

Protokoll Gruppe 2, 23. bis 27.04.18

## **Akustische Holographie und Holophonie, Labor**

Benjamin Weinmüller  
Manuel Pagavino  
Thomas Deppisch

Betreuung: Dr. Franz Zotter  
Graz, 24. Oktober 2018



Institut für Elektronische Musik und Akustik



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung und Aufgabenstellung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Messung der Richtwirkung von Gitarren mittels Mikrofonkugel</b>	<b>4</b>
2.1	Messaufbau . . . . .	4
2.2	Bestimmung der Mikrofonpositionen . . . . .	5
2.3	Messung . . . . .	6
2.4	Vergleich der Richtmuster . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Messung der Richtwirkung von Gitarren in horizontalem und vertikalem Schnitt</b>	<b>11</b>
3.1	Messaufbau . . . . .	11
3.2	Polarpattern & Spectrum Visualizer . . . . .	12
3.3	Abstrahlverhalten in Azimuth- und Zenithwinkel . . . . .	12
3.3.1	Einfluss der Haltung . . . . .	13
3.3.2	Vergleich Western-/Resonatorgitarre . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>20</b>
<b>5</b>	<b>Anhang</b>	<b>22</b>

# 1 Einführung und Aufgabenstellung

Im Verlauf der Laborübung soll eine messtechnische Analyse von Gitarrenrichtwirkungen anhand zweier Gitarren durchgeführt werden. Dazu stehen zwei Messanordnungen zur Verfügung: Ein 64-kanaliges kugelförmiges Mikrofonarray (siehe Kapitel 2) sowie zwei je 32-kanalige Mikrofonarrays (siehe Kapitel 3), die in einem horizontalen und einem vertikalen Kreis angeordnet sind. Dabei bietet das kugelförmige Mikrofonarray die Möglichkeit einer 3D-Darstellung der Instrumentenrichtwirkung, während die kreisförmigen Arrays die Darstellung eines horizontalen und vertikalen 2D-Schnitts durch die Instrumentenrichtwirkung ermöglichen, wobei eine höhere Auflösung erreicht wird. Das auszumessende Instrument befindet sich während der Messung jeweils im Mittelpunkt der Arrays.

Untersucht wurden zwei Gitarren, eine Westerngitarre und eine Resonatorgitarre (siehe Abbildung 1). Die Westerngitarre ist eine akustische Gitarre mit Stahlseiten, mit der Besonderheit, dass der Übergang von Hals zu Korpus anstatt wie üblich für Westerngitarren nicht beim 14. Bund, sondern beim 12. Bund liegt, wie es sonst bei klassischen bzw. spanischen Gitarren üblich wäre. Sie ist eine hochwertige Gitarre aus Ahorn mit Fichtendecke der Firma Taylor<sup>1</sup> mit der Modellbezeichnung 612ce.

Die Resonatorgitarre (Dobro-Design) ist im Gegensatz dazu akustisch völlig anders aufgebaut, weil sie nicht über eine schwingfähige Decke mit typischem Resonanzloch verfügt. Stattdessen wird in Dobro-Resonatorgitarren ein Alutrichter für die Erzeugung akustischer Abstrahlung verwendet, der schwingfähig mit dem Steg der Gitarre verbunden ist, über den die Stahlseiten laufen. Das verleitet zur Annahme, dass die Abstrahlung stärker gebündelt sein könnte. Die Gitarre ist von sigma guitars<sup>2</sup> und trägt die Modellbezeichnung RM-140.

Ziel der Laborübung ist also neben dem Vergleich der zwei Aufnahmeverfahren mit Hinblick auf die Auflösung der erhaltenen Richtwirkungen, die Überprüfung, ob sich der Eindruck einer stärkeren Schallbündelung bei der Resonator-Gitarre im Vergleich zur Westerngitarre anhand des Richtmusters bestätigen lässt. Des Weiteren soll zum Einen die Auswirkung der Körperhaltung/Gitarrenhaltung auf die Richtcharakteristik untersucht werden, zum Anderen sollen die Richtcharakteristika der beiden Gitarren auch in direktem Vergleich zueinander gestellt werden. Hierfür wurde mit beiden Gitarren jeweils eine Tonleiter als auch ein kurzes Segment eines Musikstückes eingespielt, und mit dem jeweiligen Mikrofonarray aufgezeichnet. Die dadurch erhaltenen Daten sollen anschließend ausgewertet und als Richtdiagramm dargestellt werden.

---

1. [taylorguitars.com](http://taylorguitars.com)

2. [sigma-guitars.com](http://sigma-guitars.com)



(a) Westerngitarre.



(b) Resonatorgitarre.

Abbildung 1 – Messung in der Mikrofonkugel.

## 2 Messung der Richtwirkung von Gitarren mittels Mikrofonkugel

### 2.1 Messaufbau

Zur Messung der Richtwirkung von Gitarren wurde die 64-kanalige Mikrofonkugel des IEM aufgebaut, Abbildung 2.

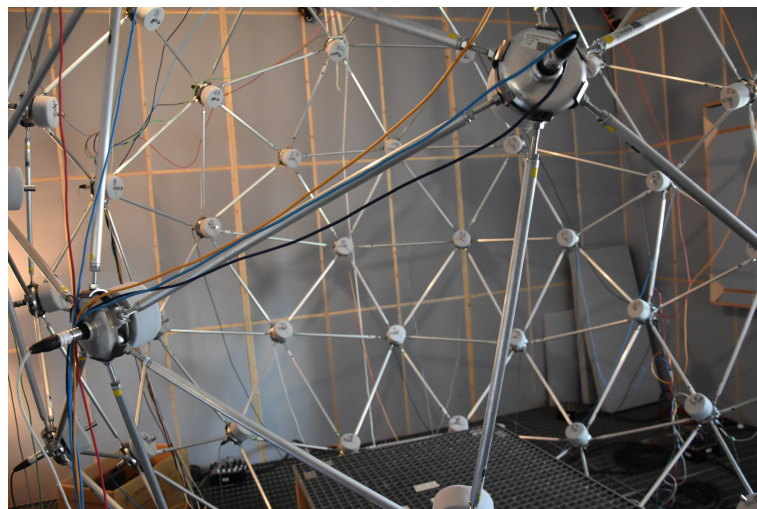


Abbildung 2 – 64-kanaliges Mikrofonkugelarray zur Messung von Instrumentenrichtwirkungen.

## 2.2 Bestimmung der Mikrofonpositionen

Nach Kalibrierung der Mikrofone werden die Mikrofonpositionen ermittelt. Es stehen Herstellerangaben der Mikrofonpositionen auf der Mikrofonkugel zur Verfügung, die Rotation des aufgebauten Kugelgestells ist allerdings nicht bekannt und muss bestimmt werden. Dafür werden mit einem 6-kanaligen Würfellausprecher für jede der 64 Mikrofonpositionen 6 Impulsantworten gemessen. Damit können für jedes Mikrofon die Zeitdifferenzen berechnet werden, die durch den Abstand der 6 Lautsprecherchassis bei Aufnahme der Impulsantworten entstehen. Durch Berechnung der Ankunftszeitdifferenzen der Impulse bei Signalerzeugung mit dem vorderen und hinteren, linken und rechten, bzw. oberen und unteren Lautsprecherchassis, ergeben sich die akustisch ermittelten Mikrofonkoordinaten  $x$ ,  $y$  und  $z$  gespeichert in der Matrix  $\mathbf{X}_a$ . Im nächsten Schritt wird die Rotationsmatrix  $\mathbf{R}$  berechnet, die die Mikrofonpositionen des bekannten Layouts (maximum determinant points für 7. Ordnung)  $\mathbf{X}_h$  dreht und damit eine bestmögliche Übereinstimmung mit den akustisch ermittelten Koordinaten  $\mathbf{X}_a$  erreicht. Dies wird durch Anwendung der Singulärwertzerlegung auf die Kovarianzmatrix  $\mathbf{X}_h^T \mathbf{X}_a$  erreicht

$$[\mathbf{U}, \mathbf{S}, \mathbf{V}] = \text{svd}(\mathbf{X}_h^T \mathbf{X}_a), \quad (1)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{U}^T \mathbf{V}. \quad (2)$$

Die gesuchten Mikrofonpositionen ergeben sich jetzt aus

$$\mathbf{X}_r = \mathbf{X}_h \mathbf{R}. \quad (3)$$

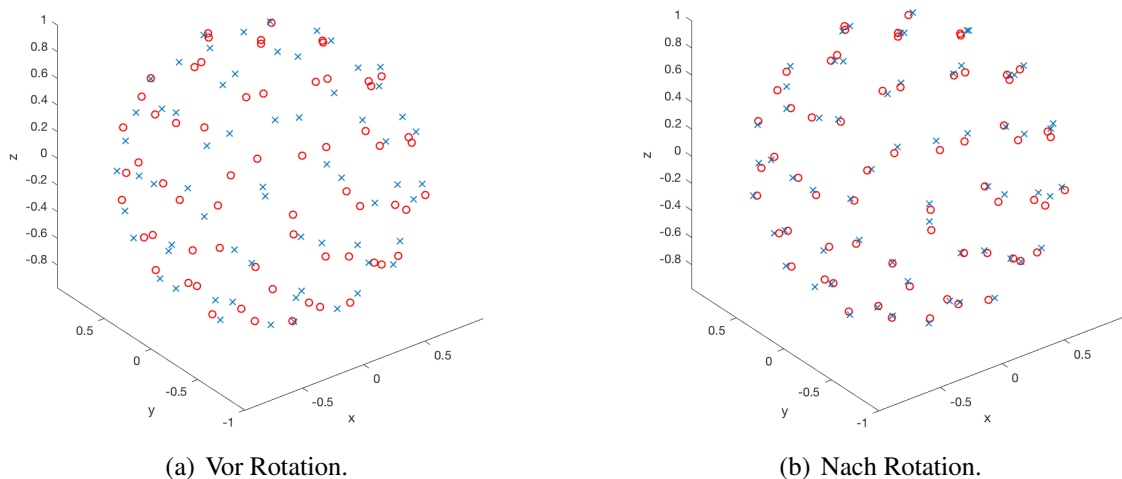


Abbildung 3 – Akustisch ermittelte Mikrofonpositionen (rot) und Herstellerangaben (blau).

## 2.3 Messung

Zur Analyse der Richtwirkung wurden kurze Segmente mit einer Westerngitarre (Abbildung 1(a)) und einer Resonatorgitarre (Abbildung 1(b)) aufgenommen. Die Zerlegung der aufgenommenen Schalldrücke  $\mathbf{p}$  in Koeffizienten von Kugelflächenfunktionen  $\psi_N$  bis zur Ordnung  $N$  erfolgt durch Auswertung der Kugelflächenfunktionen  $Y_n^m$  an den Mikrofonpositionen  $\theta_i$  in der Matrix  $\mathbf{Y}_{N,\text{enk}}$

$$\mathbf{Y}_{N,\text{enk}} = \begin{bmatrix} Y_0^0(\theta_0) & \dots & Y_N^N(\theta_0) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_0^0(\theta_M) & \dots & Y_N^N(\theta_M) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

und anschließende Multiplikation der Schalldrücke  $\mathbf{p}$  mit der Pseudoinversen dieser Matrix  $\mathbf{Y}_{N,\text{enk}}^\dagger$

$$\psi_N = \mathbf{Y}_{N,\text{enk}}^\dagger \mathbf{p}. \quad (5)$$

Diesen Sachverhalt zeigt Abbildung 4 noch einmal anschaulich.

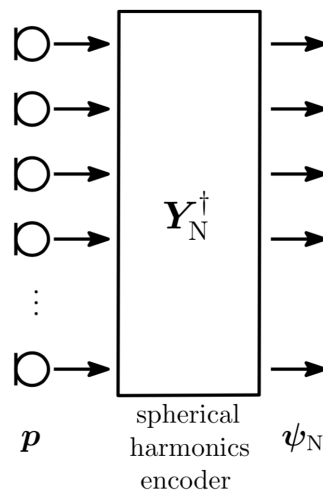


Abbildung 4 – Berechnung der Kugelflächenkoeffizienten  $\psi_N$  aus den Schalldrücken  $\mathbf{p}$  der Mikrofone und der Pseudoinversen  $\mathbf{Y}_{N,\text{enk}}^\dagger$ . [ZF18]

Durch die erhaltene Darstellung im Ortsbereich können die sich ergebenden Abstrahlmuster nun auf einem beliebigem Raster virtueller Lautsprecher ausgewertet werden, was eine fein aufgelöste grafische Darstellung ermöglicht. Die Dekodierung erfolgt durch Multiplikation mit der Matrix  $\mathbf{Y}_{N,\text{dek}}$ , die an den für die grafische Auswertung herangezogenen Richtungen ausgewertete Kugelflächenfunktionen bis zur Ordnung  $N$  enthält

$$\tilde{\mathbf{p}} = \mathbf{Y}_{N,\text{dek}} \psi_N. \quad (6)$$

## 2.4 Vergleich der Richtmuster

Ein frequenzabhängiger Vergleich erfolgt durch Anwendung der DFT und Untersuchung der Richtmuster bei einzelnen Frequenzen. Die Auswertung erfolgt dabei in Terzbändern mit der MATLAB Umgebung *DirPat*<sup>3</sup> von Manuel Brandner. Zum Vergleich wurden mit beiden Gitarren aus Abbildung 1 eine A-Moll Tonleiter aufgenommen. Diese wird im Folgenden von c (131 Hz) bis a' (440 Hz) ausgewertet, wobei jeweils die angespielten (Grund-)Töne analysiert werden. Anschließend erfolgt eine Analyse der ersten sechs Obertöne von c'. Neben der grafischen Auswertung eignet sich die Untersuchung der Richtcharakteristik auf Basis des Bündelungsmaßes (*engl. Directivity Index, DI*). Dieses bezieht die abgestrahlte Leistung on-axis (d.h. vorne, 0° Azimuth und 0° Elevation) auf die gesamte Abstrahlung gemessen auf der Oberfläche der Einheitskugel. Außerdem wird das maximale Bündelungsmaß  $DI_{\max}$  berechnet, das die maximal abgestrahlte Leistung (für eine Richtung) auf die gesamte abgestrahlte Leistung bezieht. Um die Abstrahlung frequenzabhängig zu untersuchen, werden sogenannte Bündelungsmaßspektren herangezogen. Im diskreten Fall wird dabei der quadrierte on-axis Amplitudengang  $H_0(f)$  auf die Summe der Amplitudengänge in alle Richtungen  $H_n(f)$ , entsprechend dem flächenmäßigen Anteil an der Einheitskugel gewichtet mit  $w_n$ , bezogen [TSC15]

$$DI(f) = 10 \log_{10} \frac{|H_0(f)|^2}{\sum_n w_n |H_n(f)|^2 / \sum_n w_n} . \quad (7)$$

Abbildung 5 zeigt für c (131 Hz) und Abbildung 6 für e (165 Hz) jeweils links oben einen horizontalen Schnitt der Abstrahlung, links unten einen vertikalen Schnitt (0° Richtung Azimuth bzw. Elevation zeigen nach rechts) und rechts das 3D Richtmuster. Unterhalb des 3D Richtmusters werden das Bündelungsmaß  $DI$  und das Bündelungsmaß ausgewertet am Maximum der Abstrahlung  $DI_{\max}$  angezeigt.

