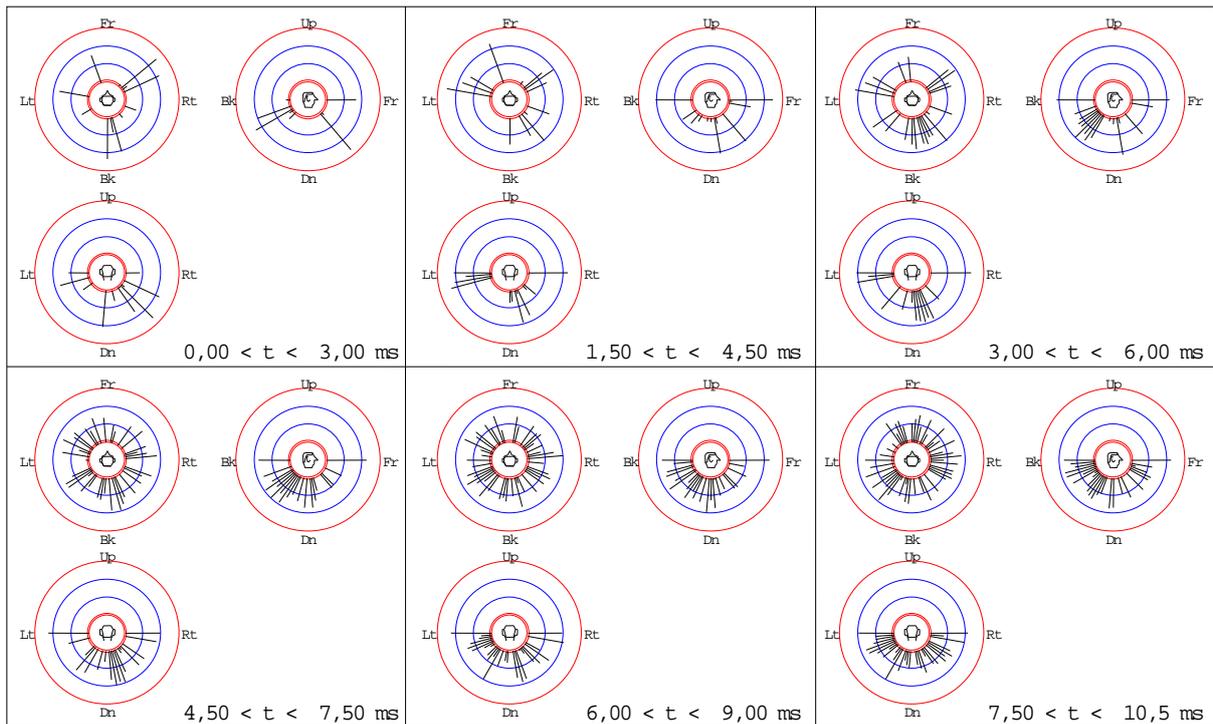


Abbildung 64: Soundroses der Simulation der Quellposition Fahrer M für das Oktavband 1 kHz

Im ersten Zeitabschnitt bis 3 ms sind neben dem Eintreffen des Direktschalls und einer Reflexion aus etwa der gleichen Richtung (kurzer Reflexionspfad über Seitenfenster) auch noch Reflexionen aus Richtung der PKW-Front, dem PKW-Heck und auch der gegenüberliegenden Beifahrerseite zu sehen.

Die Reflexionen aus Richtung der PKW-Front scheinen durch den in der Simulation berücksichtigten Rückspiegel zustande zu kommen, was auch den flachen Einfallswinkel in der Elevation begründen würde. Die Reflexion aus Richtung des Hecks kommt durch einen Reflexionspfad am Beifahrersitz zu Stande, die Reflexion von der Beifahrerseite wird durch das dortige Seitenfenster bewirkt.

Die von unten am virtuellen Mikrofon ankommenden Reflexionen im zweiten und dritten Zeitabschnitt kommen von den Sitzflächen bzw. dem Armaturenbrett, es kommt auch zu weiteren Reflexionen von der Beifahrerseite.

In den letzten drei Zeitabschnitten sind die eintreffenden Reflexionen nicht mehr konkret zuzuweisen, es kommt zu einem fast diffusen Schallfeld.

In Kapitel 3.3.1 wurde in Abbildung 57 der Unterschied der *Impulsringe* zwischen den Quellposition Fahrer M und Beifahrer M in der 1 ms nach dem Direktschall aufgezeigt und vermutet, dass der schräggestellte Rückspiegel dafür verantwortlich ist. Um dies mit dem Simulationsmodell zu überprüfen, wird auch die Quellposition Beifahrer M simuliert. Abbildung 65 zeigt die daraus berechneten Soundroses.

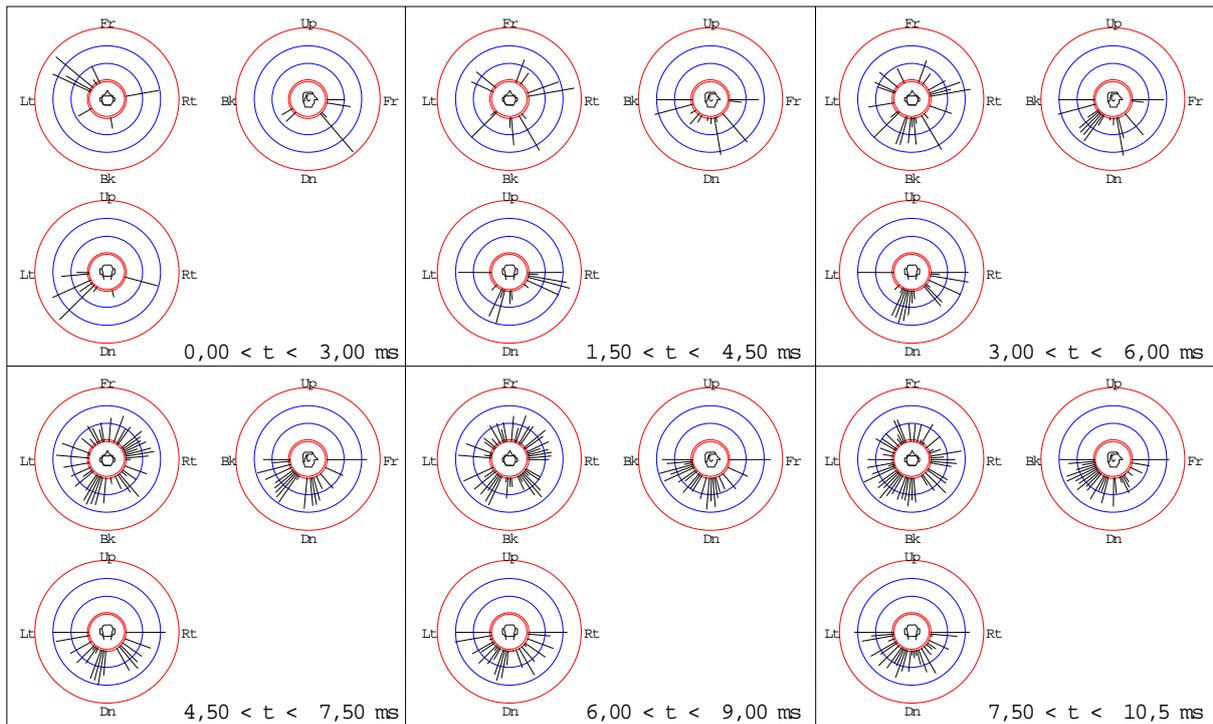


Abbildung 65: Soundroses der Simulation der Quellposition Beifahrer M für das Oktavband 1 kHz

Betrachtet man die Darstellung im ersten Zeitfenster im Vergleich mit Abbildung 64, erkennt man, dass die Reflexion, welche durch den schräg gestellten Rückspiegel zustande kommt, bei einer Schallquelle an der Beifahrerseite nicht im gleichen Maße (wie bei einer Quellposition auf der Fahrerseite) am virtuellen Mikrofon eintrifft.

4.3 Zusammenfassung Simulation

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass ein vereinfachtes Modell eines PKW nicht ausreicht um sich mit echten Messungen deckende Ergebnisse zu erzielen. Die akustische Simulation des PKW Innenraumes kann aber hilfreich zur Ursachenfindung sein. So konnte z.B. die Auswirkung eines schräg ausgerichteten Rückspiegels auf das Reflexionsmuster in der 1 ms nach dem Direktschall validiert werden. Für Optimierungsaufgaben wie das Auffinden einer optimalen Mikrofonposition, reicht eine vereinfachte Simulation jedoch nicht aus.

5 DARSTELLUNG

Ein mit dem Messbogen erfasstes 3D-Polardiagramm kann als Kombination von *Kugelflächenfunktionen* (engl. *Spherical Harmonics*) dargestellt werden. Die *Kugelflächenfunktionen* können für einen beliebigen Punkt auf einer Kugelfläche ausgewertet werden, wodurch eine kontinuierliche Darstellung möglich ist. Diese Kapitel behandelt die die Zerlegung einer Richtcharakteristik in *Kugelflächenfunktionen*, welche für eine anschließende Rekombination notwendig ist, und zeigt die Probleme auf, die durch die Messdatenerfassung auf einer begrenzten Kugelfläche entstehen.

5.1 Kugelflächenfunktionen

Die *Kugelflächenfunktionen* Y_n^m bilden ein orthogonales, vollständiges Funktionensystem auf der Einheitskugel und setzen sich aus den Legendre Polynomen P_n^m und kreisharmonischen Funktionen zusammen, wobei n als Ordnung und m als Grad bezeichnet wird (5.1).

$$Y_n^m(\varphi, \theta) = \begin{cases} \sqrt{\frac{(2n+1)(n-m)!}{4\pi(n+m)!}} P_n^m(\cos\theta) \sqrt{2 - \delta_{m0}} \cos(m\varphi) & \text{für } m \geq 0 \\ \sqrt{\frac{(2n+1)(n-m)!}{4\pi(n+m)!}} P_n^m(\cos\theta) \sqrt{2} \sin(m\varphi) & \text{für } m < 0 \end{cases} \quad (5.1)$$

Die Orthogonalitätsrelation der *Kugelflächenfunktionen* lautet [MatSph]:

$$\int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} Y_n^m(\varphi, \theta) Y_{n'}^{m'}(\varphi, \theta) \sin\theta \, d\theta \, d\varphi = \delta_{m,m'} \delta_{n,n'}. \quad (5.2)$$

Nur das Produkt zweier identer *Kugelflächenfunktionen* $Y_n^m = Y_n^{m'}$ integriert über die ganze Kugeloberfläche liefert ein Ergebnis ungleich Null. In Abbildung 66 sind die *Kugelflächenfunktionen* bis zur Ordnung $n = 4$ dargestellt.

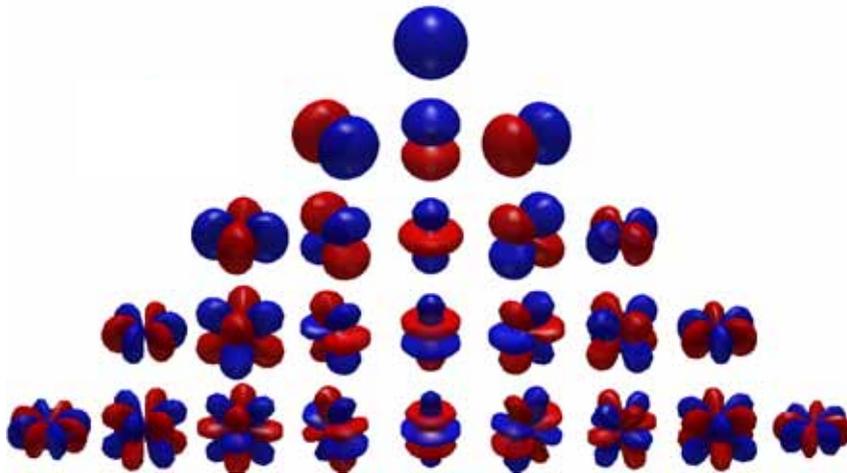


Abbildung 66: *Kugelflächenfunktionen* von Ordnung $n = 0$ (erste Zeile) bis $n = 4$ (letzte Zeile) bzw. von Grad $m = -4$ (linke Spalte) bis Grad $m = 4$ (rechte Spalte)

Die in dieser Arbeit mehrfach genannten Richtcharakteristika erster Ordnung setzen sich aus den *Kugelflächenfunktionen* der ersten zwei Zeilen zusammen. So würde z.B. eine gleichgewichtete Summe der *Kugelflächenfunktionen* erster Ordnung (Kugel) und zweiter Ordnung (Acht) die Richtcharakteristik Niere ergeben.

Auf dieser Weise kann jede räumlich bandbegrenzte Funktion $x(\boldsymbol{\theta})$ auf der Kugeloberfläche, wie z.B. Richtcharakteristik eines Mikrofones, durch eine gewichtete Summe von *Kugelflächenfunktionen* bis zu einer endlichen Ordnung $n = N$ beschrieben werden (5.3). Die Abhängigkeit von Azimut und Elevation wird im folgenden als $\boldsymbol{\theta} = (\varphi, \theta)$ bezeichnet.

$$x(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n \gamma_{nm} Y_n^m(\boldsymbol{\theta}) \quad (5.3)$$

Die Gewichte γ_{nm} werden Expansionskoeffizienten genannt und können in einem Vektor $\boldsymbol{\gamma}_N = (\gamma_{0,0}, \gamma_{1,-1}, \gamma_{1,0}, \gamma_{1,1}, \dots, \gamma_{N,N})^T$ zusammengefasst werden. Fasst man auch die *Kugelflächenfunktionen* bis zur Ordnung N in einem Vektor $\mathbf{y}_N(\boldsymbol{\theta})$ zusammen, kann $x(\boldsymbol{\theta})$ als inneres Vektorprodukt beschreiben werden, wie es Gleichung (5.4) zeigt.

$$x(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{y}_N(\boldsymbol{\theta})^T \boldsymbol{\gamma}_N \quad (5.4)$$

mit $\mathbf{y}_N(\boldsymbol{\theta})^T = [\gamma_0^0(\boldsymbol{\theta}), \gamma_1^{-1}(\boldsymbol{\theta}), \gamma_1^0(\boldsymbol{\theta}), \gamma_1^1(\boldsymbol{\theta}), \dots, \gamma_N^N(\boldsymbol{\theta})]$

Bei der räumlichen Abtastung wird an bestimmten Stellen auf einer Kugelfläche eine endliche Anzahl von L Messwerten, im Rahmen dieser Arbeit Werte für die Mikrofon-Empfindlichkeit, erfasst (vgl. Kapitel 2.2.1). Schreibt man diese an L Punkten gemessenen Werte in einen Vektor $\mathbf{x} = [x(\boldsymbol{\theta}_1), x(\boldsymbol{\theta}_2), \dots, x(\boldsymbol{\theta}_L)]$ und schreibt die an diesen Punkten ausgewerteten Vektoren $\mathbf{y}_N(\boldsymbol{\theta})^T$ in eine $L \times (N + 1)^2$ Matrix

$$\mathbf{Y}_N = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_N(\boldsymbol{\theta}_1)^T \\ \vdots \\ \mathbf{y}_N(\boldsymbol{\theta}_L)^T \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

kann Gleichung (5.3) für die Abtastpunkte \mathbf{x} in Matrix-Vektor-Form geschrieben werden.

$$\mathbf{x} = \mathbf{Y}_N \boldsymbol{\gamma}_N. \quad (5.6)$$

5.1.1 Zerlegung in Kugelflächenfunktionen

Kennt man in Gleichung (5.6) den Messwertvektor \mathbf{x} sowie die Matrix \mathbf{Y}_N mit den ausgewerteten *Kugelflächenfunktionen*, kann der Expansionskoeffizientenvektor $\boldsymbol{\gamma}_N$ durch eine Matrixinversion gewonnen werden (5.7). Dieser Vorgang wird als Zerlegung in *Kugelflächenfunktionen* bezeichnet (engl. *Spherical Harmonics Decomposition*).

$$\boldsymbol{\gamma}_N = \mathbf{Y}_N^{-1} \mathbf{x} \quad (5.7)$$

Eine direkte Inversion der Matrix \mathbf{Y}_N ist meist nicht möglich, die Voraussetzung dafür ist eine quadratische nichtsinguläre Matrix ist. Da die Matrix \mathbf{Y}_N im Allgemeinen rechteckig ist, wird daher die Pseudo-Inverse \mathbf{Y}_N^\dagger gebildet. Gleichung (5.7) ändert sich dadurch zu

$$\boldsymbol{\gamma}_N = \mathbf{Y}_N^\dagger \mathbf{x}. \quad (5.8)$$

Die Pseudoinverse \mathbf{Y}_N^\dagger kann je nach Dimension der Rechtecksmatrix \mathbf{Y}_N entweder als Linksinverse $(\mathbf{Y}_N \mathbf{Y}_N^T)^{-1} \mathbf{Y}_N^T$ oder als Rechtsinverse $\mathbf{Y}_N (\mathbf{Y}_N^T \mathbf{Y}_N)^{-1}$ angewandt werden. Je nach Anwendung spricht man von Approximation an oder Interpolation [Zot09].

Approximation

Gibt es mehr Messwerte als *Kugelflächenfunktionen* (bis zur Ordnung N), kann keine exakte Lösung berechnet werden. Deshalb wird bei der Approximation eine gewichtete Kombination der ausgewerteten *Kugelflächenfunktionen* bestimmt, welche die gemessenen Werte annähert. Diese Annäherung geschieht mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate (engl. *method of least*

squares). Bei einem Messwertvektor \mathbf{x} und einem Expansionskoeffizientenvektor $\boldsymbol{\gamma}_N$ wird der Quadratische Fehler $\|\mathbf{x} - \mathbf{Y}_N \boldsymbol{\gamma}_N\|^2$ zu minimiert.

Bei einem Abtast-Raster wie z.B. dem *EAR*-Raster, bei dem die Messpunktdichte an den Polkappen höher ist als am Äquator, muss eine gewichtete Methode der kleinsten Fehlerquadrate angewandt werden. Der Fehler, welcher durch eine diskrete Abtastung entsteht wird somit gleichmäßig über alle Abtastpunkte verteilt. Durch die bereits in Kapitel 3.1.2 vorgestellten Flächengewichte, wird der Fehler entsprechend der abgedeckten Fläche gewichtet. Die Approximation des Messwertvektors durch *Kugelflächenfunktionen* wird durch die Multiplikation mit der Linksinversen erreicht, wobei die Flächengewichte \mathbf{w} als Diagonalmatrix in die Berechnung eingehen (5.9).

$$\boldsymbol{\gamma}_N = (\mathbf{Y}_N \text{diag}\{\mathbf{w}\} \mathbf{Y}_N^T)^{-1} \mathbf{Y}_N^T \text{diag}\{\mathbf{w}\} \mathbf{x} \quad (5.9)$$

Das Ergebnis einer solchen Zerlegung durch Approximation ist der Expansionskoeffizientenvektor $\boldsymbol{\gamma}_N$. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Approximation verwendet, die nachfolgende Interpolation sei nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

Interpolation

Gibt es weniger Messwerte als *Kugelflächenfunktionen* (bis zur Ordnung N), gibt es unendlich viele Lösungen. Um eine Lösung zu finden wird die Norm des Expansionskoeffizientenvektors $\|\boldsymbol{\gamma}_N\|^2$ minimiert. Dies geschieht durch Anwendung der Pseudoinversen als die Rechtsinverse, was in Gleichung (5.10) zu sehen ist.

$$\boldsymbol{\gamma}_N = \mathbf{Y}_N (\mathbf{Y}_N^T \mathbf{Y}_N)^{-1} \mathbf{x} \quad (5.10)$$

Rekombination

Durch Kenntnis der Expansionskoeffizienten kann z.B. eine gemessene Richtcharakteristik kontinuierlich dargestellt werden. Für eine Darstellung werden die *Kugelflächenfunktionen* an beliebigen Stellen ausgewertet und mit den Expansionskoeffizienten gemäß Gleichung (5.6) multipliziert, wodurch sich ein neuer Wertevektor \mathbf{x}' ergibt.

$$\mathbf{x}' = \mathbf{Y}'_N \boldsymbol{\gamma}_N \quad (5.11)$$

5.2 Abtast-Strategien

Wie in Kapitel 2.2.1 bereits beschreiben wurde, wird für die Messungen im Rahmen dieser Arbeit ein *EAR*-Raster verwendet, welches auf einer ganzen Kugeloberfläche $L = 648$ Abtastpunkte besitzt. Wichtig für die Bildung der Pseudo-Inversen ist die Invertierbarkeit, welche von der Konditionszahl abhängt. Um numerische Probleme zu vermeiden, muss für die Konditionszahl folgende Bedingung erfüllt sein:

$$\kappa(\mathbf{Y}_N^T \mathbf{Y}_N) \ll \infty. \quad (5.12)$$

Für das *EAR*-Raster mit 648 Abtastpunkten wird in [Pom08] die Konditionszahl der Pseudoinversen in Abhängigkeit von der Ordnung N der *Kugelflächenfunktionen* berechnet. Es zeigt sich, dass die Konditionszahl $\kappa(\mathbf{Y}_N^T \mathbf{Y}_N)$ bis zur Ordnung $N = 17$ kleiner als 11 ist, womit Gleichung (5.12) erfüllt ist. Ab einer Ordnung von $N = 18$ steigt die Konditionszahl schlagartig an. Mit der Verwendung dieses *EAR*-Rasters, kann also in *Kugelflächenfunktionen* bis zur 17. Ordnung zerlegt werden, ohne dass es zu numerischen Problemen kommt.

Ein anderes Raster bei dem die Meridiane sequentiell vermessen werden können (vgl. Abschnitt 2.2.1) wäre z.B. das *Equiangular*-Raster. Für dieses wird in [Sne94] der Zusammenhang zwischen Anzahl an Abtastpunkten L und maximaler Ordnung N der *Kugelflächenfunktionen* mit Gleichung (5.13) beschreiben.

$$L = 4(N + 1)^2 \quad (5.13)$$

Mit einem *Equiangular*-Raster kann also bei gleicher Messpunktanzahl nur in *Kugelflächenfunktionen* bis zur 12. Ordnung zerlegt werden, weshalb man sich bei dieser Arbeit für das *EAR*-Raster entschieden hat.

5.3 Kugelflächenfunktionen auf begrenzten Kugelflächen

Wie bereits in Kapitel 2.2.1 beschreiben, ist im PKW eine Messung über eine komplette Kugelfläche nicht möglich. Je nach Mikrofonposition kann die Mikrofon-Richtcharakteristik nur auf einer Drittelkugel (*Dachbedieneinheit*) oder Viertelkugel (*Handgriff Fahrer*) abgetastet werden.

In Gleichung (5.2) wurde gezeigt, dass die *Kugelflächenfunktionen* auf der Einheitskugel orthogonal sind. Für den in Gleichung (5.4) definierten Vektor \mathbf{y}_N , in welchem die *Kugelflächenfunktionen* bis zur Ordnung N enthalten sind, lautet die Orthogonalitätsrelation

$$(\mathbf{y}_N, \mathbf{y}_N^T)_S = \mathbf{G} = \mathbf{I}, \quad (5.14)$$

wobei das innere Vektorprodukt $(\cdot, \cdot)_S$ der Integration des Produktes der *Kugelflächenfunktionen* über die Einheitskugel S entspricht. Das Ergebnis dieses Vektorproduktes ist die Gram-Matrix \mathbf{G} , welche im Falle von Orthogonalität der Einheitsmatrix entspricht. Bei Integration über eine Teilkugelfläche \tilde{S} ist die Orthogonalitätsrelation nicht mehr gültig, die Gram-Matrix \mathbf{G} ist ungleich der Einheitsmatrix (5.15).

$$(\mathbf{y}_N, \mathbf{y}_N^T)_{\tilde{S}} = \mathbf{G} \neq \mathbf{I} \quad (5.15)$$

Für eine Zerlegung von auf einer Teilkugel gemessenen Richtcharakteristika müssen daher neue Basisfunktionen gefunden werden, welche auf dieser Teilkugelfläche orthogonal sind.

5.3.1 Neue Basisfunktionen für begrenzten Kugelflächen

In [Pom09] werden mehrere Möglichkeiten erwähnt, wie für eine Teilkugelfläche neue Basisfunktionen gewonnen werden können. Verwendet und zusammengefasst wird die in dieser Veröffentlichung in Abschnitt 3.3 vorgestellte Variante. Die neuen Basisfunktionen im Vektor $\tilde{\mathbf{y}}_N$ sollen durch eine Rekonstruktions-Matrix \mathbf{R} aus den „alten“ *Kugelflächenfunktionen* im Vektor \mathbf{y}_N gewonnen werden.

$$\tilde{\mathbf{y}}_N = \mathbf{R} \mathbf{y}_N \quad (5.16)$$

Eine auf einer Teilkugel bestimmte Funktion x kann dann als Linearkombination aus den neuen Basisfunktionen dargestellt werden, wobei diese durch den Expansions-Koeffizientenvektor $\tilde{\boldsymbol{\gamma}}_N$ gewichtet werden.

$$x = \tilde{\boldsymbol{\gamma}}_N^T \tilde{\mathbf{y}}_N \quad (5.17)$$

Für die neuen Basisfunktionen soll auf einer Teilkugelfläche die Orthogonalitätsrelation gelten:

$$(\tilde{\mathbf{y}}_N, \tilde{\mathbf{y}}_N^T)_S = \mathbf{I}. \quad (5.18)$$

Durch einsetzen von Gleichung (5.16) und der Gram-Matrix ergibt sich die Orthogonalitätsrelation

$$(\tilde{\mathbf{y}}_N, \tilde{\mathbf{y}}_N^T)_S = \mathbf{R} (\mathbf{y}_N, \mathbf{y}_N^T)_S \mathbf{R}^T = \mathbf{R} \mathbf{G} \mathbf{R}^T = \mathbf{I}. \quad (5.19)$$

In [Pom09] wird die quadratische Gram-Matrix durch Eigenwertzerlegung in eine Diagonalmatrix \mathbf{D} mit den Eigenwerten und eine Matrix \mathbf{V} mit den zugehörigen Eigenvektoren zerlegt.

$$\mathbf{G} = \mathbf{V} \mathbf{D} \mathbf{V}^T \quad (5.20)$$

In Gleichung (5.19) kann die Gram-Matrix nun durch die Eigenwertzerlegung substituiert werden, was zu folgender Gleichung führt.

$$\mathbf{R} \mathbf{G} \mathbf{R}^T = \mathbf{R} \mathbf{V} \mathbf{D} \mathbf{V}^T \mathbf{R}^T = \mathbf{I} \quad (5.21)$$

Da für eine Diagonalmatrix gilt $\mathbf{D} = \mathbf{D}^{1/2} \mathbf{D}^{1/2}$, kann die Rekonstruktionsmatrix \mathbf{R} durch die Eigenwerte und Eigenvektoren der Gramschen Matrix ausgedrückt werden (5.22).

$$\mathbf{R} = \mathbf{D}^{-1/2} \mathbf{V}^T \quad (5.22)$$

Da die Inversion einer Diagonalmatrix der elementweisen Kehrwertbildung entspricht, ergeben sich für bei Eigenwerte nahe Null numerische Probleme. Um dies zu vermeiden wird eine Regularisierung durchgeführt. Hierbei werden Eigenwerte, welche kleiner als ein definierter Grenzwert sind, samt ihren zugehörigen Eigenvektoren eliminiert.