---

3. [git@git.iem.at:brandner/PolarPattern\\_and\\_SpectrumAnalyzer\\_SphericalMicArray.git](https://git@git.iem.at:brandner/PolarPattern_and_SpectrumAnalyzer_SphericalMicArray.git)

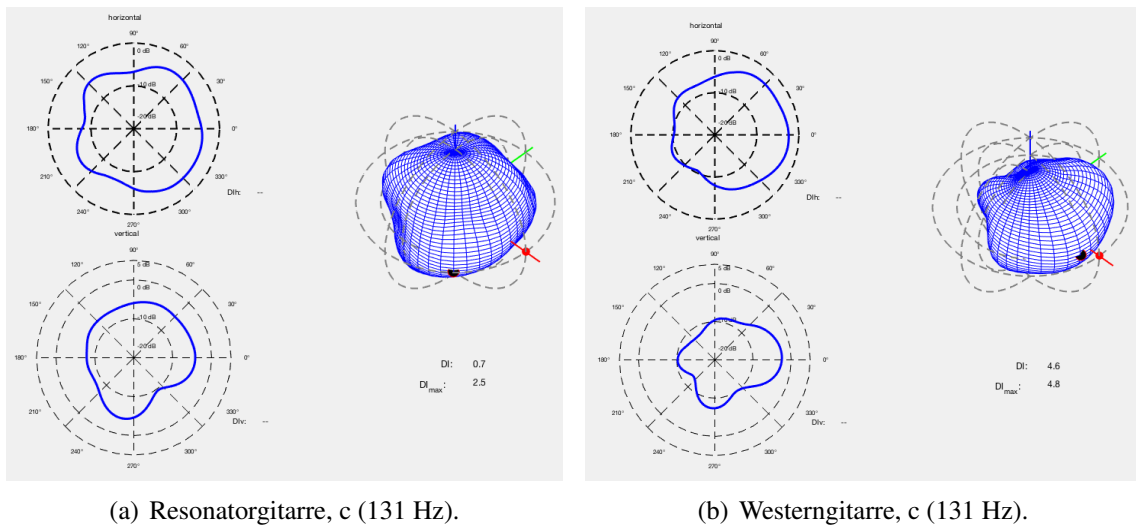


Abbildung 5 – Vergleich der Abstrahlung für 131 Hz. Bei den horizontalen und vertikalen Schnittplots befindet sich die  $0^\circ$  Richtung jeweils rechts.

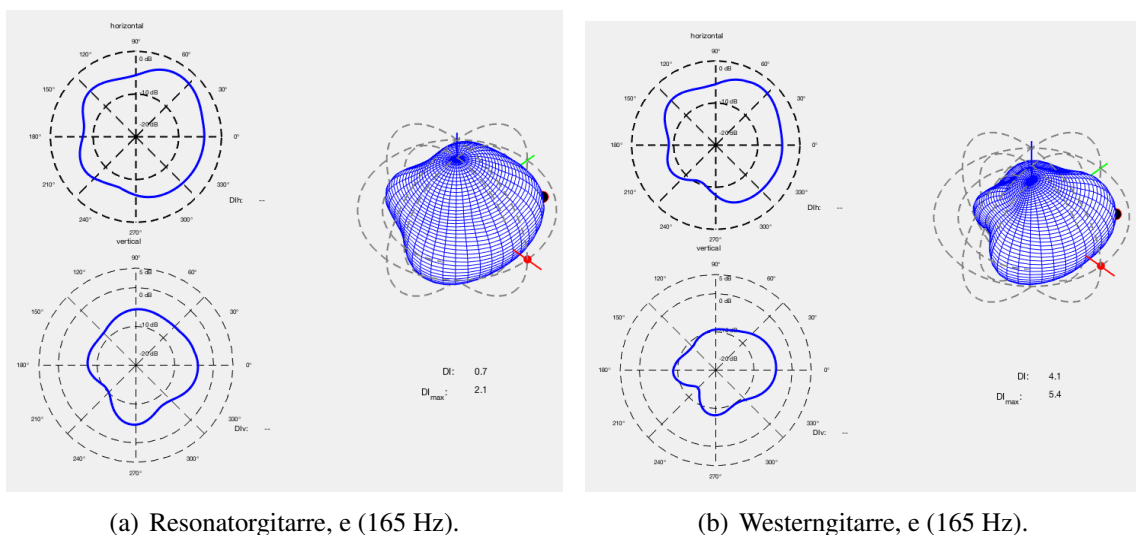


Abbildung 6 – Vergleich der Abstrahlung für 165 Hz. Bei den horizontalen und vertikalen Schnittplots befindet sich die  $0^\circ$  Richtung jeweils rechts.

Anders als vermutet, strahlt die Westerngitarre in diesem Frequenzbereich deutlich gerichtet ab, als die Resonatorgitarre ( $DI_{max}$  von 4,8 bzw. 5,4 vs. 2,5 bzw. 2,1). Diese Beobachtung gilt bei den gemachten Messungen allgemein bis etwa 200 Hz, siehe auch die Abstrahlung bei den anderen Tönen der Tonleiter im Anhang. Diese gebündelte Abstrahlung der Westerngitarre im Gegensatz zur Resonatorgitarre könnte mit dem fehlenden Schallloch der Resonatorgitarre bzw. dem Fehlen einer gleichphasig schwingenden Decke zusammenhängen. Statt des Schalllochs besitzt die Resonatorgitarre den Resonator und nur zwei kleine F-Löcher (siehe Abbildung 1), die in diesem Frequenzbereich vermutlich nicht so stark zur Abstrahlung nach vorne beitragen. Außerdem besitzt die Resonatorgitarre im Vergleich zur Westerngitarre anstatt einer schwingfähigen Fichtendecke,



eine Decke der aus 5mm dickem Sperrholz.

Für höhere Frequenzen ab etwa 200 Hz nähert sich die Bündelungswirkung der Resonatorgitarre an die Bündelungswirkung der Westergitarre an ( $DI_{\max}$  von 4,6 bzw. 5,7 vs. 4,3 bzw. 5 für Frequenzen von 349 Hz bzw. 440 Hz), siehe Abbildung 7 und Tabelle 1. Die Bündelungswirkung der Westergitarre steigt dabei nicht weiter an. Um 220 Hz erreicht das Bündelungsmaß der Resonatorgitarre ein Maximum (Tabelle 1). In Abbildung 7 ist außerdem erkennbar, dass die Westergitarre tendenziell nach schräg oben abstrahlt, während die Resonatorgitarre gerade nach vorne abstrahlt. Diese Unterschiede können allerdings auf einer leicht anderen Ausrichtung der Gitarre (siehe Abbildung 1) beruhen. Ab etwa 400 Hz zeigt sich bei der Resonatorgitarre eine etwas stärkere Bündelung, als bei der Westergitarre. Diese Beobachtung trifft hier auf die Messung der Grundtöne zu, bei Messung der Obertöne (vgl. Tabelle 2) strahlt eher die Westergitarre gebündelter ab.

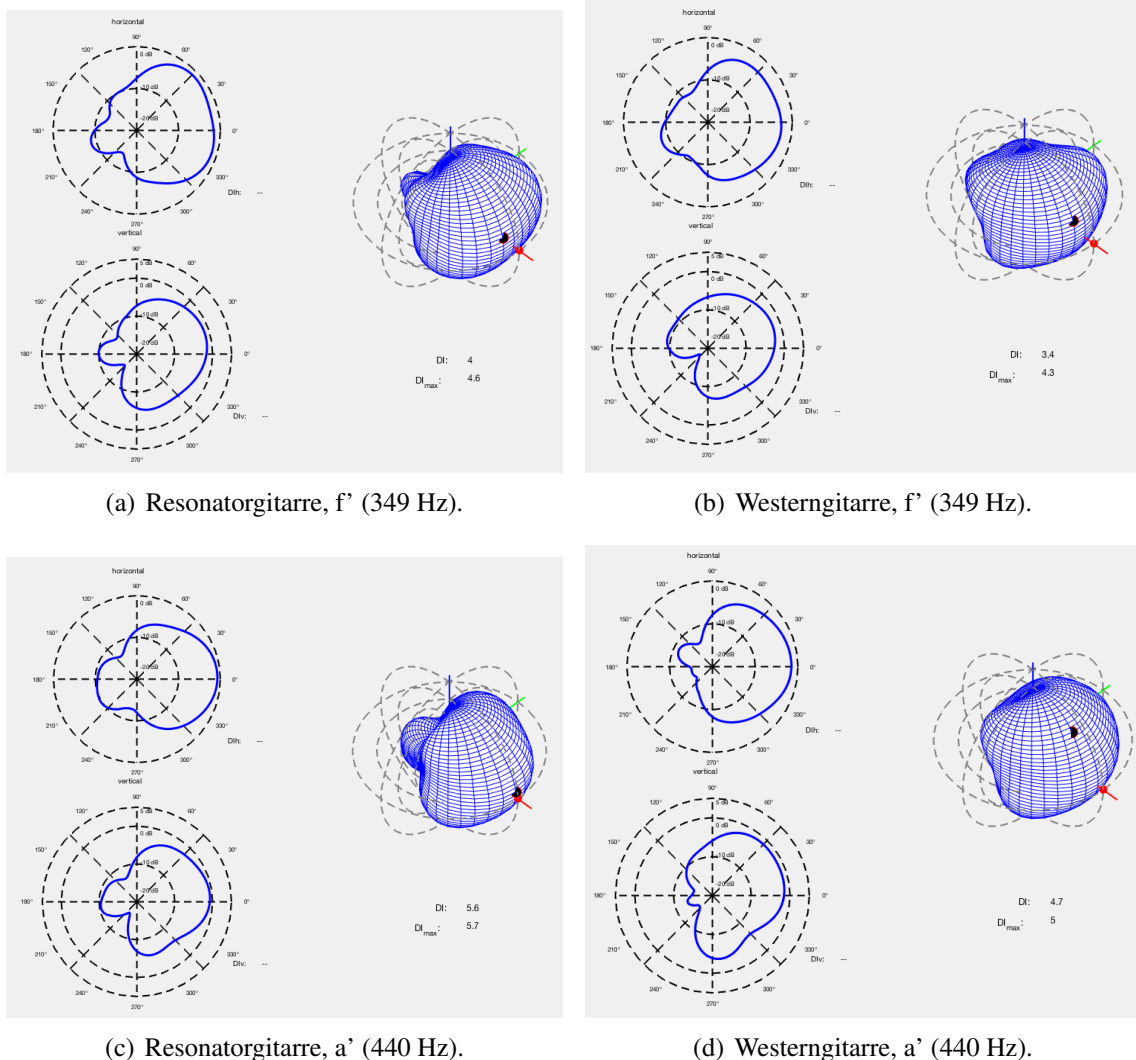


Abbildung 7 – Vergleich der Abstrahlung für 349 Hz und 440 Hz. Bei den horizontalen und vertikalen Schnitten befindet sich die  $0^\circ$  Richtung jeweils rechts.

	$DI_{\max}$ Resonatorgitarre	$DI_{\max}$ Westerngitarre
131 Hz (c)	2,5	4,8
147 Hz (d)	2,2	5,2
165 Hz (e)	2,1	5,4
175 Hz (f)	2,6	4,6
196 Hz (g)	4,2	4,5
220 Hz (a)	5,1	5,7
247 Hz (h)	3,6	4,7
262 Hz (c')	3,1	5,1
294 Hz (d')	4,8	5,2
330 Hz (e')	4,5	5
349 Hz (f')	4,6	4,3
392 Hz (g')	5,5	4,7
440 Hz (a')	5,7	5

Tabelle 1 –  $DI_{\max}$  für Resonatorgitarre und Westerngitarre. Gemessen wurde jeweils der Grundton.

Anstatt nur die Abstrahlung des angespielten (Grund-)Tones zu analysieren, wird in der folgenden Tabelle verglichen, wie sich die Abstrahlung der ersten 6 Obertöne von c' verhält. Die dazugehörigen Plots befinden sich ebenfalls im Anhang. Auch hier zeigt sich (außer bei 1572 und 1834 Hz) eine stärkere Bündelungswirkung bei der Westerngitarre gegenüber der Resonatorgitarre.

	$DI_{\max}$ Resonatorgitarre	$DI_{\max}$ Westerngitarre
262 Hz (c')	3,1	5,1
524 Hz (1. OT)	3,7	4,8
786 Hz (2. OT)	3,9	4,8
1048 Hz (3. OT)	4	4,3
1310 Hz (4. OT)	4	4,6
1572 Hz (5. OT)	4,7	4,7
1834 Hz (6. OT)	5,1	4,9

Tabelle 2 –  $DI_{\max}$  für Resonatorgitarre und Westerngitarre. Gemessen wurden jeweils die ersten 6 Obertöne von c'.

## 3 Messung der Richtwirkung von Gitarren in horizontalem und vertikalem Schnitt

### 3.1 Messaufbau

Als Messsystem dienen eine in Saggital- und eine in Transversalebene positionierte konzentrische, offene Kreisscheiben, welche jeweils mit 32 Messmikrofonen ausgestattet wurden. Bei den Mikrofonen handelt es sich um NTI M2230 mit Kugelcharakteristik, welche in einem Winkelabstand von ca.  $360/32=11.25^\circ$  in dafür vorgesehenen Halterungen an die Kreisscheiben montiert wurden. Diese dienen respektive als diskrete Messpunkte für Azimut- und Zenitwinkel.

Das akustische Zentrum des Messobjektes sollte sich während der Messung im Idealfall im geometrischen Zentrum der beiden Kreisscheiben befinden. Um dies bestmöglich zu verwirklichen waren Laserpointer an den Kreisringen befestigt, um das geometrische Zentrum leichter ausfindig machen zu können. Außerdem war ein Videostream vorhanden der als zusätzliche visuelle Kontrollmöglichkeit für die Ausrichtung des Messobjektes diente.

Um valide Messungen durchführen zu können ist ein exakter Pegelabgleich der einzelnen Mikrofone erforderlich. Dabei wird üblicherweise mit einem Pistonphon jedes Mikrofon bei einer bestimmten Frequenz auf einen vorgegebenen Pegel abgeglichen (z.B. 94dB @ 1kHz). Weder der Messaufbau noch die Aufnahme des Pistonphonpegels musste im Zuge des Labors selbst vorgenommen werden, da das Messsystem zuvor bereits in Verwendung war. Der eigentliche Messvorgang wurde über einen vorhandenen Pd-Patch gesteuert. Die einzelnen Mikrofonensignale werden bei jeder Messung als 64-Kanal \*.wav Datei gespeichert und können im Anschluss in Matlab geladen und weiterverarbeitet werden. Die folgende Abbildung zeigt das Messsystem im Einsatz.



Abbildung 8 – Messsystem zur Bestimmung der Abstrahlcharakteristik

## 3.2 Polarpattern & Spectrum Visualizer

Mit Hilfe der Matlab-Datei *myAudioVisualizer.m* lassen sich die Mikrofonsignale aus den erstellten \*.wav Dateien extrahieren und in Zeit- und Frequenzbereich darstellen. Dabei besteht die Möglichkeit, zwischen den einzelnen Kanälen frei zu wählen, außerdem lassen sich bei der spektralen Auswertung auch die Glättungsverfahren (Terz- (3) /Oktavband (1) etc.) variieren. Des Weiteren werden für die vom Benutzer frei definierbare Frequenz die horizontale sowie vertikale Abstrahlcharakteristik in Form von Polardiagrammen dargestellt. Der Azimutwinkel unterliegt dabei der mathematischen Winkelkonvention, der Zenithwinkel ist als Erhebungswinkel zu interpretieren. Neben den Polardiagrammen wird zusätzlich das zugehörige Bündelungsmaß (engl. *Directivity Index, DI*) in dB angegeben. Dieses bezieht die abgestrahlte Leistung on-axis (d.h. vorne,  $0^\circ$  Azimutwinkel und  $0^\circ$  Erhebungswinkel) auf die gesamte Abstrahlung gemessen am zugehörigen Einheitskreis, und gibt Auskunft darüber wie stark der Schall bei seiner Abstrahlung gebündelt wird.. Entsprechend wird das 2-dimensionale Bündelungsmaß horizontale Abstrahlung (*DI<sub>h</sub>*) und vertikale Abstrahlung (*DI<sub>v</sub>*) separat angegeben. Je breiter die Richtwirkung der Schallquelle, also je ungerichteter der Schall abgestrahlt wird, desto kleiner ist das Bündelungsmaß. Ein idealer Kugelstrahler, der gleichmäßig in alle Richtungen abstrahlt, besitzt somit ein Bündelungsmaß von 0 dB.

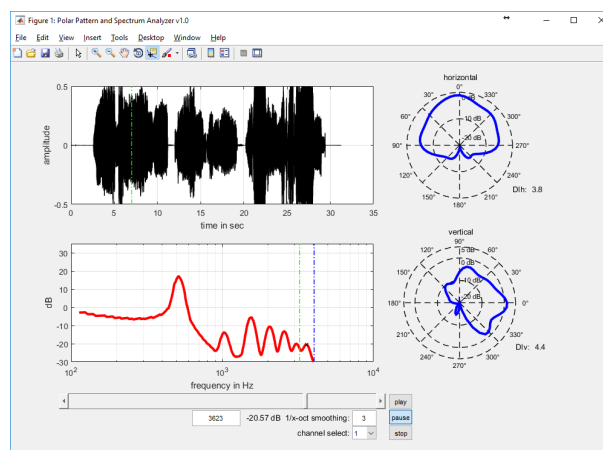


Abbildung 9 – Polarpattern & Spectrum Visualizer

## 3.3 Abstrahlverhalten in Azimuth- und Zenithwinkel

Um die Abstrahlcharakteristika der Gitarren genauer klassifizieren zu können, wurde jeweils sowohl eine Tonleiter über zwei Oktaven, als auch ein kurzes Klangsegment eines ausgewählten Musikstückes eingespielt. Dabei wurde bestmöglich darauf geachtet, bei beiden Instrumenten die selbe Position und Haltung einzunehmen um deren Einfluss auf die Messergebnisse minimal zu halten. Der Einfluss der Gitarrenhaltung auf die Richtcharakteristik wurde gesondert untersucht, einmal bei frontaler Ausrichtung des Schallochs und einmal mit leicht nach oben geneigtem Korpus der Gitarre. Diese Betrachtungen wur-

den lediglich für die Westerngitarre durchgeführt. Im folgenden Abschnitt sollen die Unterschiede im Abstrahlverhalten der Instrumente näher betrachtet werden. Die nachfolgende Abbildung zeigt beide Gitarrenhaltungen im Vergleich.

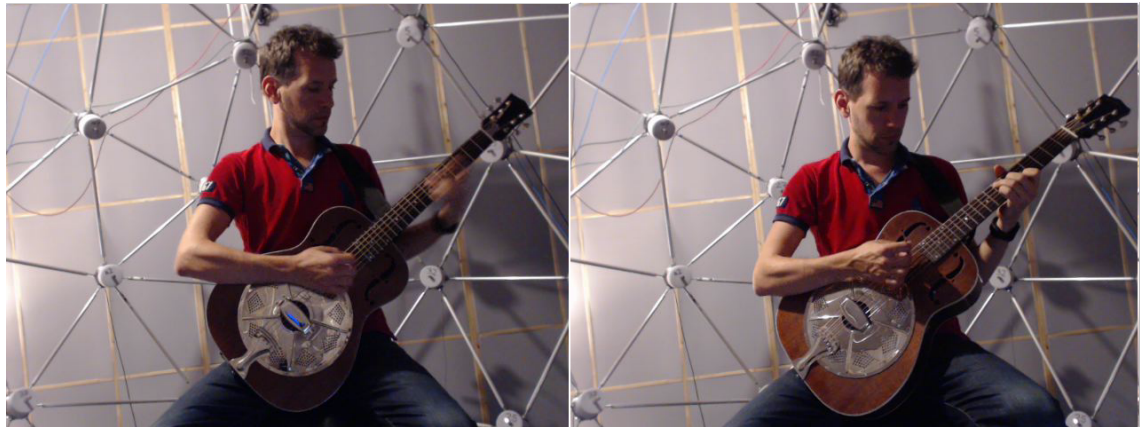


Abbildung 10 – Haltung 1 (links) und Haltung 2 (rechts) der Resonatorgitarre

### 3.3.1 Einfluss der Haltung

Um den Einfluss der Gitarrenhaltung auf das Abstrahlverhalten genauer beurteilen zu können, wurde für ausgewählte Töne der Tonleitersequenz Polardiagramme erstellt. Dabei wurde zuerst die Ausbreitung des Grundtones in Azimut- und Zenitwinkel betrachtet. Hierfür wurde die Frequenz des Grundtons, also der größte Peak im Frequenzspektrum, möglichst genau selektiert und als Mittenfrequenz eines Terzbandfilters definiert, welches in weiterer Folge für die Darstellung der Polardiagramme herangezogen wurde. Es wurde auch darauf geachtet, für beide Haltungen möglichst den gleichen Zeitbereich für die Betrachtungen heranzuziehen. Dieser wurde so gewählt, dass der eingeschwingenen Zustand betrachtet und der Einfluss von Anzupfgeräuschen/Transienten minimal wird.

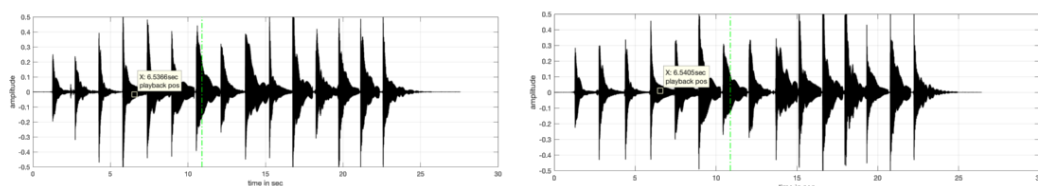


Abbildung 11 – Selektion des gleichen Tonsegments im Zeitbereich für Haltung 1 (links) und Haltung 2 (rechts)

**Grundton.** Die nachfolgende Abbildung zeigt den Vergleich des Abstrahlverhaltens beider Gitarrenhaltungen. Die Abbildung dieser, sowie aller folgender Richtmuster ist im Anhang noch einmal in voller Größe abgebildet.

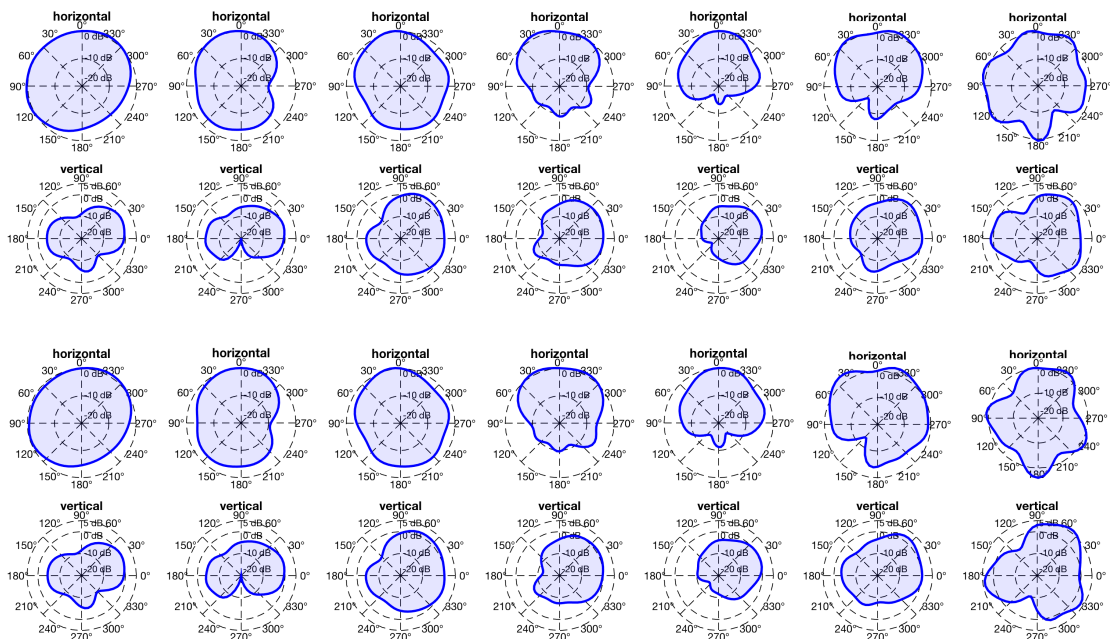


Abbildung 12 – Horizontale und vertikale Abstrahlcharakteristik der Westerngitarre bei Haltung 1 (oben) und Haltung 2 (unten). Die 0° Richtung befindet sich im horizontalen Fall oben und im vertikalen Fall rechts. Grundton: c @ 131 Hz, e @ 165 Hz, g @ 196 Hz, h @ 247 Hz, d' @ 294 Hz, f' @ 349 Hz, a' @ 440 Hz.

Bei tiefen Frequenzen scheint die Abstrahlung horizontal um die Gitarre in alle Richtungen ähnlich ausgeprägt zu sein. Der Schall breitet sich sowohl vor als auch hinter dem Instrument homogen aus. Der Abschattungseffekt durch den Körper des Musikers und die Richtungsbeeinflussung durch die Ausrichtung von Korpus und Schalloch wirken sich hier noch nicht wesentlich auf das Abstrahlverhalten aus. Je höher man im Frequenzbereich geht, desto stärker wird der Schall der Gitarre in Hauptabstrahlrichtung gebündelt und der Pegel hinter dem Instrument wird deutlich abgeschwächt. Ein weiterer Anstieg im Frequenzbereich führt jedoch wieder zu einer Verbreiterung der Abstrahlcharakteristik, da in diesem Bereich das Resonanzverhalten der Gitarre zum Tragen kommt.

Wie man sieht sind die Unterschiede im Abstrahlverhalten des Grundtons zwischen den beiden Gitarrenhaltungen minimal. Die horizontale Abstrahlcharakteristik bleibt weitgehend gleich. Es lässt sich zwar eine leichte Verschiebung der Hauptkeule im Erhebungswinkel erkennen, jedoch fällt diese auch eher marginal aus.

	<i>DI</i> Haltung 1 (horizontal/vertical)	<i>DI</i> Haltung 2 (horizontal/vertical)
131 Hz (c)	0.6 / 2.3	0.8 / 2.3
165 Hz (e)	1.6 / 2.6	1.6 / 2.6
196 Hz (g)	1.3 / 1.2	1.3 / 1.2
247 Hz (h)	2.5 / 2.4	2.3 / 2.2
294 Hz (d')	3.4 / 3.2	3.1 / 2.9
349 Hz (f')	2.2 / 2.2	1.0 / 1.7
440 Hz (a')	0.7 / 0.5	0.5 / (-0.6)

Tabelle 3 – *DI* für Westergitarre Haltung 1 und Haltung 2.

**Obertöne.** Betrachtet man das Abstrahlverhalten der einzelnen Teiltöne für beide Gitarrenhaltungen lässt sich vor allem bei höheren Frequenzen bei der zweiten Haltung eine leichte Erhöhung des Erhebungswinkels im vertikalen Polardiagramm ausfindig machen. Auch eine leichte exzentrische Verschiebung der Hauptkeule im Azimutwinkel ist aufgrund der Haltungsänderung vermerkbar. Die Abstrahlmuster der Teiltöne bleiben größtenteils ähnlich, leichte strukturelle Veränderungen ergeben sich natürlich trotzdem, da eine genaue Reproduktion des Spielverhaltens der Tonleiter nicht gewährleistet werden kann und auch der Betrachtungszeitpunkt nicht exakt übereinstimmt.