Durch die somit berechnete Diagonalmatrix mit den reduzierten Eigenwerten \mathbf{D}_C und den zugehörigen Eigenvektoren in der Matrix \mathbf{V}_C kann die Rekonstruktionsmatrix \mathbf{R} berechnet werden (5.23).

$$\mathbf{R} = \mathbf{D}_C^{-1/2} \mathbf{V}_C^T \quad (5.23)$$

Durch die Rekonstruktionsmatrix R ist es nun möglich aus den *Kugelflächenfunktionen* mit Gleichung (5.16) ein Set an neuen, auf der Teilkugel orthogonalen *Kugelflächenfunktionen* zu berechnen. Abbildung 67 zeigt einige der Auf diese Art und Weise berechneten *Teilkugelflächenfunktionen*, welche auf der an der Mikrofonposition Dachbedieneinheit abgetasteten Teilkugelfläche orthogonal sind. Die neuen *Teilkugelflächenfunktionen* ergeben sich aus Kombinationen der *Kugelflächenfunktionen*, so dass eine hierarchische Anordnung nach Ordnung und Grad nicht möglich ist. In [Pom09] wird ein Verfahren zur „Entmischung“ der neuen *Teilkugelflächenfunktionen* vorgestellt, welches aber im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt wird.

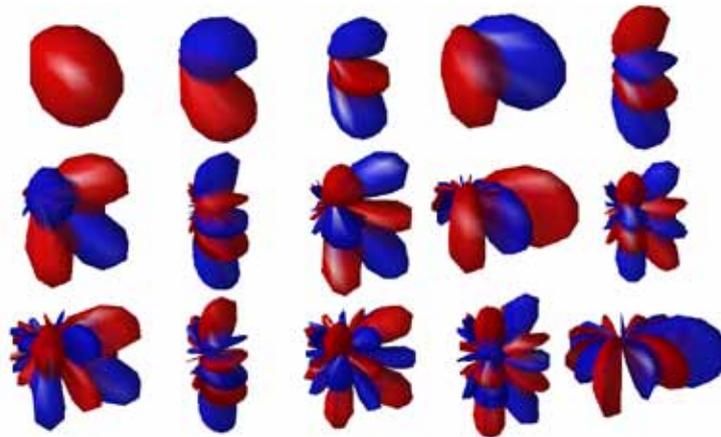


Abbildung 67: Orthogonale *Kugelflächenfunktionen* für die Teilkugelfläche auf der eine räumliche Abtastung der Mikrofonposition *Dachbedieneinheit* möglich ist

5.3.2 Beispiele

Als Beispiel einer Darstellung einer Mikrofon-Richtcharakteristik durch *Kugelflächenfunktionen* wird das bereits aus Abbildung 40 bekannte Bündelungsverhalten eines Druckempfängers für die Oktavbänder von 3.15 bis 10 kHz dargestellt. Für die Darstellung wird die Approximation gewählt, wobei die neuen Basisfunktionen aus *Kugelflächenfunktionen* bis zur Ordnung $N = 10$ gewonnen werden. Die Gitterpunkte des schwarzen Rasters entsprechen den tatsächlich gemessenen Werten.

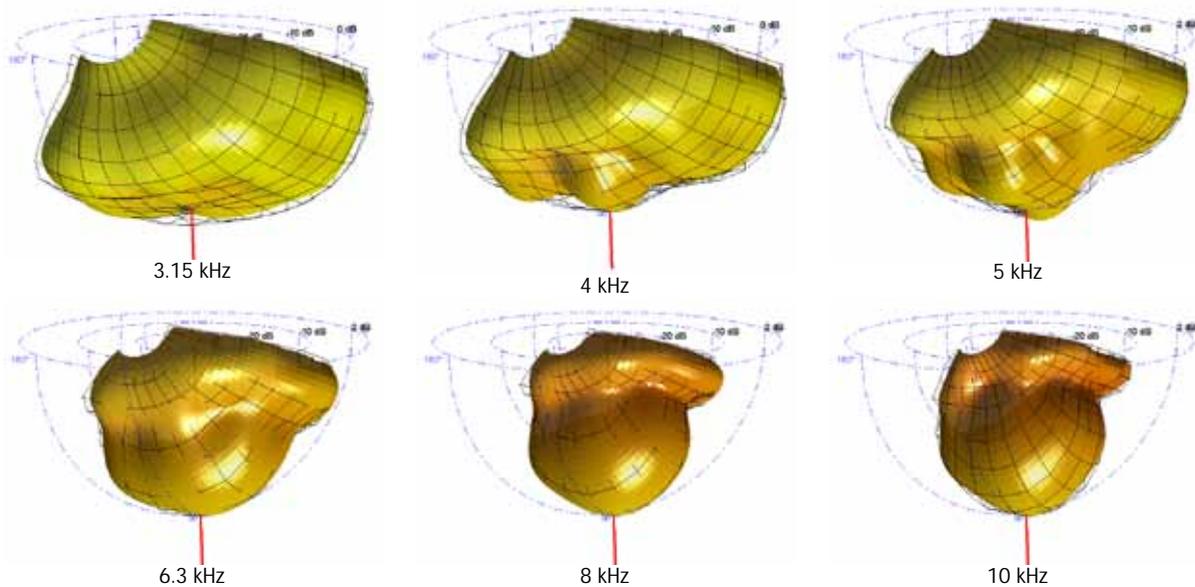


Abbildung 68: Bündelungsverhalten eines Druckempfängers an der Grenzfläche, normiert auf 1 kHz

6 SCHLUSSFOLGERUNG – AUSBLICK

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Messvorrichtung entworfen, mit welcher das Richtverhalten eines Mikrofones an seiner Einbauposition in einem PKW untersucht werden kann. Der entworfene Messbogen erlaubt die Messung eines 3D-Polardiagrammes, welches zur besseren Darstellung aus *Kugelflächenfunktionen* zusammengesetzt werden kann. Trotz des eingeschränkten räumlichen Messbereiches, erlaubt die vorgestellte Messmethode umfangreiche und nachvollziehbare Betrachtungen des Mikrofonverhaltens. Durch die erfassten Messdaten kann gezeigt werden, dass sich die Richtcharakteristik eines Mikrofones im Inneren eines PKW anders verhält als bei Messungen im Freifeld. Um die Bündelung eines Mikrofones in Abhängigkeit einer Quellposition zu bewerten, wird das richtungsabhängige Direktivitätsmaß eingeführt.

Bei einer Analyse der Störgeräusche im Fahrzeuginnenraum, zeigt sich, dass diese sehr positions- bzw. richtungsabhängig sind und nicht diffus im PKW Innenraum vorkommen. Um einen/eine SprecherIn an einer Fahrer- oder Beifahrerposition bestmöglich mit einem im PKW montierten Mikrofon aufzunehmen, kann mit Kenntnis über sowohl das Mikrofonverhalten als auch die Beschaffenheit des Störgeräusches der Signal Störabstand um maximal 1 dB verbessert werden. Die Mikrofonausrichtung für diese maximale Verbesserung, gegenüber einer intuitiven Ausrichtung auf die Sprecherposition, wird durch SNR-Berechnungen bestimmt. Wird nur das mit dem Messbogen erfasste 3D-Polardiagramm und das zugehörige Direktivitätsmaß betrachtet, kann bei entsprechender Mikrofonausrichtung der Signal Störabstand um maximal 0,5 dB verbessert werden. Die Messdatenerfassung mit dem Messbogen liefert demnach keine Ergebnisse, welche den entstehenden Messaufwand rechtfertigen.

Durch die Verwendung eines Mikrofonarrays konnte eine räumliche Impulsantwort gemessen werden, welche zeigt, dass pegelstarke Reflexionen im Innenraum des PKWs in den ersten 5 ms nach dem Direktschall an einem Mikrofon auftreten. Für diese Reflexionsmuster sind vor allem die Seitenfenster und die Windschutzscheibe bzw. das Armaturenbrett verantwortlich, das Heck des PKW scheint kaum Auswirkungen zu haben. Ebenfalls scheint bei einem an der Dachbedieneinheit befestigten Mikrofon der Rückspiegel (abhängig von seiner Ausrichtung) Reflexionen für Frequenzen $f > 2,5 \text{ kHz}$ hervorzurufen.

Der Versuch, die durch Messungen im PKW erlangten Kenntnisse über die räumliche Impulsantwort durch simplifiziertes Modell in einer raumakustischen Simulationssoftware zu validieren, ist nur teilweise erfolgreich. Die Nachhallzeit und Reflexionsmuster der Simulation korrelieren nur beschränkt mit den Messungen, jedoch konnte die Auswirkungen des Rückspiegels auf Reflexionen in der ersten Millisekunde nach dem Direktschall in der Simulation nachempfunden werden.

Ausblick

Was in dieser Arbeit zur Gänze unberücksichtigt blieb, ist die erzielten Verbesserungen des Signal-Störabstandes auch perzeptiv zu überprüfen. Ein Hörversuch, bei dem Probanden Sprachaufnahmen, die anhand unterschiedlicher Mikrofonausrichtungen in realen Fahrgeräuschsituationen entstanden sind, hinsichtlich der Sprachverständlichkeit beurteilen, könnte zusätzliche Erkenntnisse liefern.

Das für die Arbeit entwickelte Messverfahren samt Messvorrichtung kann auf einfache Weise für andere PKW-Typen adaptiert werden. Es wäre interessant zu sehen, wie sich die Messergebnisse für einen gänzlich anderen PKW-Typ wie z.B. ein Mini-Van verhalten.

Außer dem Fahrgeräusch wurden bei dieser Arbeit keine weiteren, im Auto auftretenden Störgeräusche berücksichtigt. In einer realen Fahrsituation, kommt es im PKW aber z.B. auch zu Windgeräuschen durch die Klimaanlage oder durch geöffnete Fenster. Speziell für die empfohlene Ausrichtung eines Mikrofones in Richtung der PKW Seiten für die minimale Aufnahme vom Fahrgeräusch dürfte ein geöffnetes Fahrer- oder Beifahrerfenster kritisch sein. Durch die Erstellung einer umfangreichen Datenbank von mit dem Mikrofonarray gemessenen Störgeräuschen könnten auch solche Spezialfälle betrachtet werden.

In [Haa72] wird gezeigt, dass sich sehr frühe Reflexionen, wie sie durch den Rückspiegel verursacht werden, positiv auf Sprachverständlichkeit und Sprachpegel auswirken können. Es wäre möglich, dass sich durch eine optimierte Positionierung eines Mikrofones, im Verhältnis zum Position des Rückspiegels, der Signal-Störabstand für Frequenzen $f > 2 \text{ kHz}$ zusätzlich verbessern lässt. Leider stand dem Autor dieser Arbeit der PKW nur für einen begrenzten Zeitraum zur Verfügung, Messungen mit abmontiertem Rückspiegel hätten eventuell weiteren Einblick in dieses Thema geben können.

In dieser Arbeit wurde ein Mikrofonarray verwendet um eine optimale Mikrofonausrichtung für die 3 Richtcharakteristika Niere, Superniere und Hyperniere zu bestimmen. Eine weitere Möglichkeit wäre das verwendete Mikrofonarrays zu nutzen, um gezielt die Richtungen auszublenden, aus denen viel Störgeräusch zu erwarten ist. Eine dahingehende Optimierung der Richtcharakteristik kann im Bereich der in Kapitel 5.3 beschriebenen Teilkugelflächenfunktionen erfolgen. Es ist zu erwarten, dass damit bessere Signal-Störabstände als mit den verwendeten Standardrichtcharakteristika erreicht werden können.

LITERATUR

- [Atk80] K. Atkinson, "Numerical Integration on the Sphere," *Journal of the Australian Mathematical Society*, vol. 23, pp. 332-347, 1980.
- [Cho02] C. Choi, "Assessment of Sound Field in a CAR," in *Convention Paper 5701*, 113th AES Convention October 5–8 Los Angeles, 2002.
- [Dal95] B. Dalenbäck, "A New Model for Room Acoustic Prediction and Auralization," , Ph. D. thesis, Chalmers Room Acoustics Group, Department of Applied Acoustics, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 1995.
- [Dega06] Deutsche Gesellschaft für Akustik e. V. (DEGA), "Akustische Wellen und Felder," *DEGA-Empfehlung 101*, 2006.
- [Fah89] F. J. Fahy, *Sound Intensity*. E & FN SPON, 1989.
- [Far03] A. Farina and B. Fabio, "Directivity balloons of real and artificial mouth simulators for measurement of the Speech Transmission Index," in *Convention Paper 5953*, 115th AES Convention October 10–13 New York, 2003.
- [Far04] A. Farina and F. Bozzoli, "Measurement of Speech Transmission Index inside cars using throat-activated microphone and its correlation with drivers' impression," in *Convention Paper 6307*, 117th AES Convention October 28–31 San Francisco, 2004.
- [Far06] A. Farina. (2006, Oct.) A-format to B-format conversion. [Online].
<http://pcfarina.eng.unipr.it/Public/B-format/A2B-conversion/A2B.htm>
- [Ger73] M. Gerzon, "Periphony: With-Height Sound Reproduction," *JAES*, vol. 21, no. 1, pp. 2-10, Feb. 1973.
- [Ger75] M. Gerzon and P. Craven, "Coincident Microphone Simulation Covering Three Dimensional Space and Yielding Various Directional Outputs," Patent US 4042779, 1975.
- [Ger751] M. Gerzon, "Calculating the Directivity Factor of Transducers from Limited Polar

- Diagram Information," *JAES*, vol. 23, no. 5, pp. 369-373, Jun. 1975.
- [Gra06] G. Graber, "Wellentheoretische Raumakustik," in *Raumakustik Skript*. IBK, TU Graz, 2006.
- [Gra07] G. Graber, *Elektroakustik Skript*. IBK, TU Graz, 2007.
- [Haa72] H. Haas, "The Influence of a Single Echo on the Audibility of Speech," *JAES*, vol. 20, no. 2, pp. 146-159, Mar. 1972.
- [Har07] N. Harris, "A comparison of modelling techniques for small acoustic spaces such as car cabins," in *Convention Paper 7146*, 122nd AES Convention May 5–8 Vienna, 2007.
- [Hifi] Hifi-Selbstbau. Thiele & Small Parameter ganz einfach. [Online]. http://www.hifi-selbstbau.de/index.php?option=com_content&task=view&id=87&Itemid=35
- [Itu99] International Telecommunication Union (ITU), "Calculation of loudness ratings for telephone sets," Annex E, ITU-T Recommendation P.79, 1999.
- [Kar96] M. Karjalainen, T. Laakso, V. Välikäki, and U. Laine, "Splitting the Unit Delay," *IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 30-60, Jan. 1996.
- [Kle98] M. Kleiner and C. Lindgren, "Objective Characterization of Audio Sound Fields in Automotive Spaces," in *Conference Paper 15-007*, 15th International Conference: Audio, Acoustics & Small Spaces, 1998.
- [Lom11] É. Lombard, "Le signe de l'élévation de la voix," *Ann. Mal. Oreil. Larynx*, no. 37, pp. 101-119, 1911.
- [Mai08] P. Maier, "Studioakustik," in *Handbuch der Audiotechnik*, 2008.
- [MatSph] E. Weisstein. "Spherical Harmonic" From MathWorld--A Wolfram Web Resource. [Online]. <http://mathworld.wolfram.com/SphericalHarmonic.html>
- [Mül01] S. Müller and P. Massarani, "Transfer-Function Measurement with Sweeps," *JAES*, vol. 49, no. 6, Jun. 2001.
- [Mül08] S. Müller, "Messtechnik," in *Handbuch der Audiotechnik*, 2008.
- [Mül90] B. Müller, "A New Type of Boundary-Layer Microphone," in *Preprint 2885*, 88th AES Convention March 13–16 Montreux, 1990.
- [Mur98] D. T. Murphy and D. M. Howard, "Modelling and directionally encoding the acoustics of a room," *ELECTRONICS LETTERS*, vol. 34, no. 9, Apr. 1998.
- [ÖNO] ÖNORM EN ISO 3382, "Akustik – Messung der Nachhallzeit von Räumen mit Hinweis auf andere akustische Parameter".
- [Ort02] A. Ortega, E. Lleida, and E. Masgrau, "Speech Reinforce Inside Vehicles," in *Conference Paper 000078*, 21st International Conference: Architectural Acoustics and Sound

- Reinforcement, St. Petersburg, Russia, 2002.
- [Pom08] H. Pomberger, "Angular and Radial Directivity Control for Spherical Loudspeaker Arrays," Institute of Electronic Music and Acoustics (IEM), Graz, Diplomarbeit, 2008.
- [Pom09] H. Pomberger and F. Zotter, "An Ambisonics format for flexible playback layouts," Ambisonics Symposium June 25-27, Graz, 2009.
- [Pul05] V. Pulkki and J. Merimaa, "Spatial Impulse Response Rendering I: Analysis and Synthesis," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 53, no. 12, pp. 1115-1127, Dec. 2005.
- [Rei09] F. Reining, "Microphone Arrangement Comprising Three Pressure Gradient Transducers," Patent PCT/AT2009/00513, May 22, 2009.
- [Sch08] M. Schneider, "Elektroakustik I: Mikrofone," in *Handbuch der Audiotechnik*, 2008.
- [Sen93] E. Sengpiel. (1993) Geometrische Konstruktion der Nieren-Richtcharakteristik. [Online]. <http://www.sengpielaudio.com/GeometrischeKonstruktionDerNieren.pdf>
- [Sne94] N. Sneeuw, "Global spherical harmonic analysis by least squares and numerical quadrature methods in historical perspective," *Geophys. J. Int.*, vol. 118, no. 3, p. 707–716, 1994.
- [Tie99] U. Tietze and C. Schenk, "Digitale Filter," in *Halbleiter-Schaltungstechnik*, 1999.
- [Ton02] K. Tontch, "Instrumentelle und auditive Beurteilung der Qualität des Sprachsignals nach räumlicher Filterung des Sprachschalls in personenkraftwagen," Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik, Dissertation, 2002.
- [Vda04] Verband der Automobilindustrie, *VDA Specification for Car Hands-free Terminals V1.5*, 2004.
- [WikAK] Wikipedia. "Autokorrelation". [Online]. <http://de.wikipedia.org/wiki/Autokorrelation>
- [WikGSM] Wikipedia. "Full Rate GSM Codec". [Online]. http://en.wikipedia.org/wiki/Full_Rate
- [WikHLM] Wikipedia. "Helmholtz-Zahl". [Online]. <http://de.wikipedia.org/wiki/Helmholtz-Zahl>
- [WikZK] Wikipedia. "Zylinderkoordinaten". [Online]. <http://de.wikipedia.org/wiki/Zylinderkoordinaten>
- [Wil73] G. Wilson, "Directivity Factor Q or R? Standard Terminology and Measurement Methods," *JAES*, vol. 21, pp. 828-833, Dec. 1973.
- [Zot09] F. Zotter, "Discrete Spherical Harmonics Transform, Interpolation, and Approximation," Institute of Electronic Music and Acoustics (IEM), 2009.
- [Zot091] F. Zotter, "Sampling Strategies for Acoustic Holography/Holophony on the Sphere," Institute of Electronic Music and Acoustics (IEM), 2009.

ANHANG

I. Frequenzbänder laut ISO Norm

Bandnummer	Mittenfrequenz	Untere Grenzfrequenz	Obere Grenzfrequenz
1	250 Hz	180 Hz	355 Hz
2	500 Hz	355 Hz	710 Hz
3	1 kHz	710 Hz	1400 Hz
4	2 kHz	1400 Hz	2800 Hz
5	4 kHz	2800 Hz	5600 Hz
6	8 kHz	5600 Hz	11200 Hz

Tabelle 0-1: Mitten- und Grenzfrequenzen der Terzbänder wie sie für die Auswertung verwendet wurden

Bandnummer	Mittenfrequenz	Untere Grenzfrequenz	Obere Grenzfrequenz
1	200 Hz	180 Hz	224 Hz
2	250 Hz	224 Hz	280 Hz
3	315 Hz	280 Hz	355 Hz
4	400 Hz	355 Hz	450 Hz
5	500 Hz	450 Hz	560 Hz
6	630 Hz	560 Hz	710 Hz
7	800 Hz	710 Hz	890 Hz
8	1 kHz	890 Hz	1120 Hz
9	1.25 kHz	1120 Hz	1410 Hz
10	1.6 kHz	1410 Hz	1800 Hz
11	2 kHz	1800 Hz	2240 Hz
12	2.5 kHz	2240 Hz	2800 Hz
13	3.15 kHz	2500 Hz	3500 Hz
14	4 kHz	3500 Hz	4500 Hz
15	5 kHz	4500 Hz	5600 Hz
16	6.3 kHz	5600 Hz	7100 Hz
17	8 kHz	7100 Hz	9000 Hz
18	10 kHz	9000 Hz	11200 Hz

Tabelle 0-2: Mitten- und Grenzfrequenzen der Oktavbänder wie sie für die Auswertung verwendet wurde

II. Verwendete Messausrüstung

Für die unterschiedlichen Messungen kam folgende technische Ausrüstung zum Einsatz:

- Laptop mit Windows XP
- RME Cardbus mit Multiface II
- Matlab 7.6
- 8-Kanal Speisebox für Freisprechmikrofone (8V)
- 8-Kanal Verstärker AMP 8X mit je 40 Watt an 4 Ohm
- Kunstkopf Modell HMS II.3 von Head Acoustics
- Mikrofonarray "Buttonarray"
- Messbogen (wurde im Rahmen dieser Arbeit für AKG Acoustics konstruiert)

III. Fahrer/Sprecherpositionen

	Fahrer S (165 cm)	Fahrer M (175 cm)	Fahrer L (185 cm)	Beifahrer M (175 cm)
<i>Dachbedieneinheit</i>	$\varphi = -55^\circ$ $\theta = 50^\circ$	$\varphi = -55^\circ$ $\theta = 40^\circ$	$\varphi = -55^\circ$ $\theta = 30^\circ$	$\varphi = +55^\circ$ $\theta = 40^\circ$
<i>Handgriff Fahrer</i>	$\varphi = +105^\circ$ $\theta = 60^\circ$	$\varphi = +105^\circ$ $\theta = 40^\circ$	$\varphi = +105^\circ$ $\theta = 30^\circ$	$\varphi = +95^\circ$ $\theta = 20^\circ$

Tabelle 0-3: Definierte Quellpositionen im PKW für drei Fahrer mit unterschiedlicher Körpergröße relativ zu der zwei Mikrofonposition *Dachbedieneinheit* und *Handgriff Fahrer*

IV. 3D-Polardiagramme für die Mikrofonposition Handgriff Fahrer

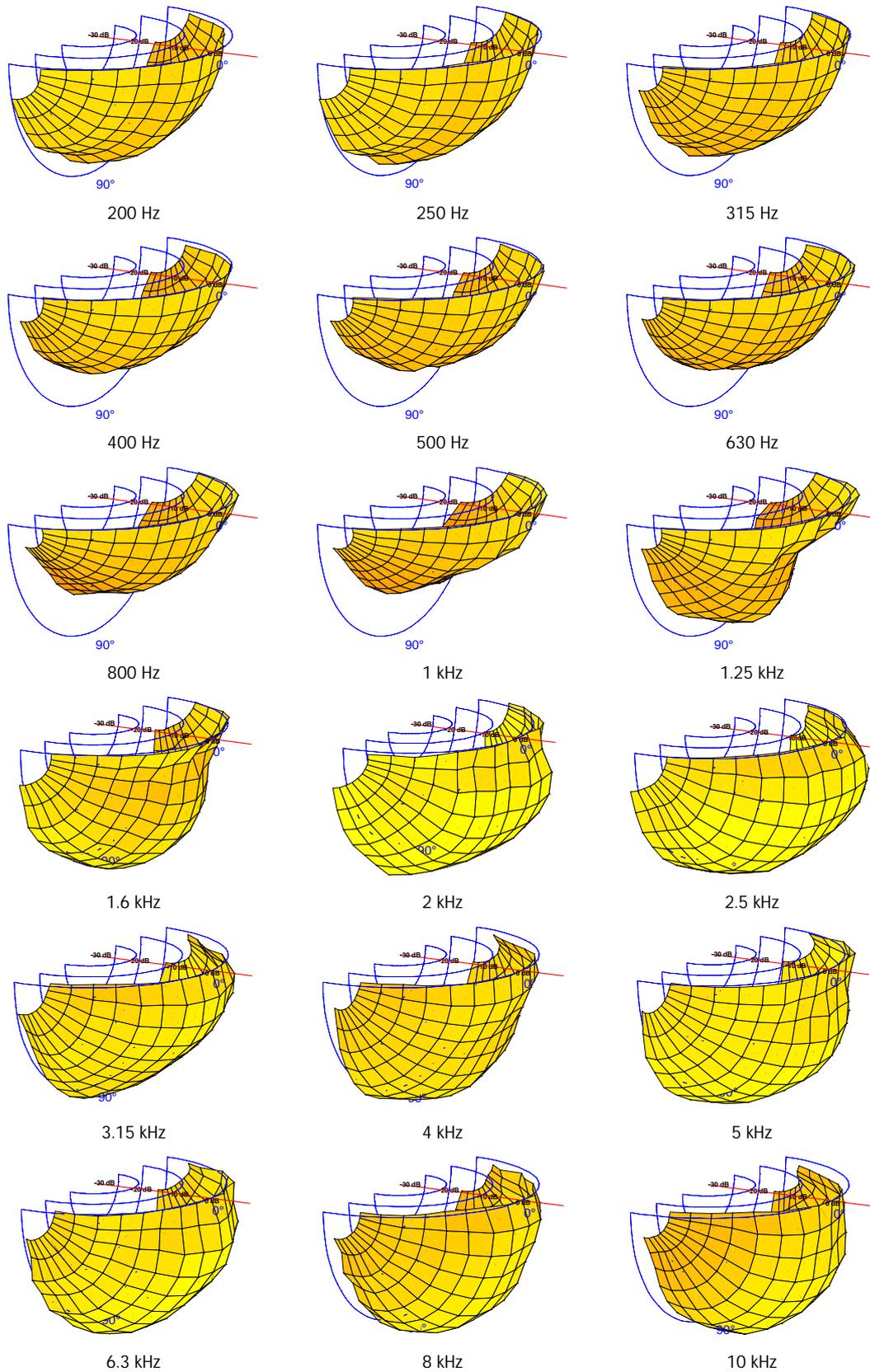


Abbildung 69: 3D-Polardiagramm des Druckdifferenzempfängers Mic1 im PKW an der Mikrofonposition *Handgriff Fahrer* in Terzbändern