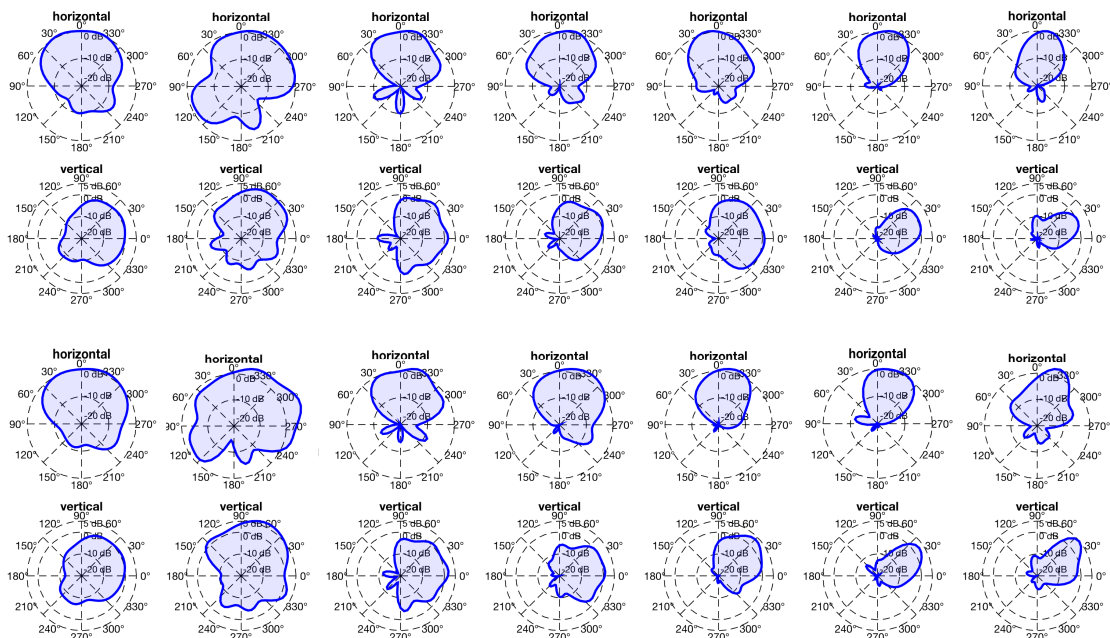


Abbildung 13 – Obertöne des Grundtones c' der Westergitarre mit Haltung 1 (oben) und Haltung 2 (unten). Die 0° Richtung befindet sich im horizontalen Fall oben und im vertikalen Fall rechts. Grundton c' @ 262 Hz, 1.OT @ 524 Hz, 2.OT @ 786 Hz, 3.OT @ 1048 Hz, 4.OT @ 1310 Hz, 5.OT 1572 Hz, 6.OT @ 1834 Hz.

	<i>DI</i> Haltung 1 (horizontal/vertical)	<i>DI</i> Haltung 2 (horizontal/vertical)
262 Hz (c')	2.7 / 2.7	2.5 / 2.3
524 Hz (1.OT)	1.4 / 0.2	0.6 / 0.7
786 Hz (2.OT)	4.2 / 3.0	4.2 / 3.2
1048 Hz (3.OT)	4.4 / 3.6	3.6 / 4.0
1310 Hz (4.OT)	4.6 / 4.1	5.5 / 3.0
1572 Hz (5.OT)	6.1 / 5.2	6.0 / 3.2
1834 Hz (6.OT)	6.4 / 4.2	4.7 / 2.6

Tabelle 4 – *DI* für Westerngitarre Haltung 1 und Haltung 2.

### 3.3.2 Vergleich Western-/Resonatorgitarre

In diesem Abschnitt soll nun das Abstrahlverhalten der Westerngitarre mit dem einer Resonatorgitarre verglichen werden. Beim Spielen der Resonatorgitarre versetzen die Gitarrensaiten den trichterförmigen Alu-Konus (Resonator) in Schwingung, die den Ton der Saiten wie eine Membran verstärken. Daher können Resonatorgitarren mit größerer Lautstärke gespielt werden als andere akustischen Gitarren. Dieser Unterschied sollte sich erwartungsgemäß in den Polardiagrammen widerspiegeln. Im nachfolgenden Abschnitt wird erneut das Abstrahlverhalten von ausgewählten Grundtönen der Tonleiter, sowie von den Teiltönen eines Beispieltones beider Gitarrentypen miteinander verglichen.

**Grundton.** Vergleicht man die Abstrahlcharakteristik der Westerngitarre mit der der Resonatorgitarre fällt auf, dass die erwartete Lautstärkenerhöhung durch den schwingenden Resonator in der zweiten Oktave der Tonleiter zum Tragen kommt. Im Bereich der tieffrequenten Grundtöne zeigt die Westerngitarre ein deutlich breiter ausgeprägtes Abstrahlverhalten, vorallem auch entgegen der Spielrichtung. Rund um die Grundtonfrequenzen von h und d' beginnt dann der Resonator seine Wirkung zu entfalten und das Richtdiagramm der Resonatorgitarre nimmt deutlich an Breite zu. Während die Westerngitarre bei der Grundfrequenz des d' sowohl horizontal als auch vertikal eine relativ starke Richtwirkung in Spielrichtung ausweist wird der Schall bei der Resonatorgitarre nahezu omnidirektional mit einheitlicher Amplitude abgestrahlt. Mit einem Trichterdurchmesser der Resonatorgitarre von etwa 25cm-30cm ist eine zunehmende Bündelung erst oberhalb einer Frequenz von ca. 500 Hz zu erwarten. Um die Auswirkung des Resonators auf die Bündelungsfähigkeit untersuchen zu können, müssen demnach höhere Frequenzen zur Betrachtung herangezogen werden. Aus diesem Grund wurde das Abstrahlverhalten im folgenden Abschnitt zusätzlich am Beispiel des Grundtones c' bei dessen Obertönen untersucht.



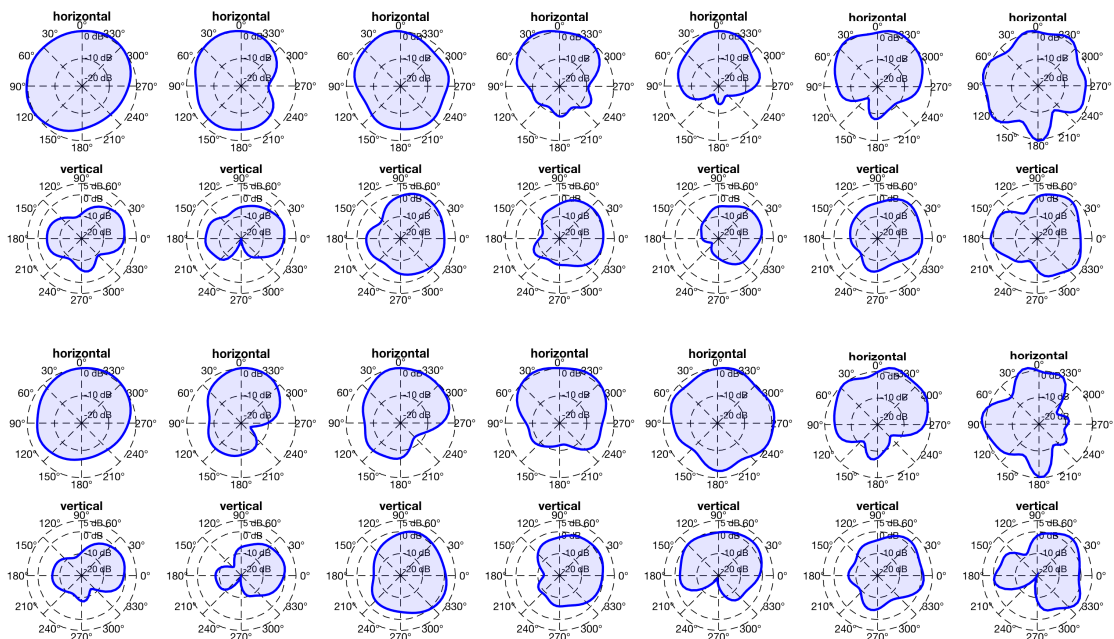


Abbildung 14 – Horizontale und vertikale Abstrahlcharakteristik der Westerngitarre (oben) und Resonatorgitarre (unten). Die 0° Richtung befindet sich im horizontalen Fall oben und im vertikalen Fall rechts. Grundton: c @ 131 Hz, e @ 165 Hz, g @ 196 Hz, h @ 247 Hz, d' @ 294 Hz, f' @ 349 Hz, a' @ 440 Hz.

	<i>DI</i> Westerngitarre (horizontal/vertikal)	<i>DI</i> Resonatorgitarre (horizontal/vertikal)
131 Hz (c)	0.6 / 2.3	1.4 / 3.1
165 Hz (e)	1.6 / 2.6	3.0 / 3.6
196 Hz (g)	1.3 / 1.2	2.3 / 1.3
247 Hz (h)	2.5 / 2.4	2.0 / 1.9
294 Hz (d')	3.4 / 3.2	0.9 / 1.0
349 Hz (f')	2.2 / 2.2	1.9 / 2.4
440 Hz (a')	0.7 / 0.5	1.9 / 0.7

Tabelle 5 – *DI* für Westerngitarre und Resonatorgitarre.

**Obertöne.** Nicht nur die Grundtöne weisen eine eigene Richtcharakteristik auf, sondern auch alle dazugehörigen Obertöne sind in ihrer Ausbreitung unterschiedlich gerichtet. Im nachfolgenden Abschnitt soll beispielhaft der Grundton  $c'$  und all seine zugehörigen Teiltöne in ihrem Abstrahlverhalten für Western- und Resonatorgitarre analysiert werden. Bei der Westerngitarre wird ersichtlich, dass der erste Oberton ein deutlich ungerichteteres, breiteres Abstrahlverhalten aufweist als der Grundton selbst. Betrachtet man höhere Teiltonfrequenzen fällt auf, dass die Richtwirkung mit steigender Tonhöhe bei der Westerngitarre immer stärker zunimmt. Die Hauptkeule wird zu hohen Frequenzen hin immer schmaler und richtet sich sowohl horizontal als auch vertikal in Spielrichtung aus. Bei der Resonatorgitarre ist wiederum ein gänzlich anderes Teiltonverhalten zu erkennen. Je höher die Frequenz des Obertones wird, desto komplexer wird auch sein Abstrahlungsmuster. Im Gegensatz zur Westerngitarre nimmt die Richtwirkung bei höheren Teiltönen nicht zu sondern die Teiltöne werden zunehmend ungerichteter abgestrahlt. Auch die Amplitude der Teiltöne ist ausgeprägter, die Wirkung des Resonators ist bei den höheren Teiltönen deutlich zu erkennen, führt aber offensichtlich eher zu keiner stärkeren Bündelung.

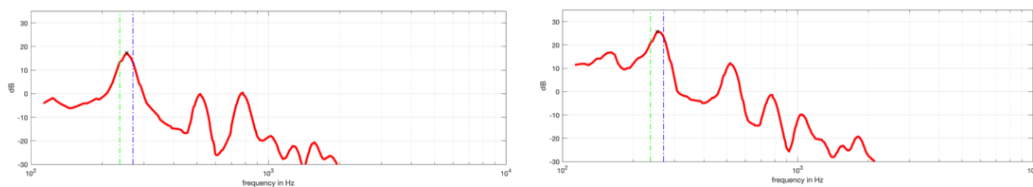


Abbildung 15 – Teiltonspektrum für den Ton  $c'$  von Western- (links) und Resonatorgitarre (rechts)

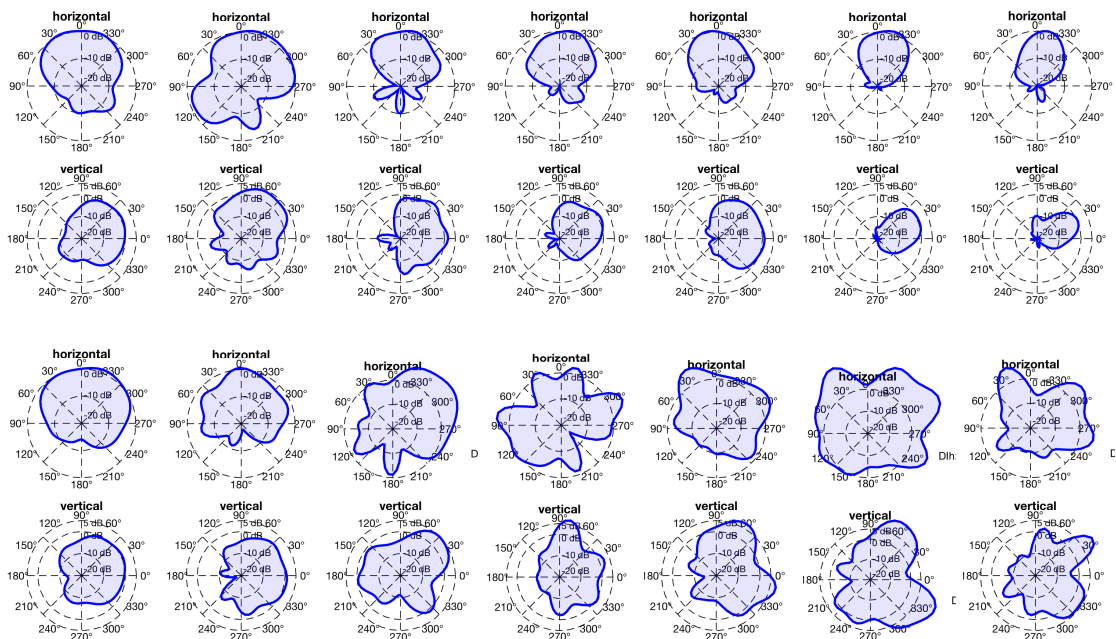


Abbildung 16 – Obertöne des Grundtones  $c'$  der Western- (oben) und Resonatorgitarre (unten). Die  $0^\circ$  Richtung befindet sich im horizontalen Fall oben und im vertikalen Fall rechts. Grundton  $c'$  @ 262 Hz, 1.OT @ 524 Hz, 2.OT @ 786 Hz, 3.OT @ 1048 Hz, 4.OT @ 1310 Hz, 5.OT 1572 Hz, 6.OT @ 1834 Hz.