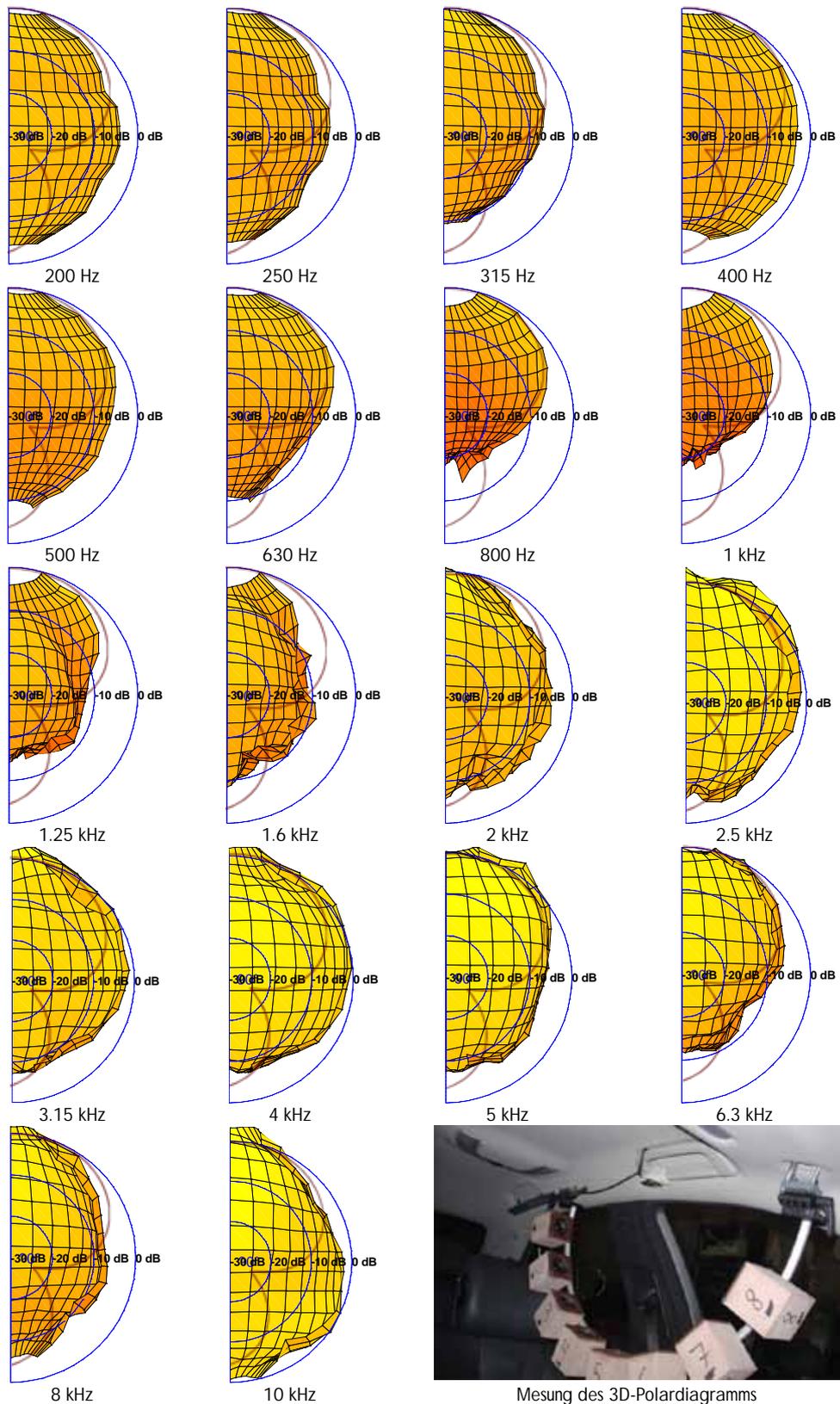


Abbildung 70: 3D-Polardiagramm des Druckdifferenzempfängers Mic2 im PKW an der Mikrofonposition *Handgriff Fahrer* in Terzbändern in der Draufsicht

V. SNR in Abhängigkeit vom Ausrichtungswinkel des Mikrofons

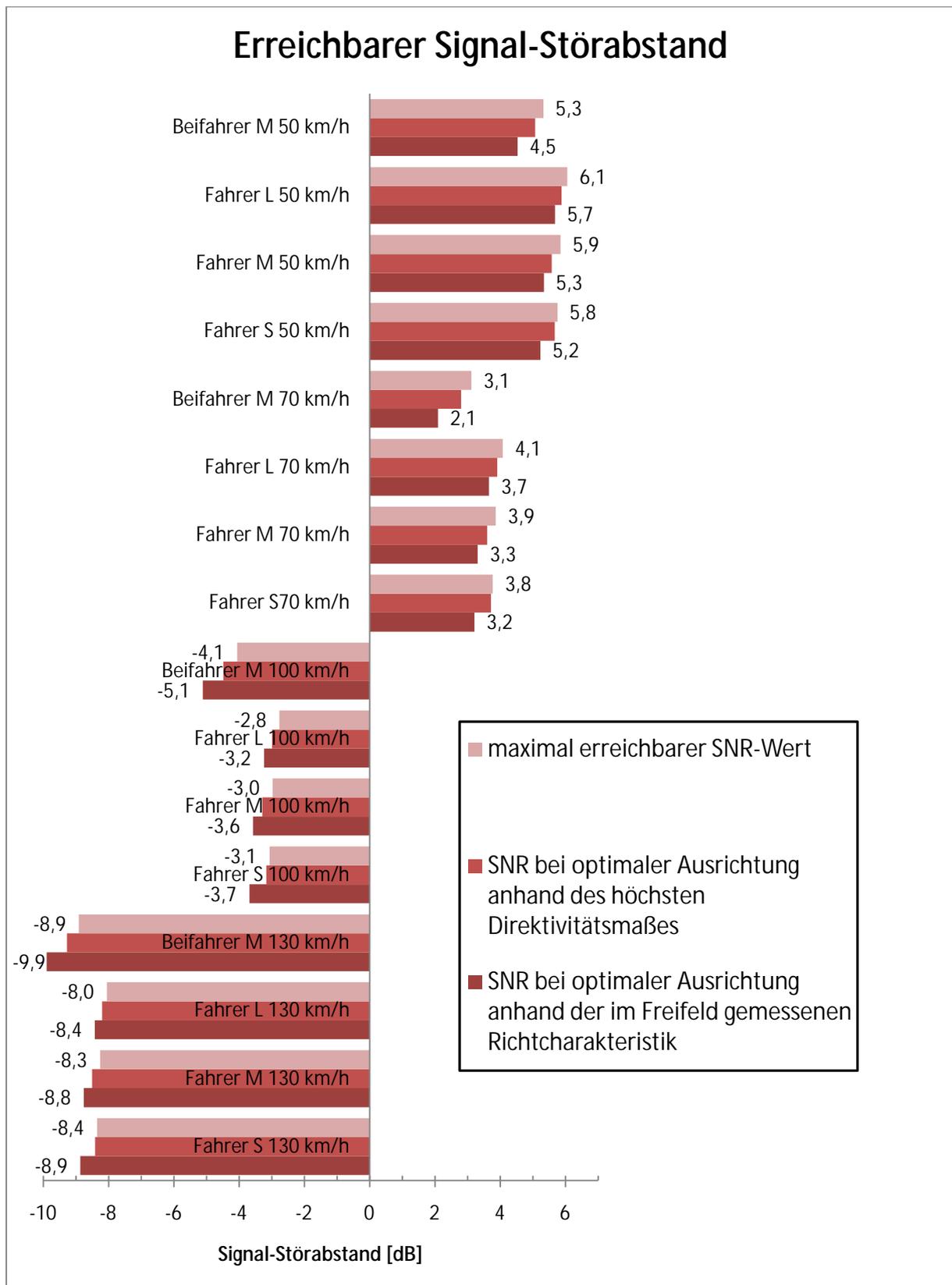


Abbildung 71: Signal-Störabstand (SNR) für die Richtcharakteristik Niere (Position *Dachbedieneinheit*) bei direkter Ausrichtung auf die Quelle und Ausrichtung anhand des höchsten Direktivitätsmaßes bzw. der höchsten SNR

VI. Impulsringe für verschiedene Quellpositionen

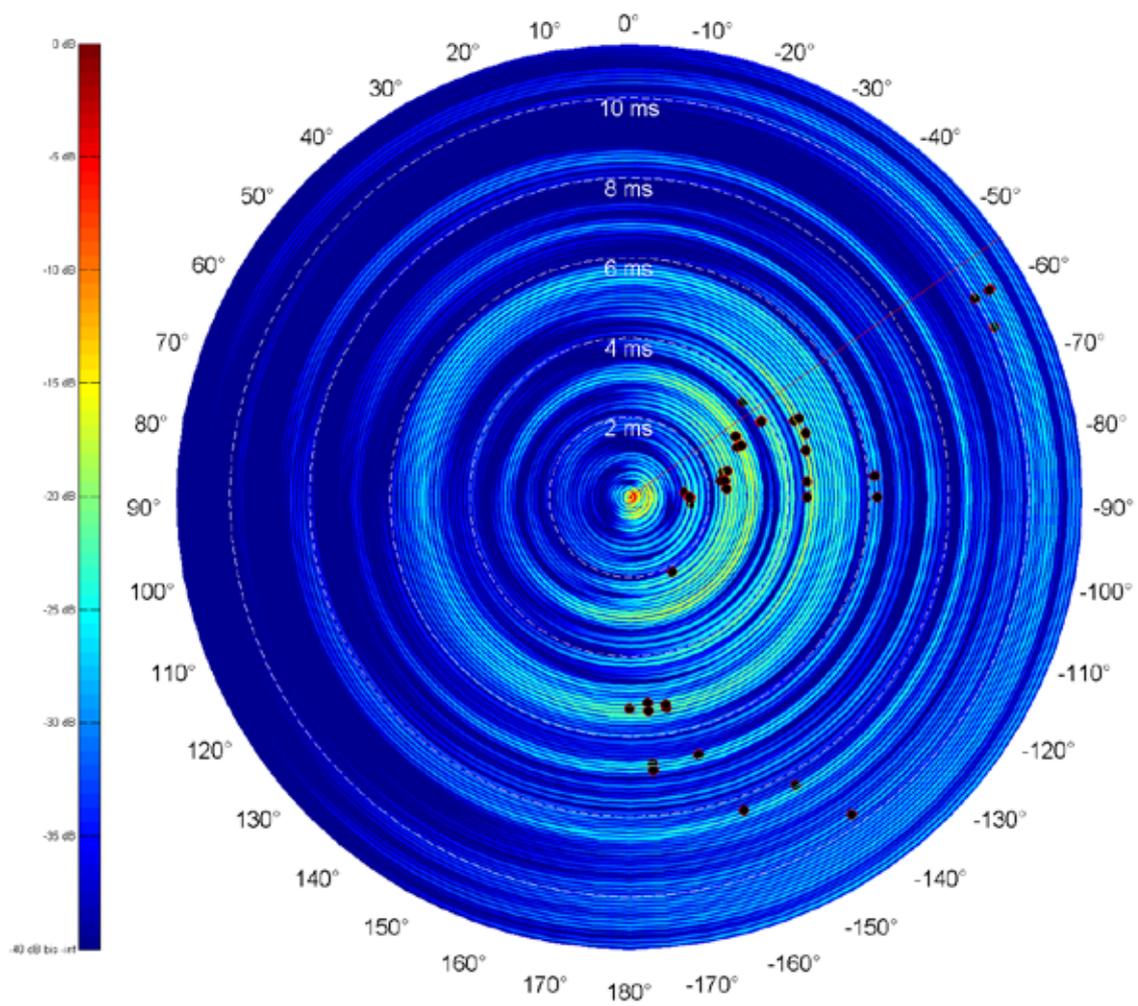


Abbildung 72: Impulsringe für die Quellposition Fahrer S für die ersten 10 ms nach dem Direktschall

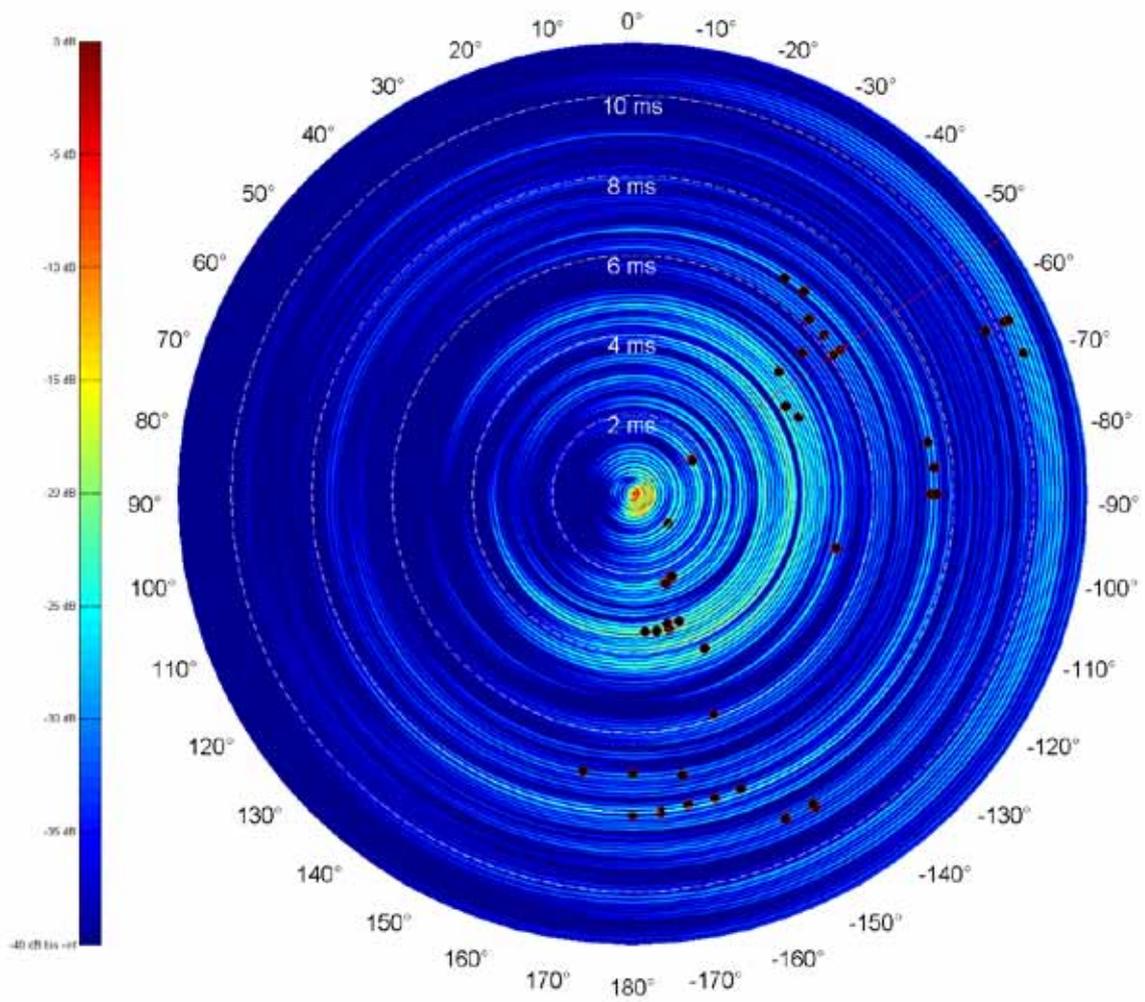


Abbildung 73: Impulsringe für die Quellposition Fahrer_L für die ersten 10 ms nach dem Direktschall

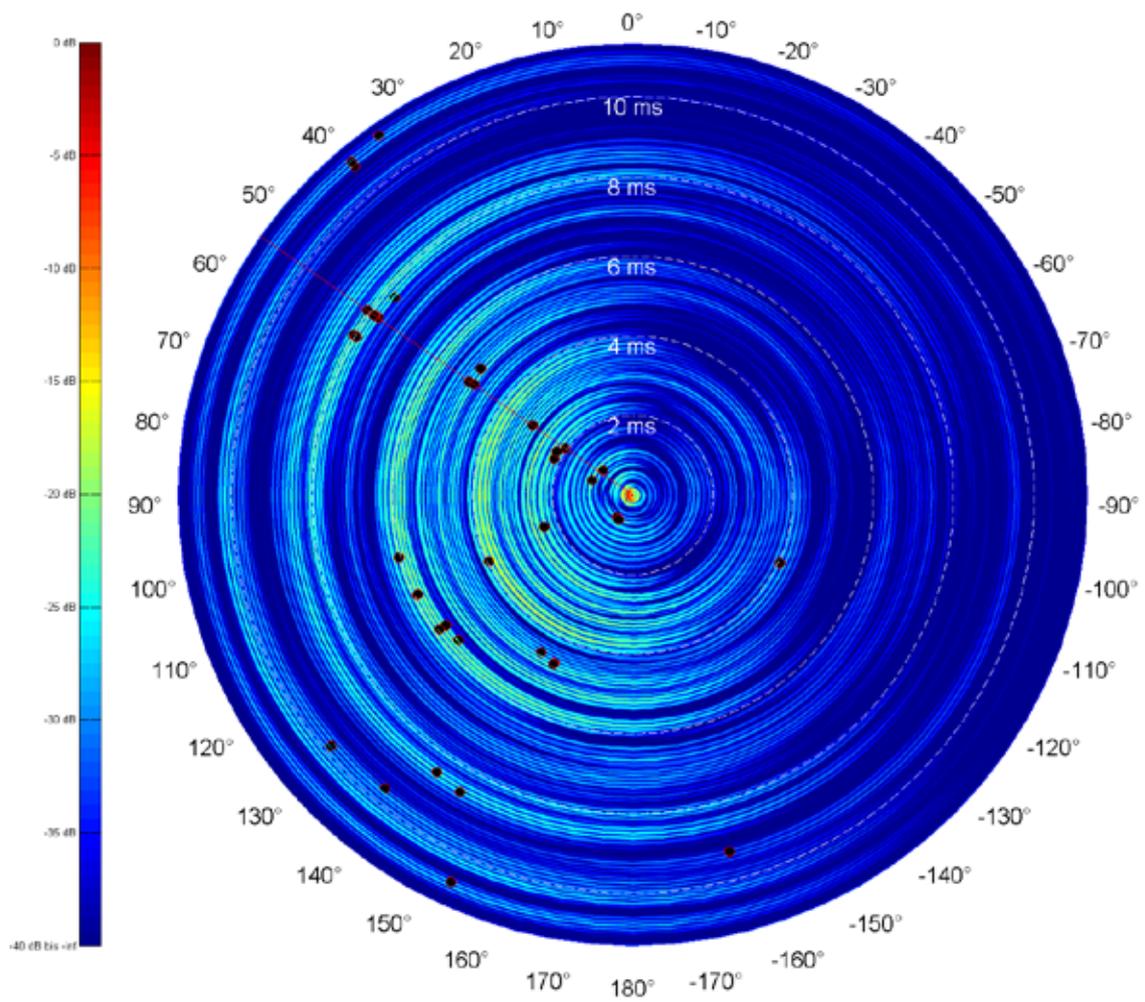


Abbildung 74: Impulsringe für die Quellposition Beifahrer M für die ersten 10 ms nach dem Direktschall

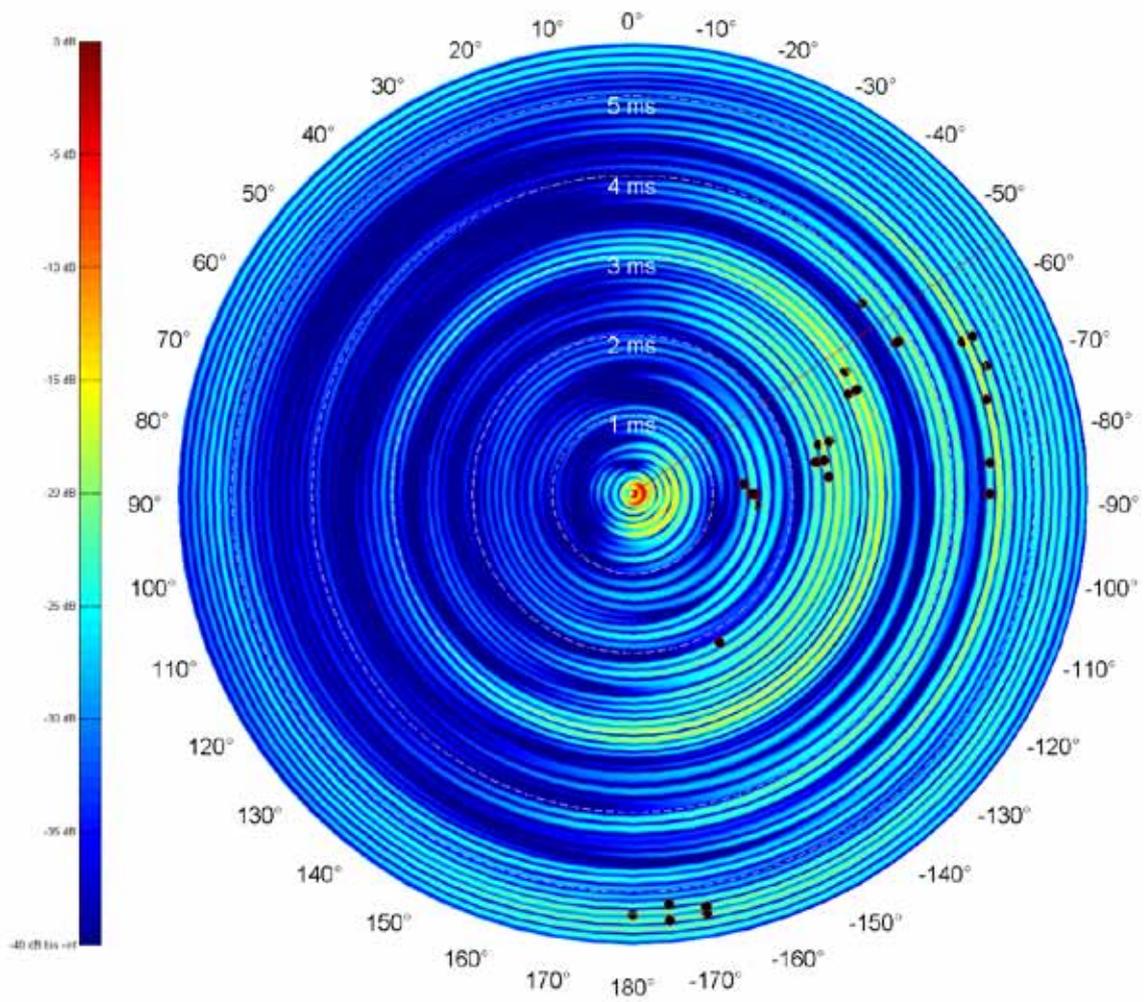


Abbildung 75: Impulsringe für die Quellposition Fahrer S für die ersten 5 ms nach dem Direktschall

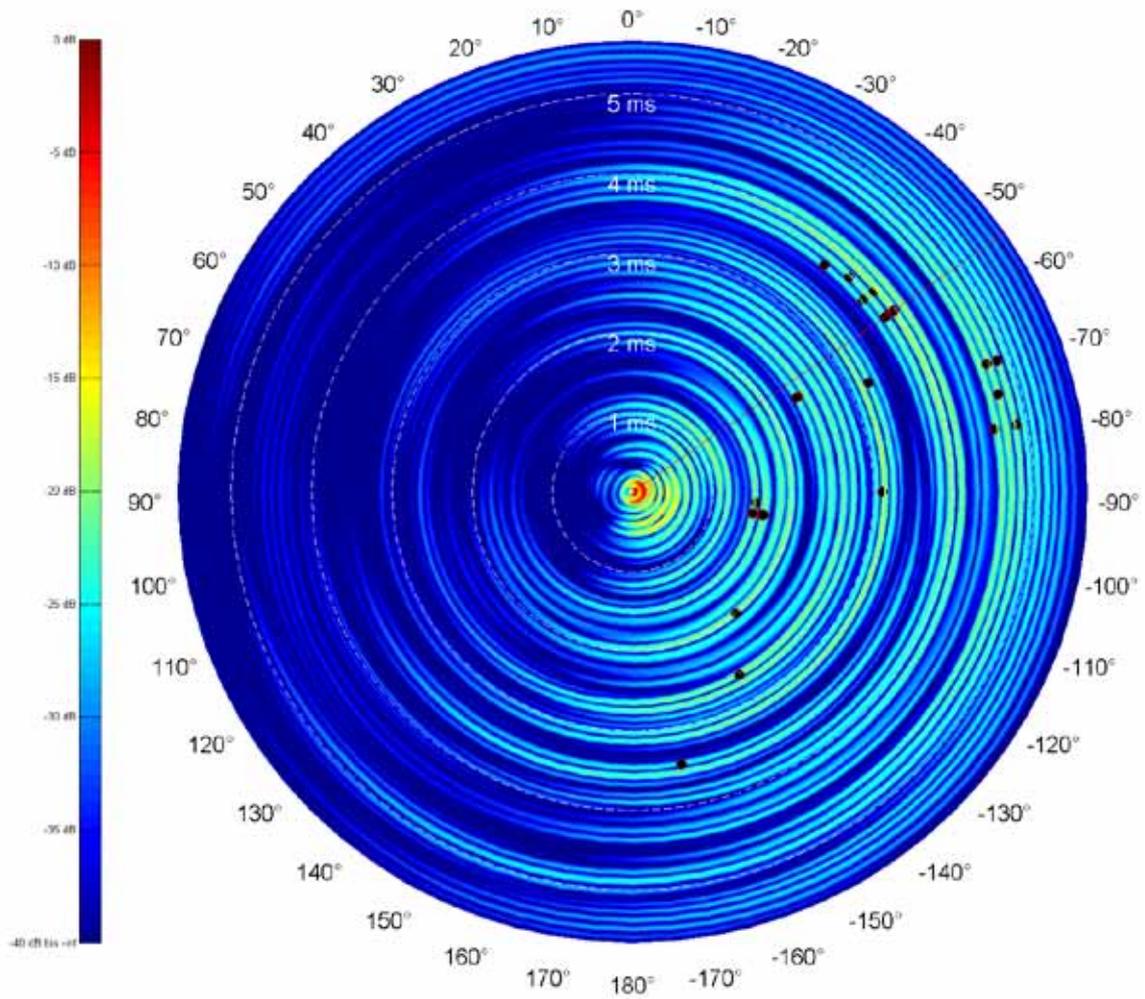


Abbildung 76: Impulsringe für die Quellposition Fahrer M für die ersten 5 ms nach dem Direktschall