	<i>DI</i> Westerngitarre (horizontal/vertikal)	<i>DI</i> Resonatorgitarre (horizontal/vertikal)
262 Hz ( $c'$ )	2.7 / 2.7	2.2 / 2.2
524 Hz (1.OT)	1.4 / 0.2	2.9 / 2.8
786 Hz (2.OT)	4.2 / 3.0	0.2 / 0.9
1048 Hz (3.OT)	4.4 / 3.6	0.7 / 0.9
1310 Hz (4.OT)	4.6 / 4.1	0.9 / 2.6
1572 Hz (5.OT)	6.1 / 5.2	(-2.2) / (-0.9)
1834 Hz (6.OT)	6.4 / 4.2	1.1 / (-2.1)

Tabelle 6 – *DI* für Westerngitarre und Resonatorgitarre.

## 4 Zusammenfassung

**Vergleich der Plots.** Ein Vergleich der beiden Aufnahmeverfahren und Plots bringt leider keine konsistenten Ergebnisse. Die Daten der 64-kanaligen Mikrofonkugel lassen auf eine stärkere Bündelungswirkung der Westerngitarre bei tiefen Frequenzen (unter Betrachtung der Grundtöne) bis etwa 200 Hz schließen, die Daten der höher auflösenden horizontalen und vertikalen Kreismikrofonanordnung zeigen eine leicht stärkere Bündelung der Resonatorgitarre (Vergleiche z.B. Abbildungen 5 und 14 und Tabellen 1, 5). Für höhere Frequenzen sind bei Betrachtung der Grundtöne für beide Analyseverfahren keine systematischen Unterschiede in der Bündelung zwischen den beiden Gitarren mehr ableitbar. Die höhere horizontale und vertikale Auflösung des Doppelkreismikrofonarrays hat für diese Aufnahmen keine größere Erkenntnis erbracht. Auffällig ist die starke Bündelung der Westerngitarre bei d' (siehe Tabellen 1, 5), die mit einer Resonanz des Schalllochs zu tun haben könnte.

Die Analyse der Obertonausprägungen (vgl. Tabellen 2 und 6) zeigt für beide Messverfahren eine stärkere Bündelung bei der Westerngitarre im Vergleich zur Resonatorgitarre. Obwohl bei diesen Frequenzen über 500 Hz der Resonator zu bündeln beginnen sollte, geschieht das offensichtlich nicht. Vermutlich schwingt der Resonatorkonus schon bei Frequenzen über 1 kHz nicht mehr als eine feste Masse, die die Bündelung einer Kolbenmembran verursacht.

**Hörvergleich.** Mit Hilfe des RoomEncoders<sup>4</sup> kann die enkodierte 64-Kanal-Aufnahme als virtuelle Quelle in einem Raum platziert werden und dann die Klangänderung aufgrund der Richtwirkung aus einer beliebigen Richtung angehört werden. Dazu wurde nur der durch den RoomEncoder erzeugte W-Kanal angehört und auf Klangänderungen bei verschiedenen Hörrichtungen zwischen den beiden Gitarren geachtet. Die stärkere Bündelung der Westerngitarre bei tiefen Frequenzen (im Vergleich zur Resonatorgitarre, vgl. Kugelarraymessung, Abbildung 5) konnte damit akustisch nachvollzogen werden. Bei höheren Frequenzen fallen bei Vergleich verschiedener Hörrichtungen vor allem Klangfarbenunterschiede auf, eine Aussage über stärkere bzw. schwächere Bündelung einer der beiden Gitarren konnte wie auch bei der Analyse der Plots bzw. Tabellen nicht gemacht werden.

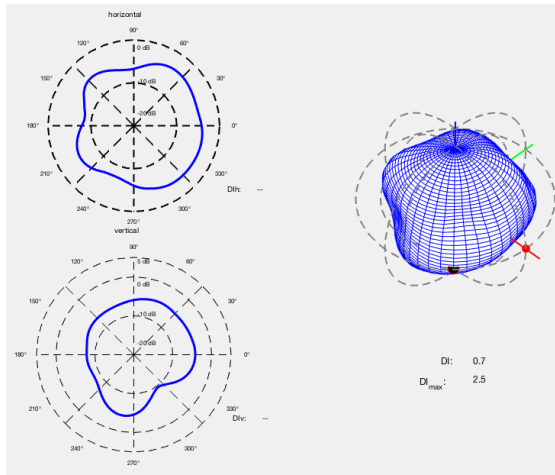
---

4. <https://plugins.iem.at/>

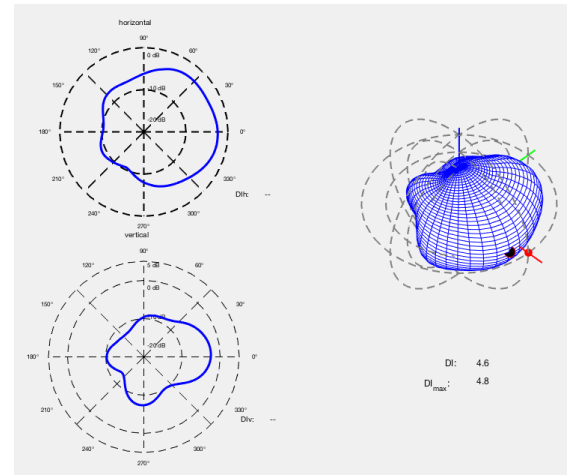
## Literatur

- [TSC15] J. G. Tylka, R. Sridhar, and E. Y. Choueiri, “A database of loudspeaker polar radiation measurements,” in *Convention e-Brief 230, 139th Conv. Audio Eng. Soc.*, New York, USA, 2015.
- [ZF18] F. Zotter and M. Frank, *Ambisonics as practical 3D audio theory*, 2018, Version 16.01.2018.

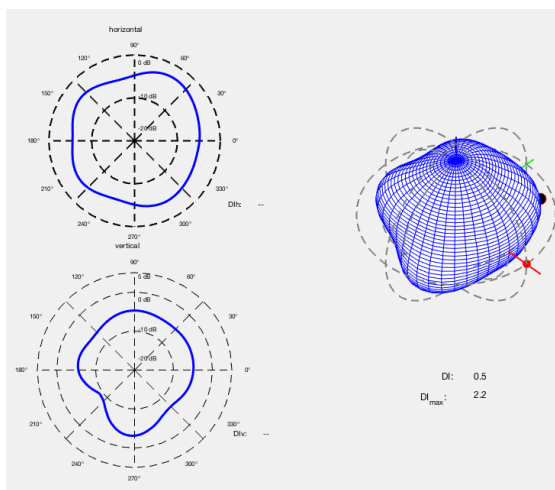
## 5 Anhang



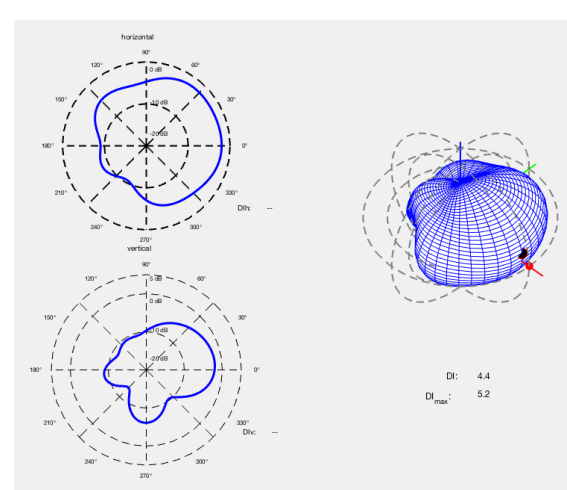
(a) Resonatorgitarre, c (131 Hz).



(b) Westerngitarre, c (131 Hz).

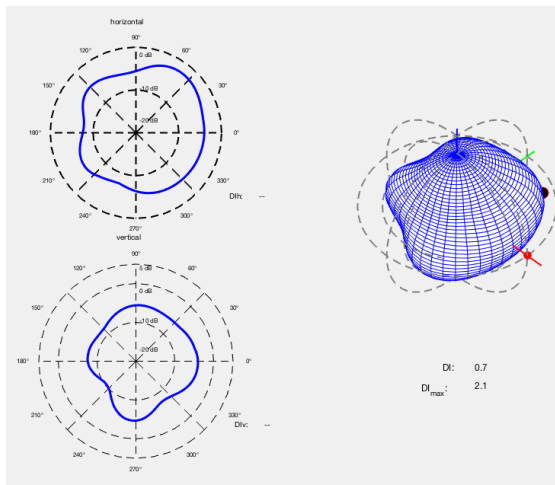


(c) Resonatorgitarre, d (147 Hz).

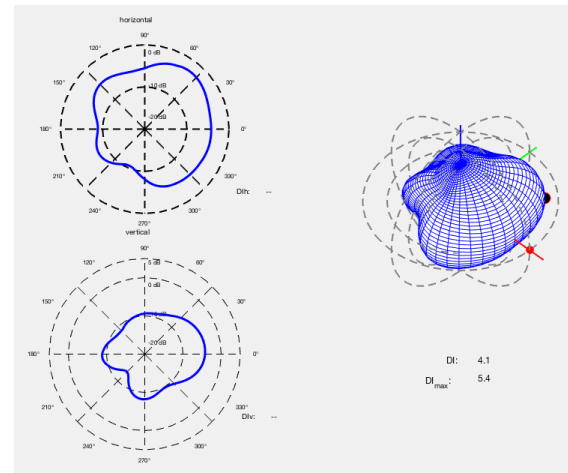


(d) Westerngitarre, d (147 Hz).

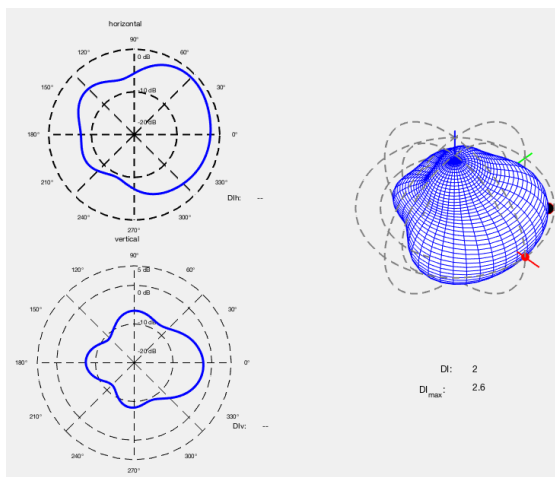
Abbildung 17 – Vergleich der Richtmuster für die Messung mit Mikrofongugel. Bei den horizontalen und vertikalen Schnittplots befindet sich die 0° Richtung jeweils rechts.



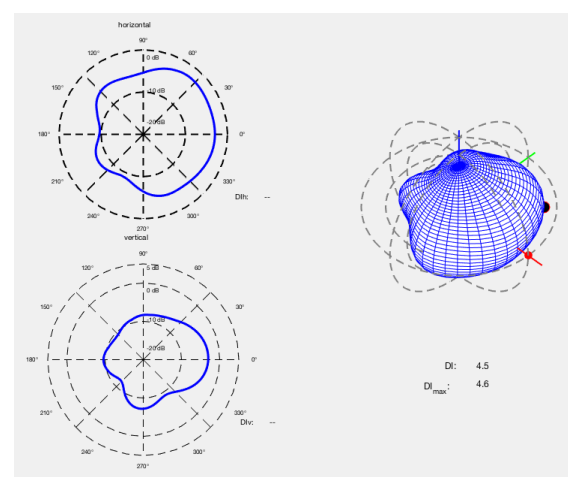
(a) Resonatorgitarre, e (165 Hz).



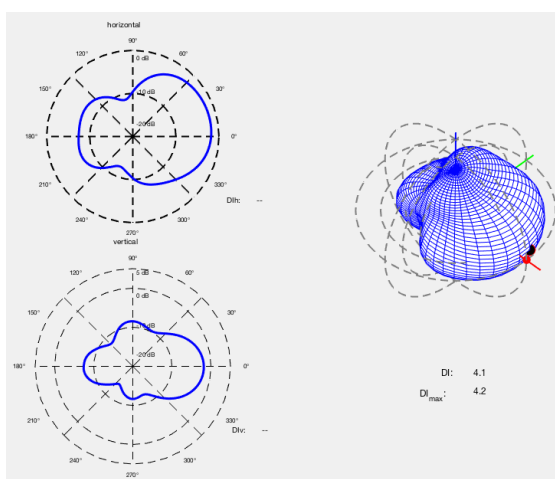
(b) Westerngitarre, e (165 Hz).



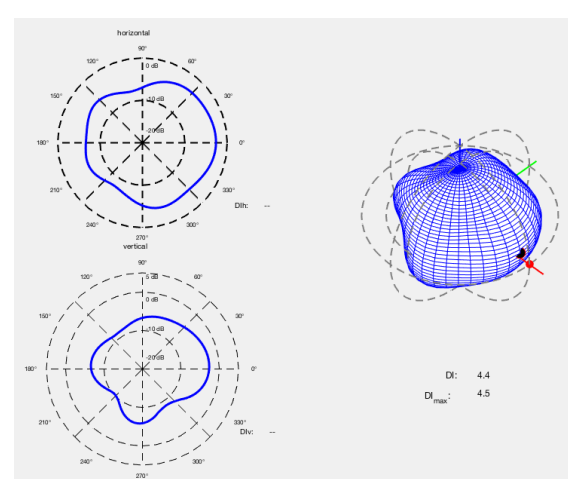
(c) Resonatorgitarre, f (175 Hz).



(d) Westerngitarre, f (175 Hz).

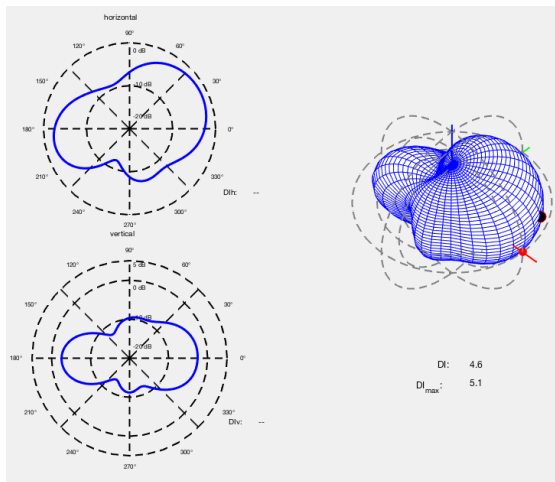


(e) Resonatorgitarre, g (196 Hz).

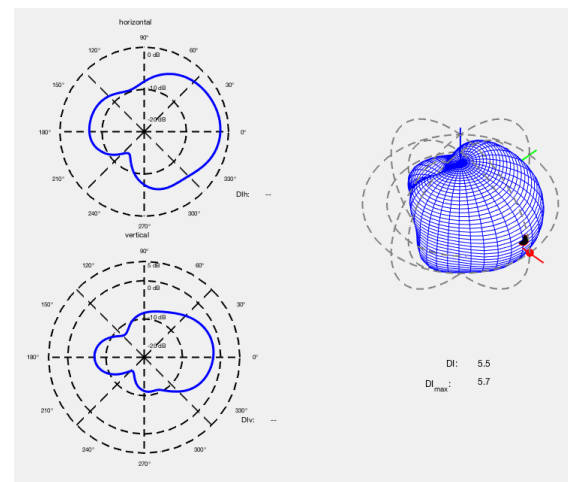


(f) Westerngitarre, g (196 Hz).

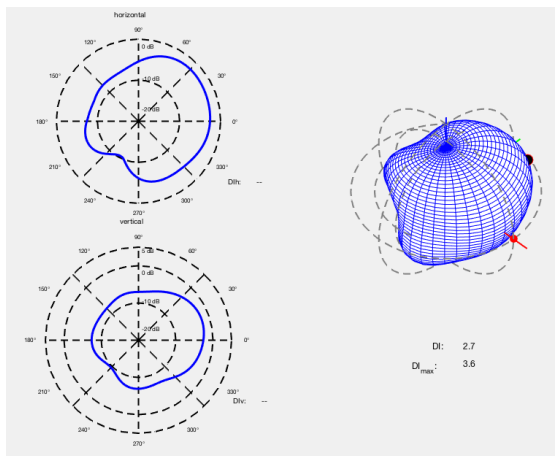
Abbildung 18 – Vergleich der Richtmuster für die Messung mit Mikrophonkugel. Bei den horizontalen und vertikalen Schnittplots befindet sich die 0° Richtung jeweils rechts.



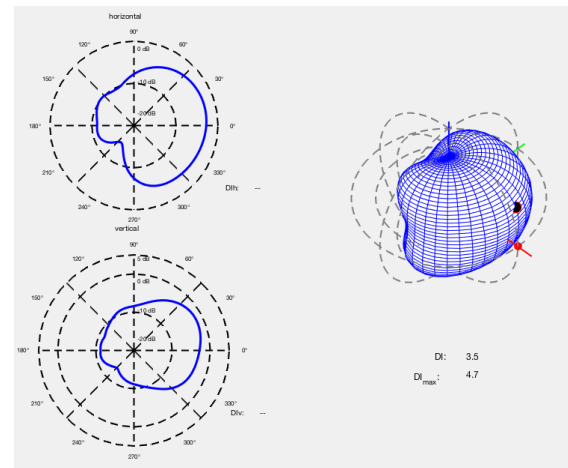
(a) Resonatorgitarre, a (220 Hz).



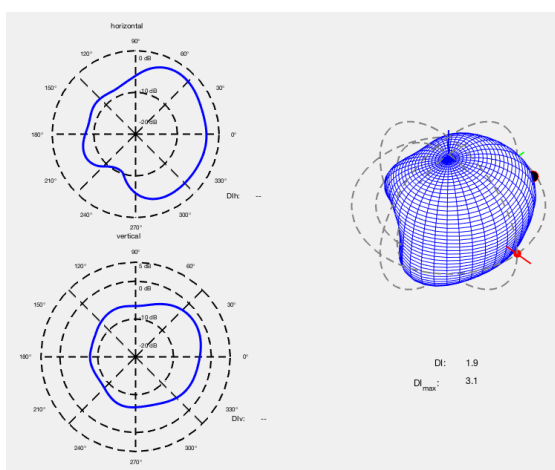
(b) Westerngitarre, a (220 Hz).



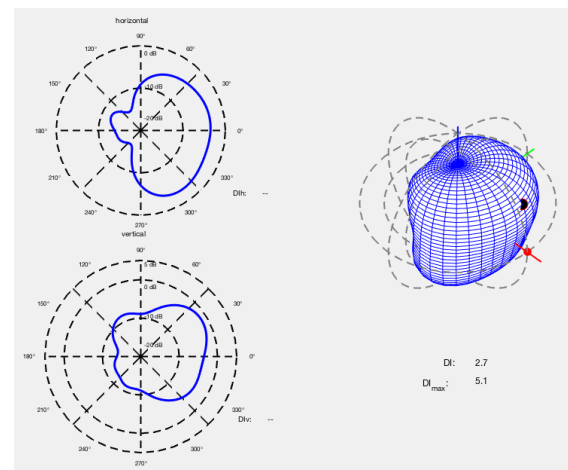
(c) Resonatorgitarre, h (247 Hz).



(d) Westerngitarre, h (247 Hz).



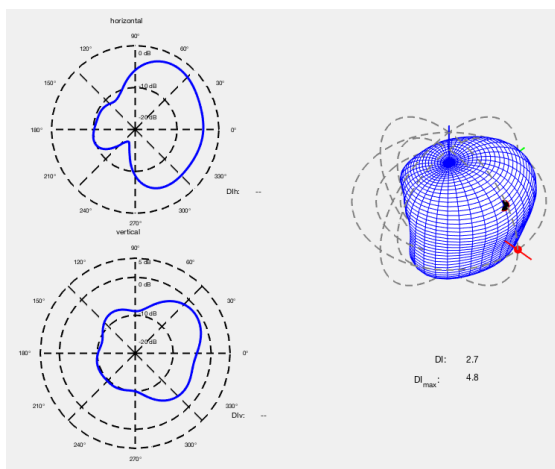
(e) Resonatorgitarre, c' (262 Hz).



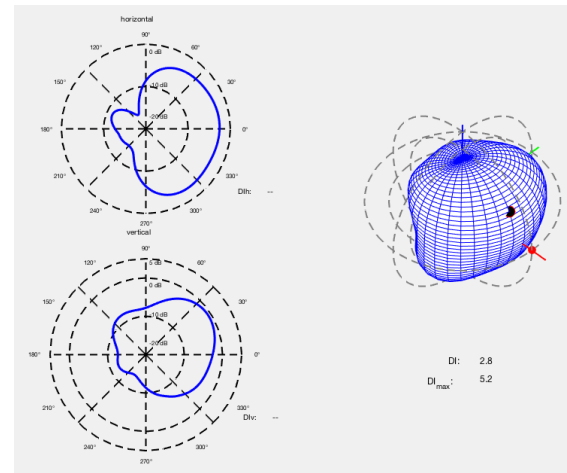
(f) Westerngitarre, c' (262 Hz).

Abbildung 19 – Vergleich der Richtmuster für die Messung mit Mikrofonkugel. Bei den horizontalen und vertikalen Schnittplots befindet sich die 0° Richtung jeweils rechts.

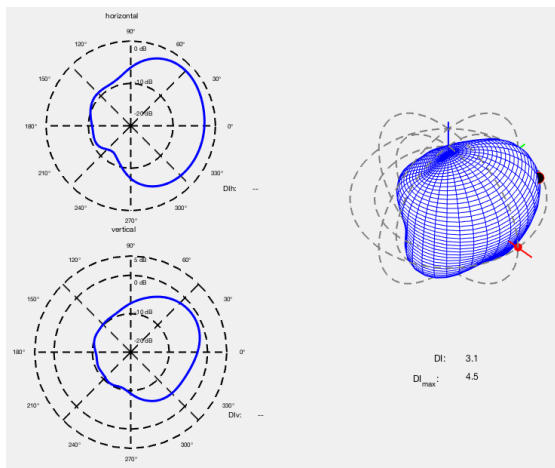




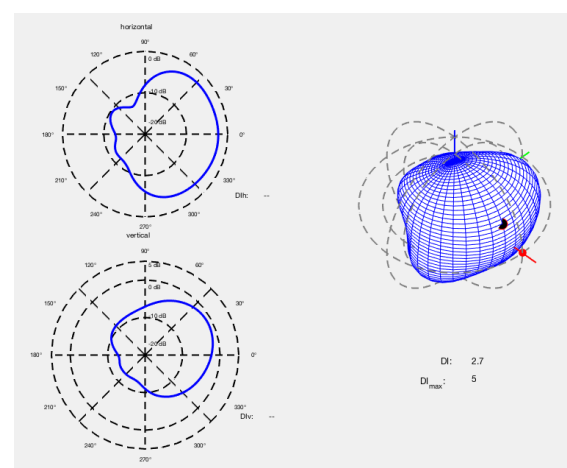
(a) Resonatorgitarre, d' (294 Hz).



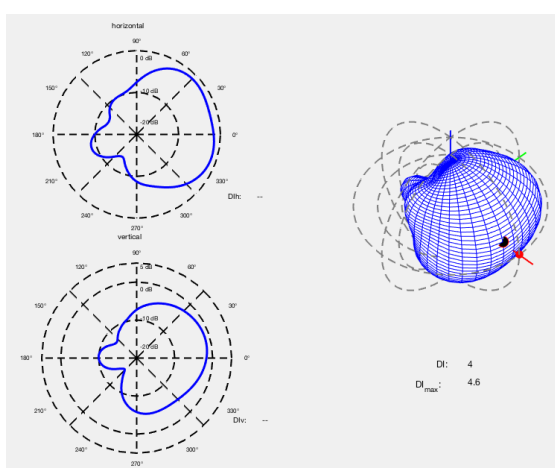
(b) Westergitarre, d' (294 Hz).



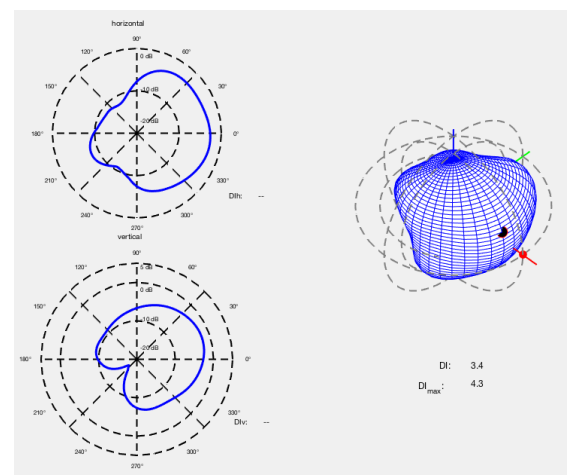
(c) Resonatorgitarre, e' (330 Hz).



(d) Westergitarre, e' (330 Hz).



(e) Resonatorgitarre, f' (349 Hz).



(f) Westergitarre, f' (349 Hz).

Abbildung 20 – Vergleich der Richtmuster für die Messung mit Mikrofonkugel. Bei den horizontalen und vertikalen Schnittplots befindet sich die 0° Richtung jeweils rechts.

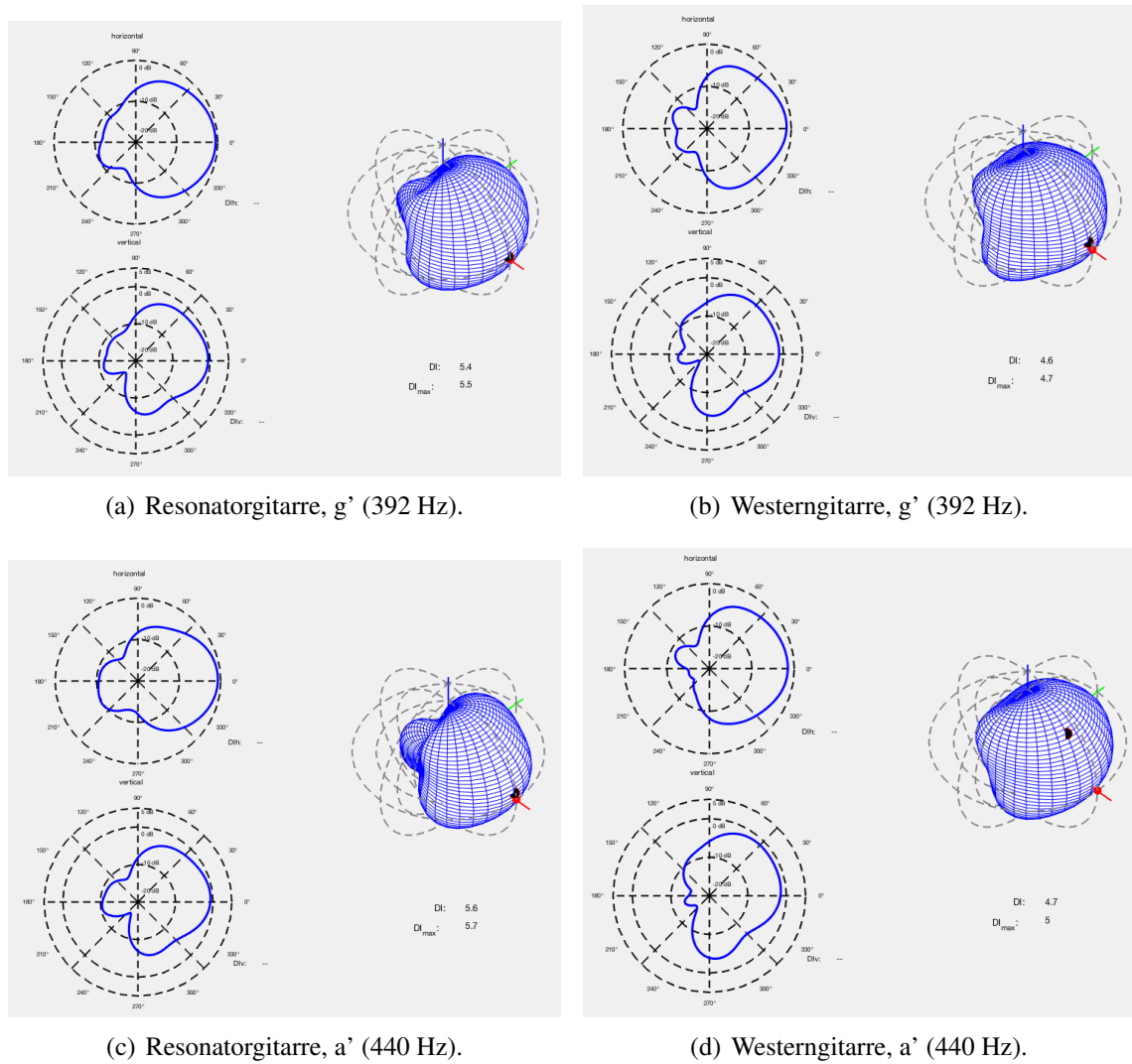
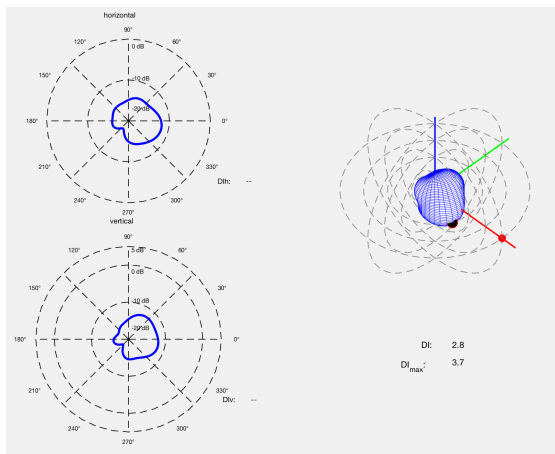
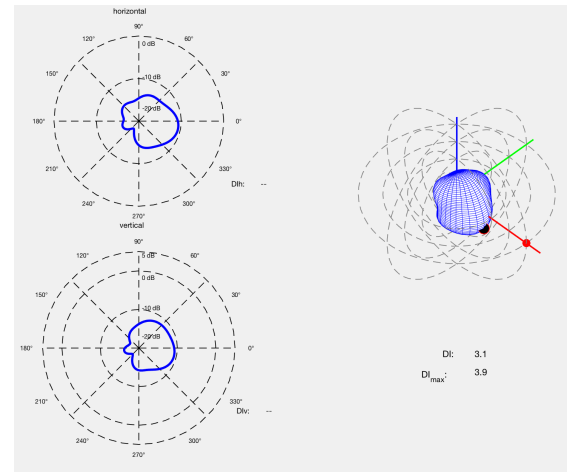