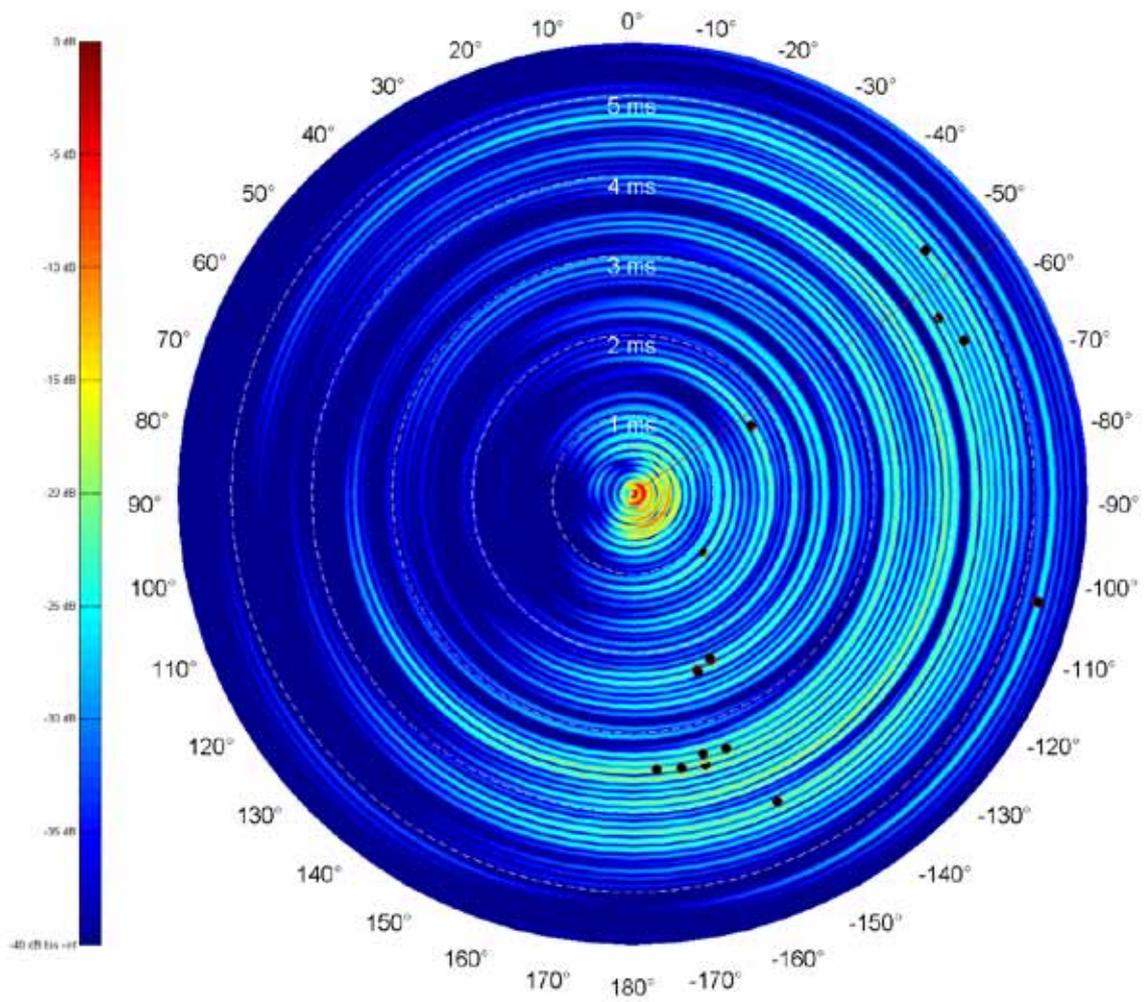


Abbildung 77: Impulsringe für die Quellposition Fahrer_L für die ersten 5 ms nach dem Direktschall

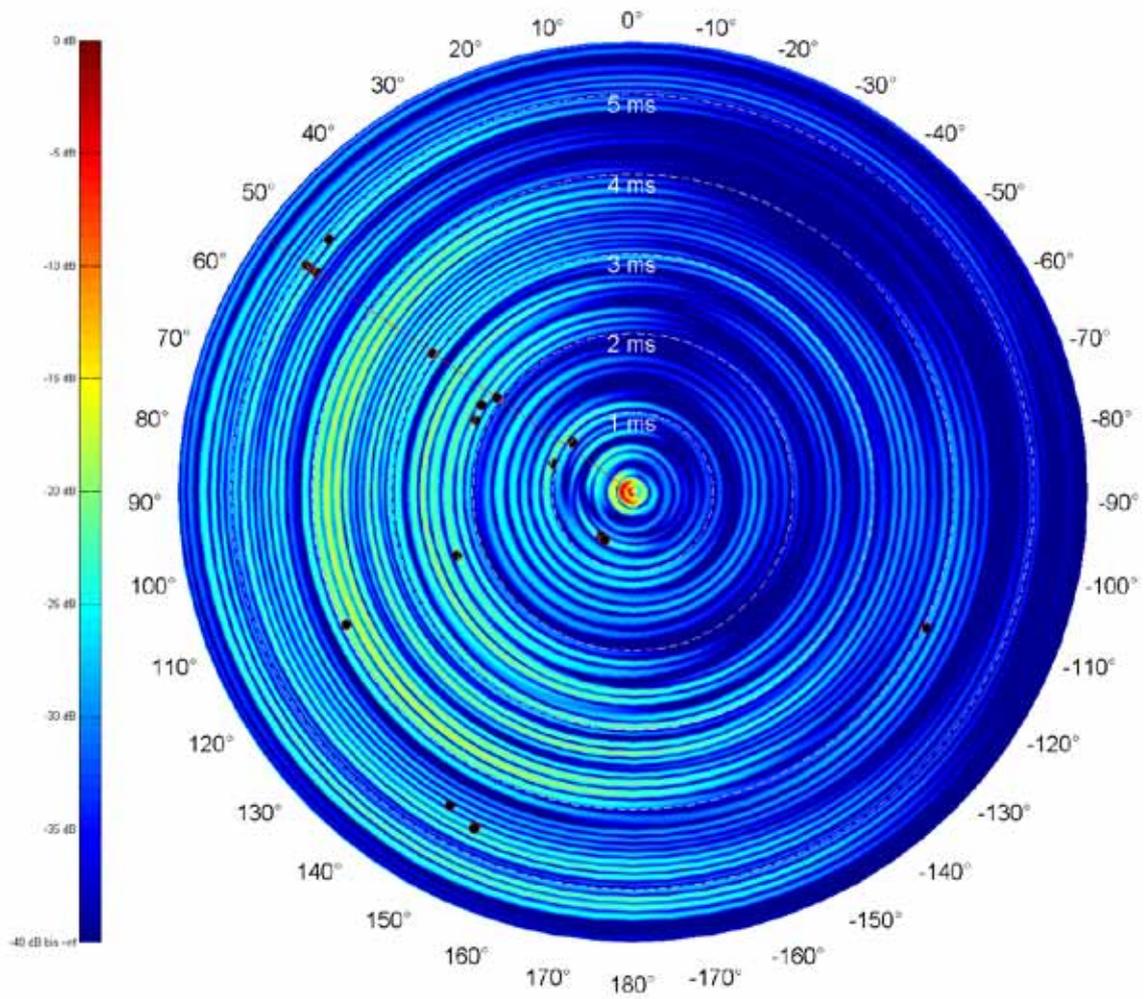


Abbildung 78: Impulsringe für die Quellposition Beifahrer M für die ersten 5 ms nach dem Direktschall

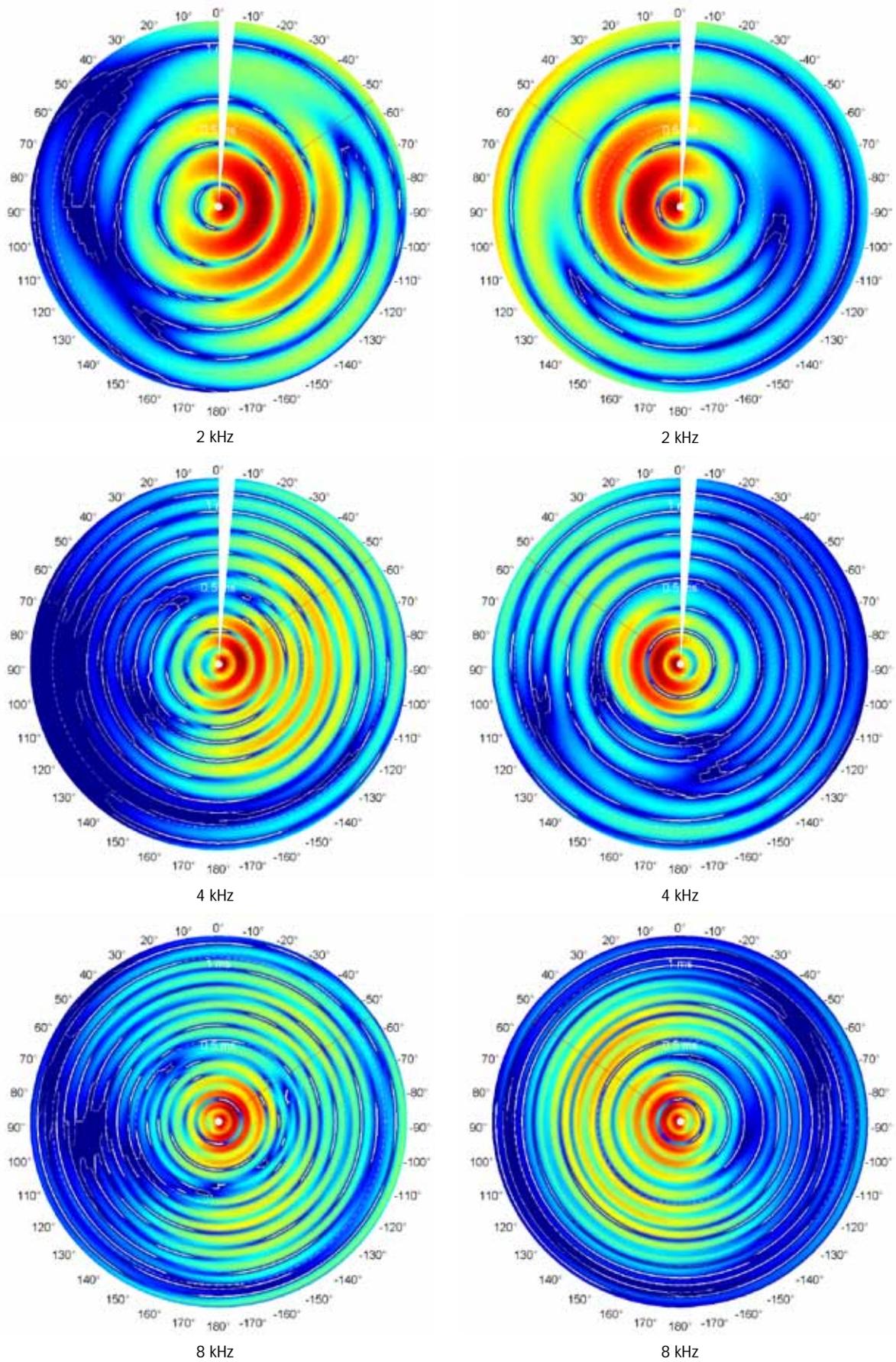


Abbildung 79: Impulsringe für die Quellpositionen Fahrer M (links) und Beifahrer M (rechts) in der ersten Millisekunde nach dem Direktschall für verschiedene Oktavbänder