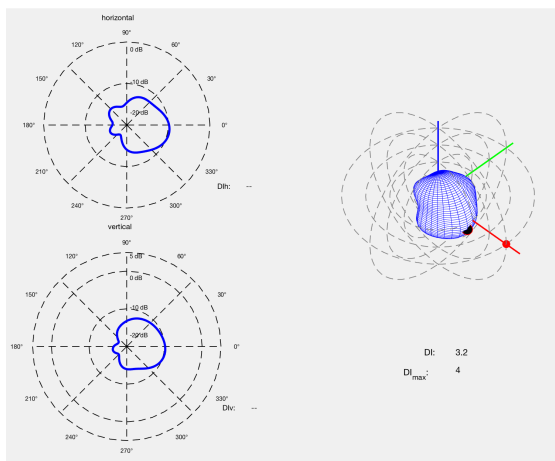
Abbildung 21 – Vergleich der Richtmuster für die Messung mit Mikrofonkugel. Bei den horizontalen und vertikalen Schnittplots befindet sich die 0° Richtung jeweils rechts.



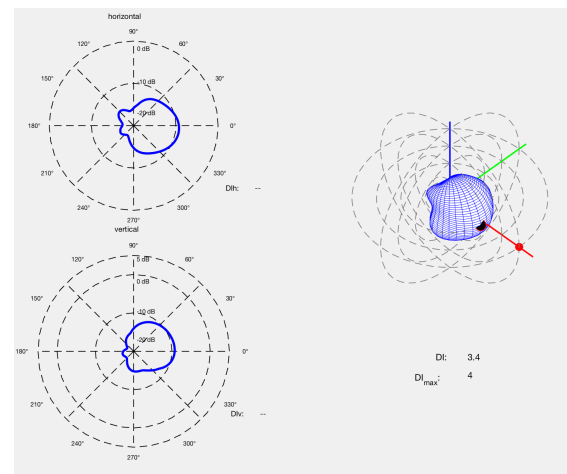
(a) Resonatorgitarre, 1. OT zu c' (524 Hz).



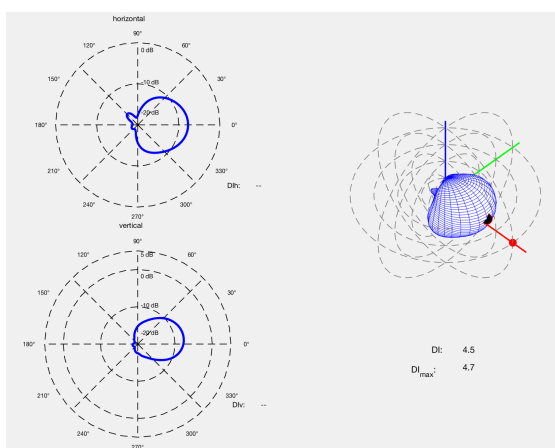
(b) Resonatorgitarre, 2. OT zu c' (786 Hz).



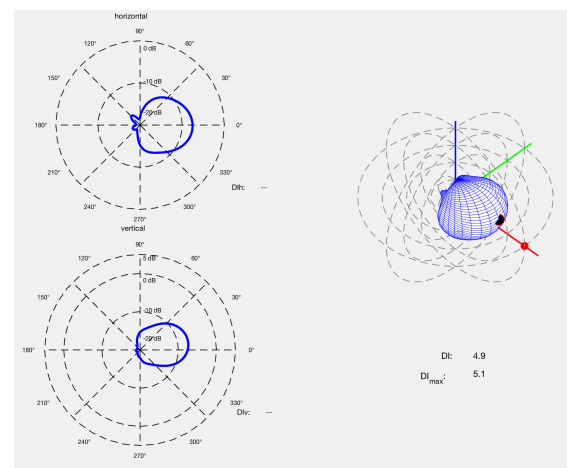
(c) Resonatorgitarre, 3. OT zu c' (1048 Hz).



(d) Resonatorgitarre, 4. OT zu c' (1310 Hz).

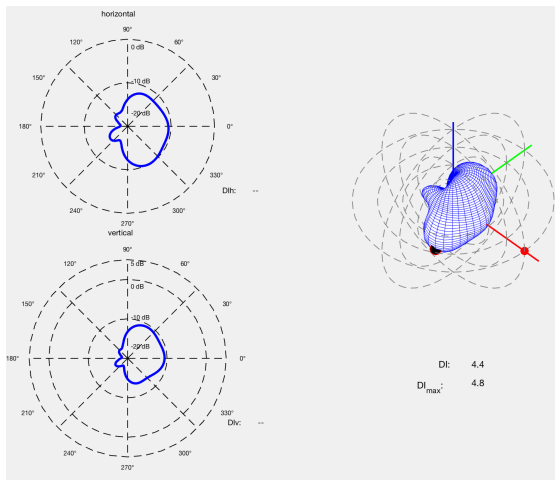


(e) Resonatorgitarre, 5. OT zu c' (1572 Hz).

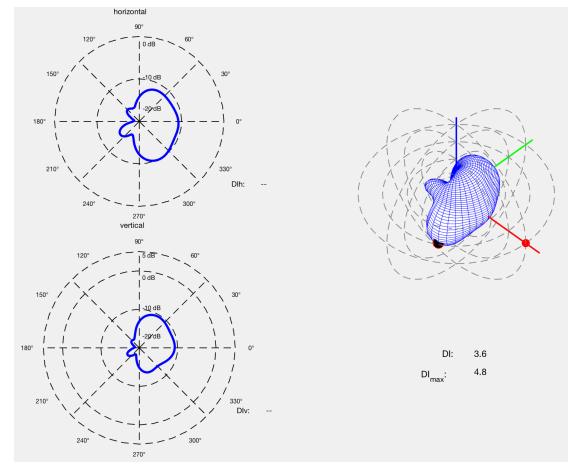


(f) Resonatorgitarre, 6. OT zu c' (1834 Hz).

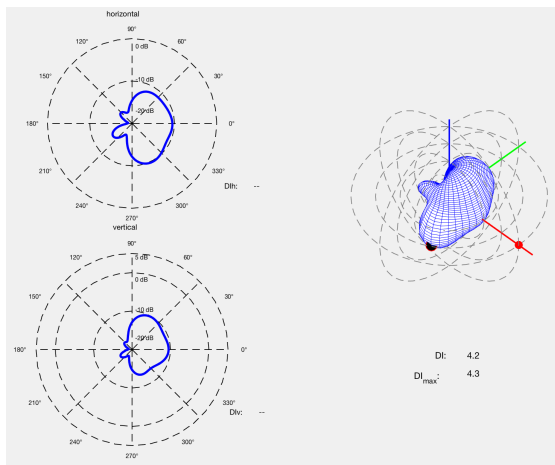
Abbildung 22 – Vergleich der Richtmuster für die Messung mit Mikrofonkugel. Bei den horizontalen und vertikalen Schnittplots befindet sich die 0° Richtung jeweils rechts.



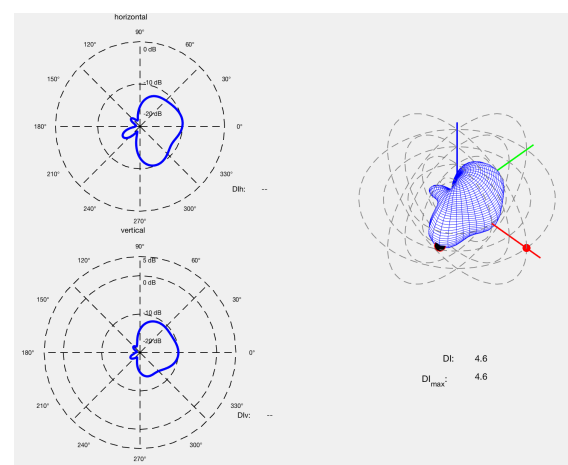
(a) Westerngitarre, 1. OT zu c' (524 Hz).



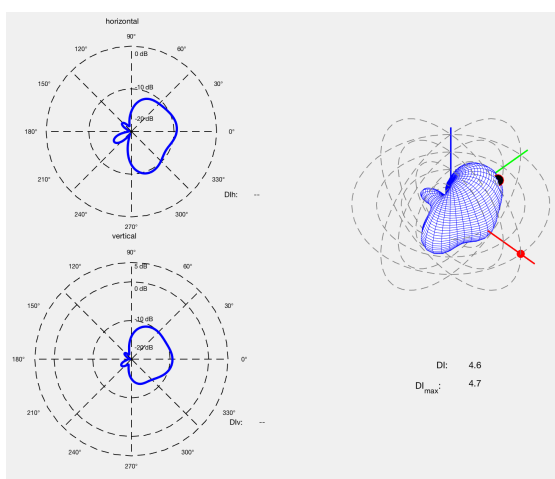
(b) Westerngitarre, 2. OT zu c' (786 Hz).



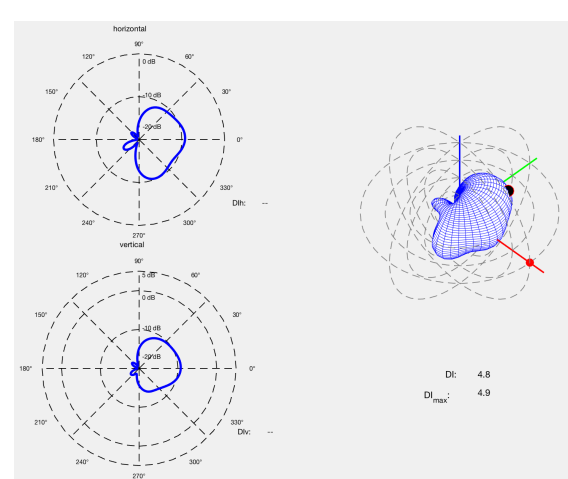
(c) Westerngitarre, 3. OT zu c' (1048 Hz).



(d) Westerngitarre, 4. OT zu c' (1310 Hz).



(e) Westerngitarre, 5. OT zu c' (1572 Hz).



(f) Westerngitarre, 6. OT zu c' (1834 Hz).

Abbildung 23 – Vergleich der Richtmuster für die Messung mit Mikrofonkugel. Bei den horizontalen und vertikalen Schnittplots befindet sich die 0° Richtung jeweils rechts.

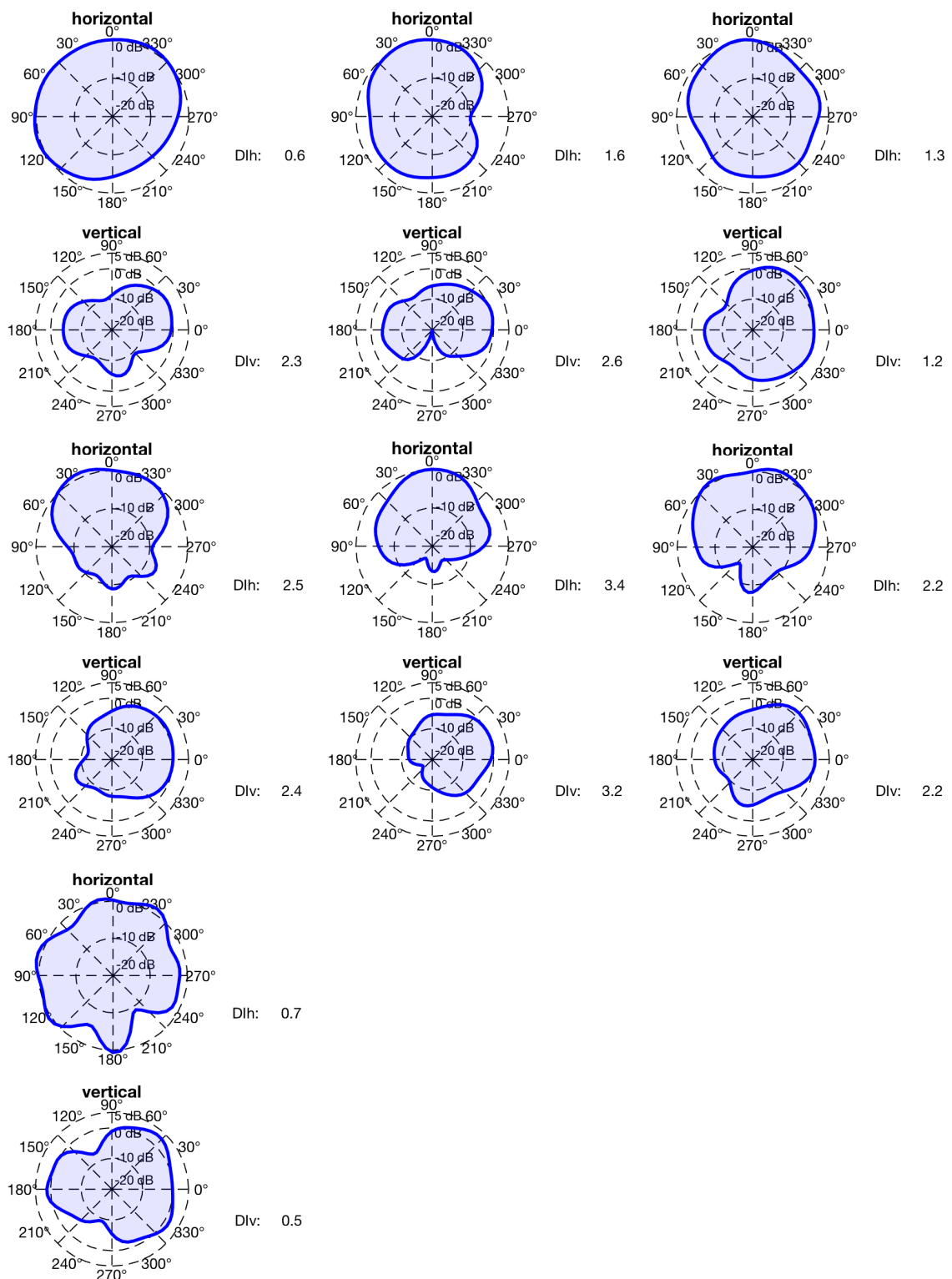


Abbildung 24 – Horizontale und vertikale Abstrahlcharakteristik der Westerngitarre bei Haltung 1. Von links nach rechts: c @ 131 Hz, e @ 165 Hz, g @ 196 Hz (Oben); h @ 247 Hz, d' @ 294 Hz, f' @ 349 Hz (Mitte); a' @ 440 Hz (Unten)