VII. Soundroses für Fahrer S und Fahrer L

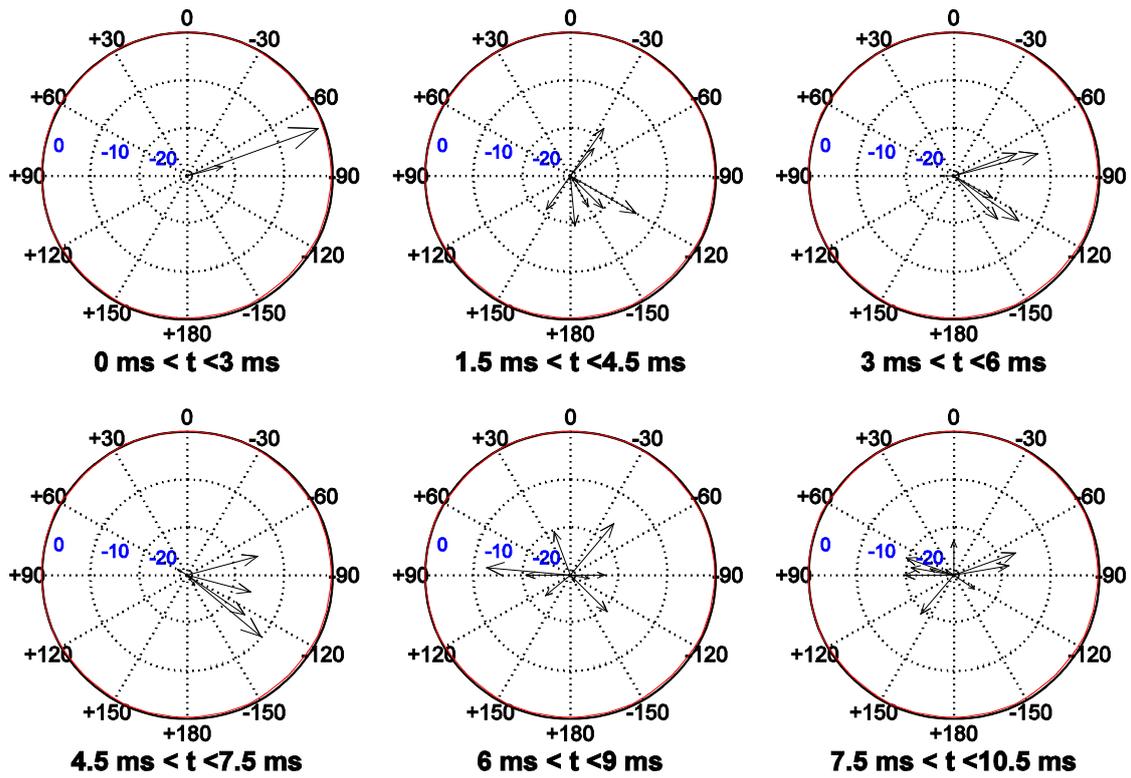


Abbildung 80: Soundroses für die Quellposition Fahrer S

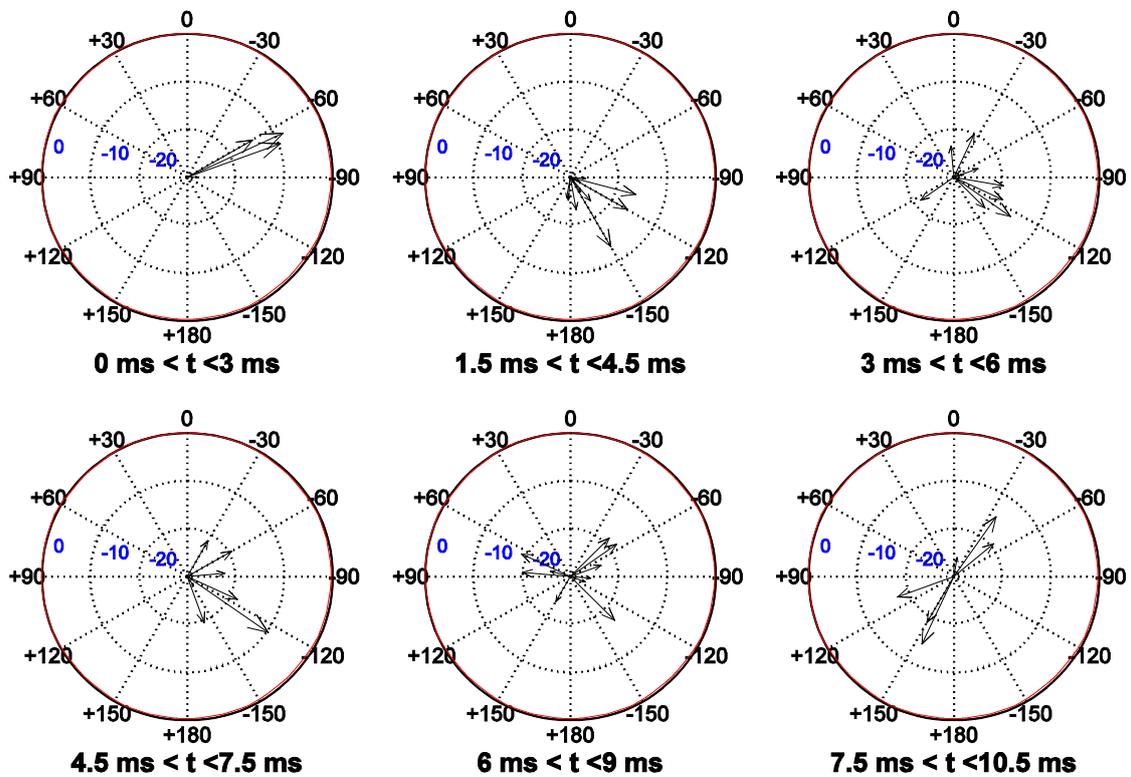


Abbildung 81: Soundroses für die Quellposition Fahrer L

Abbildung 82: Soundroses für die Quellposition Beifahrer M im Oktavband mit 1 kHz Mittenfrequenz

VIII. Absorptionskoeffizienten für das Simulationsmodell

Oktavband:	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
Leder	0,54	0,6	0,62	0,58	0,5	0,3
Stoff	0,12	0,18	0,3	0,55	0,59	0,64
Armatur	0,12	0,18	0,2	0,1	0,05	0,03
Glas	0,1	0,08	0,06	0,04	0,02	0,01

Tabelle 0-4: Absorptionskoeffizienten der im Simulationsmodell vorkommenden Materialien für die Oktavbänder von 250 Hz bis 8 kHz

IX. POLCAR

Für die Darstellung und Auswertung der 3D-Polardiagramme wurde das Programm POLCAR samt einem ein *Graphical User Interface* (GUI) in Matlab programmiert. Folgende Features wurden implementiert:

- Ø Darstellung des gemessenen 3D-Polardiagrammes in Oktav-/Terzbändern oder für beliebige Frequenzen/Frequenzbereiche
- Ø Einstellung einer Bezugsrichtung für die Berechnung des Direktivitätsmaßes
- Ø Berechnung des Direktivitätsmaßes in Oktav- oder Terzbändern oder für beliebige Frequenzen/Frequenzbereiche
- Ø Berechnung der optimalen Mikrofonausrichtung mit Messdaten des Mikrofonarrays
- Ø Simulation einer beliebigen Richtcharakteristik mit Messdaten des Mikrofonarrays
- Ø Darstellung des gemessenen 3D-Polardiagrammes ohne Bezug (Mic View) oder im PKW
- Ø Darstellung der 3D-Polardiagramme durch *Kugelflächenfunktionen*
- Ø Zeitliche Fensterung der Impulsantworten zur Begrenzung des Raumeinflusses auf die Richtcharakteristik
- Ø Erstellung von Mess-Templates für das Messprogramm Puremat V 3.15 (© AKG)
- Ø etc.

Die folgenden Abbildungen zeigen das Programm POLCAR bei verschiedenen Betrachtungen und Berechnungen.

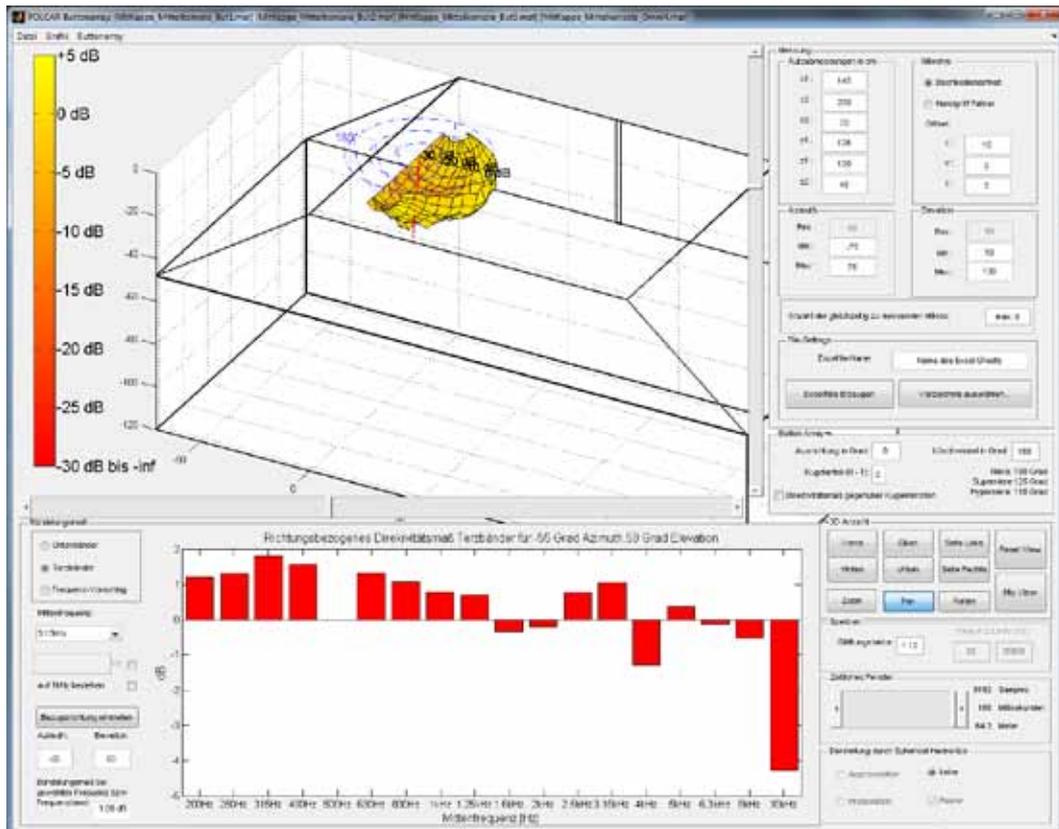


Abbildung 83: Darstellung eines 3D-Polardiagrammes im PKW und Berechnung des Direktivitätsmaßes in Terzbändern

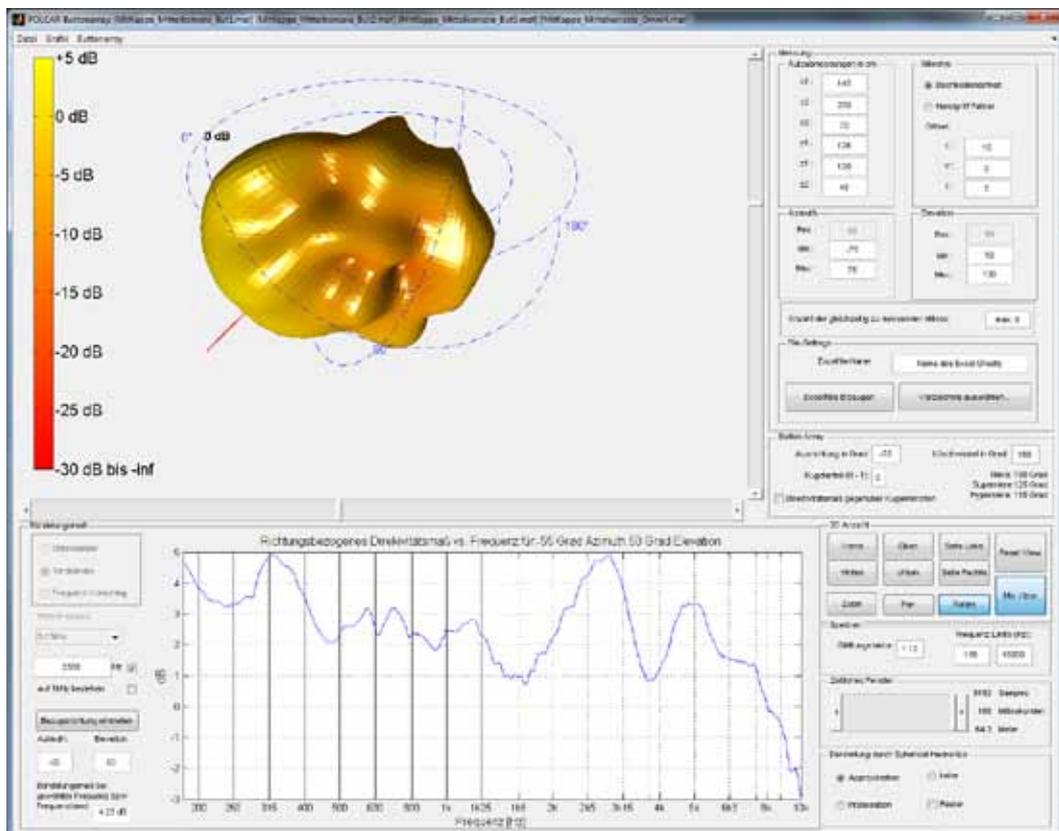


Abbildung 84: POLCAR: Darstellung eines 3D-Polardiagrammes (Mic View) durch Kugelflächen Funktionen und Berechnung des Direktivitätsmaßes für beliebige Frequenzen

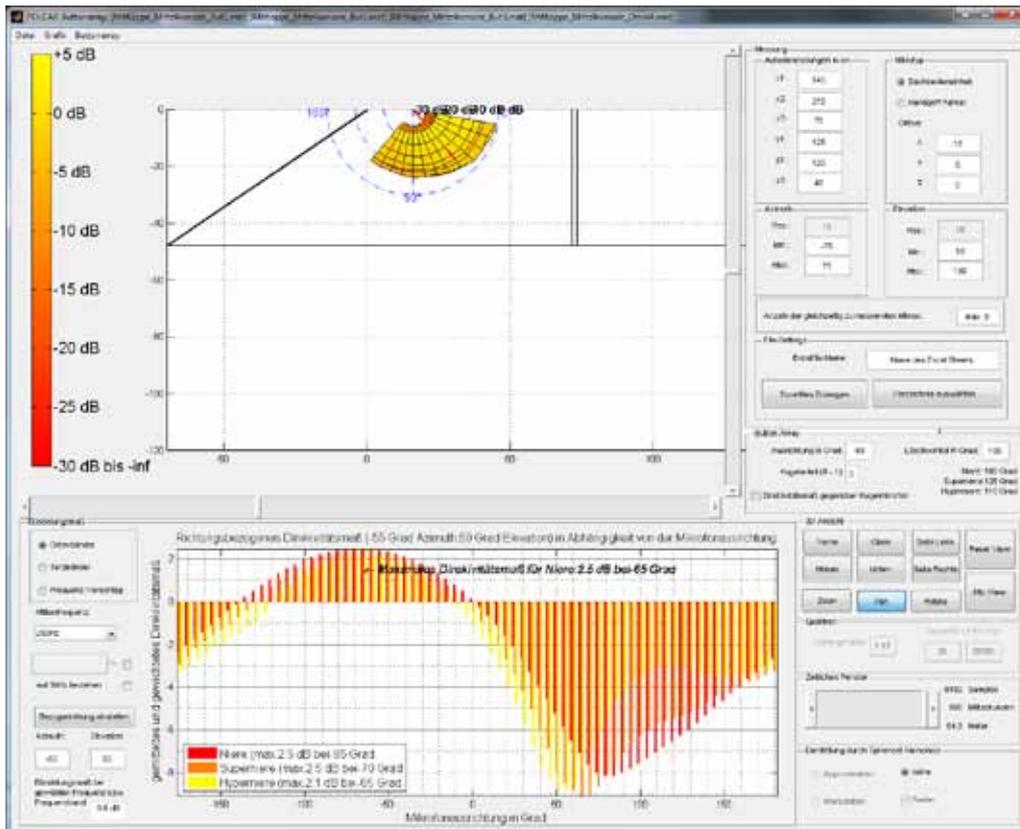


Abbildung 85: POLCAR: Berechnung der optimalen Mikrofonausrichtung für die Richtcharakteristika Niere, Superniere und Hyperniere