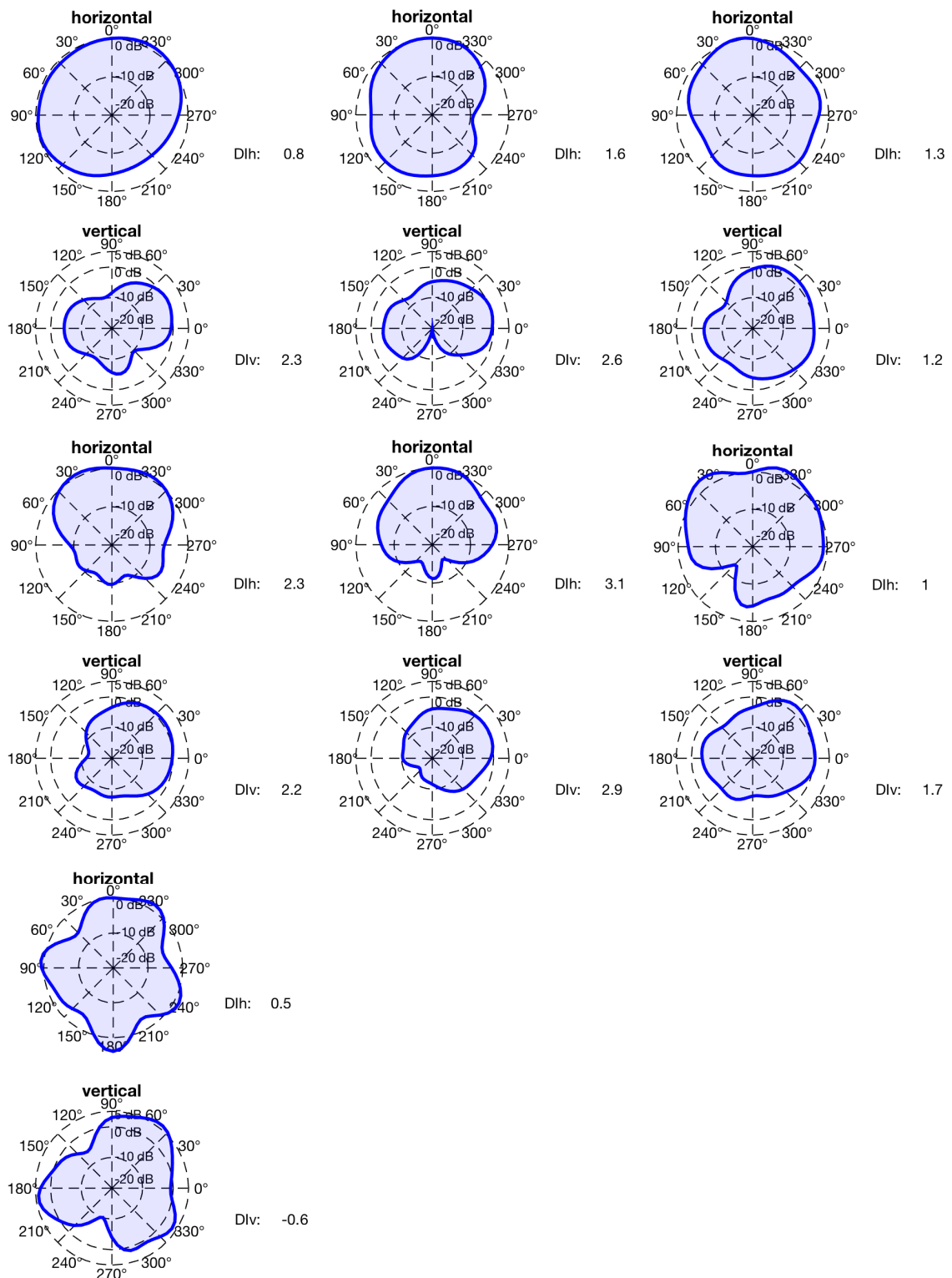


Abbildung 25 – Horizontale und vertikale Abstrahlcharakteristik der Westerngitarre bei Haltung 2. Von links nach rechts: c @ 131 Hz, e @ 165 Hz, g @ 196 Hz (Oben); h @ 247 Hz, d' @ 294 Hz, f' @ 349 Hz (Mitte); a' @ 440 Hz (Unten)

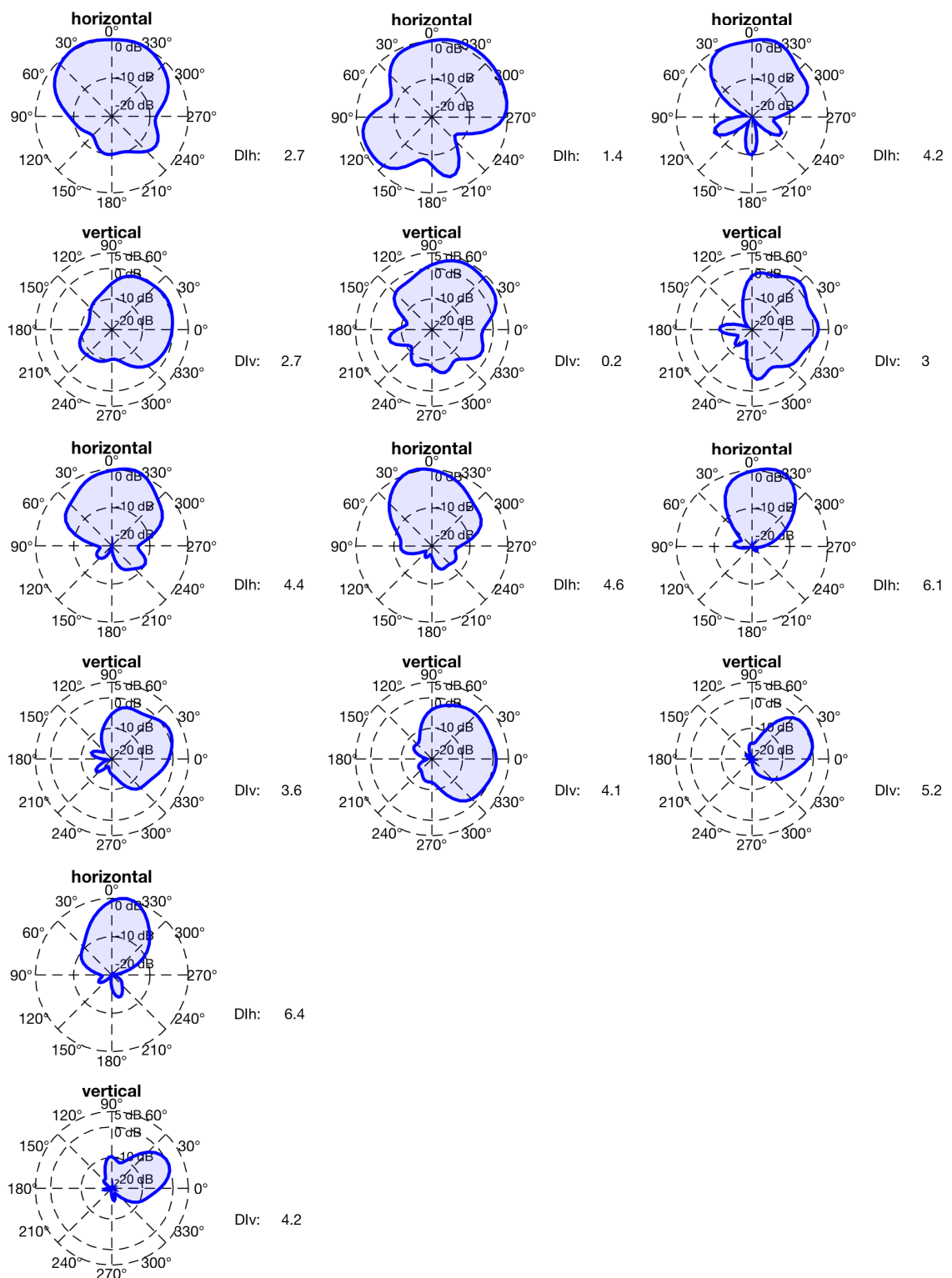


Abbildung 26 – Obertöne des Grundtones c' der Westerngitarre mit Haltung 1. Von links nach rechts: Grundton c' @ 262 Hz, 1.OT @ 524 Hz, 2.OT @ 786 Hz (Oben); 3.OT @ 1048 Hz, 4.OT @ 1310 Hz, 5.OT 1572 Hz (Mitte); 6.OT @ 1834 Hz (Unten)

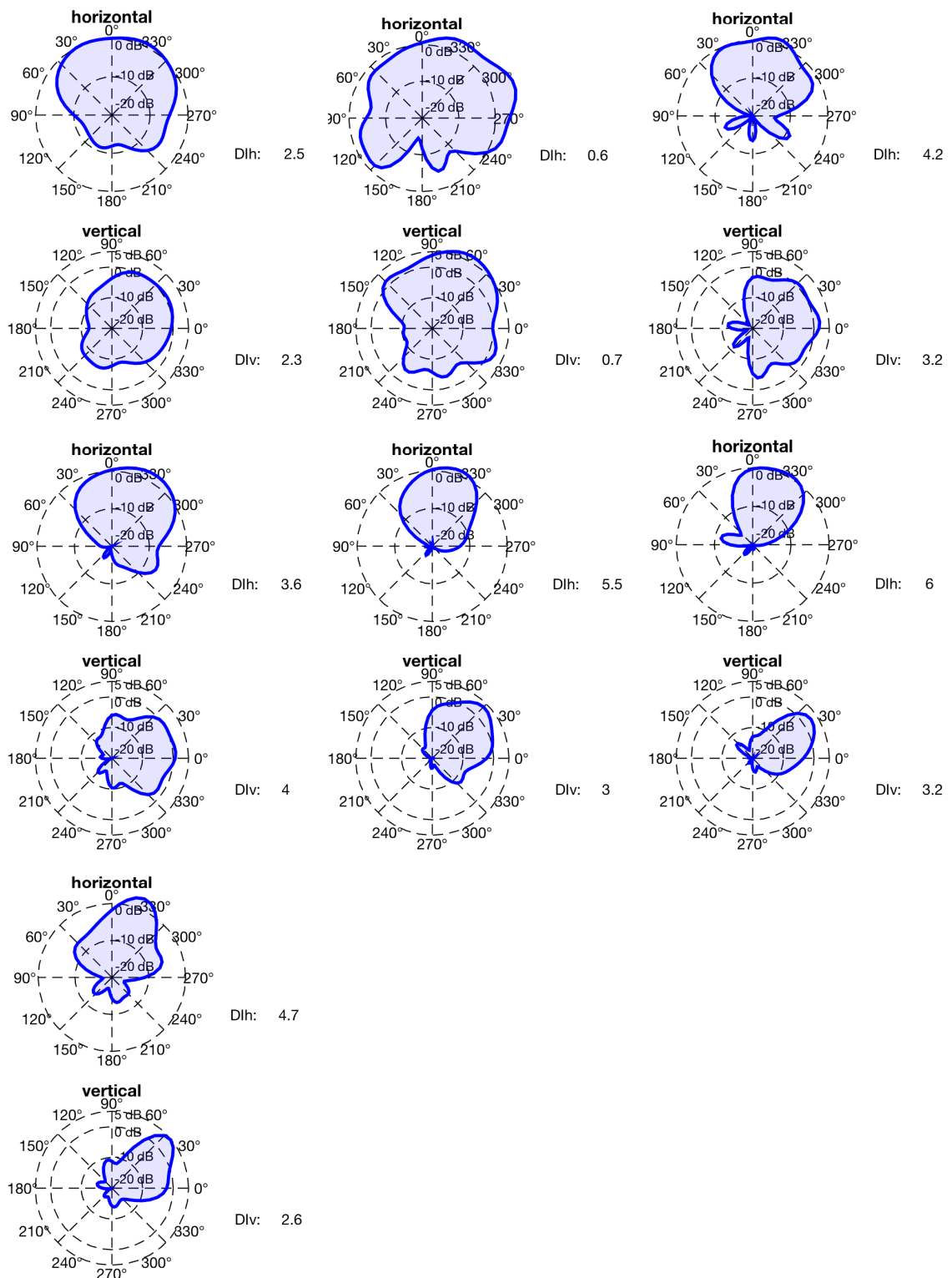


Abbildung 27 – Obertöne des Grundtones c' der Westerngitarre mit Haltung 2. Von links nach rechts: Grundton c' @ 262 Hz, 1.OT @ 524 Hz, 2.OT @ 786 Hz (Oben); 3.OT @ 1048 Hz, 4.OT @ 1310 Hz, 5.OT 1572 Hz (Mitte); 6.OT @ 1834 Hz (Unten)



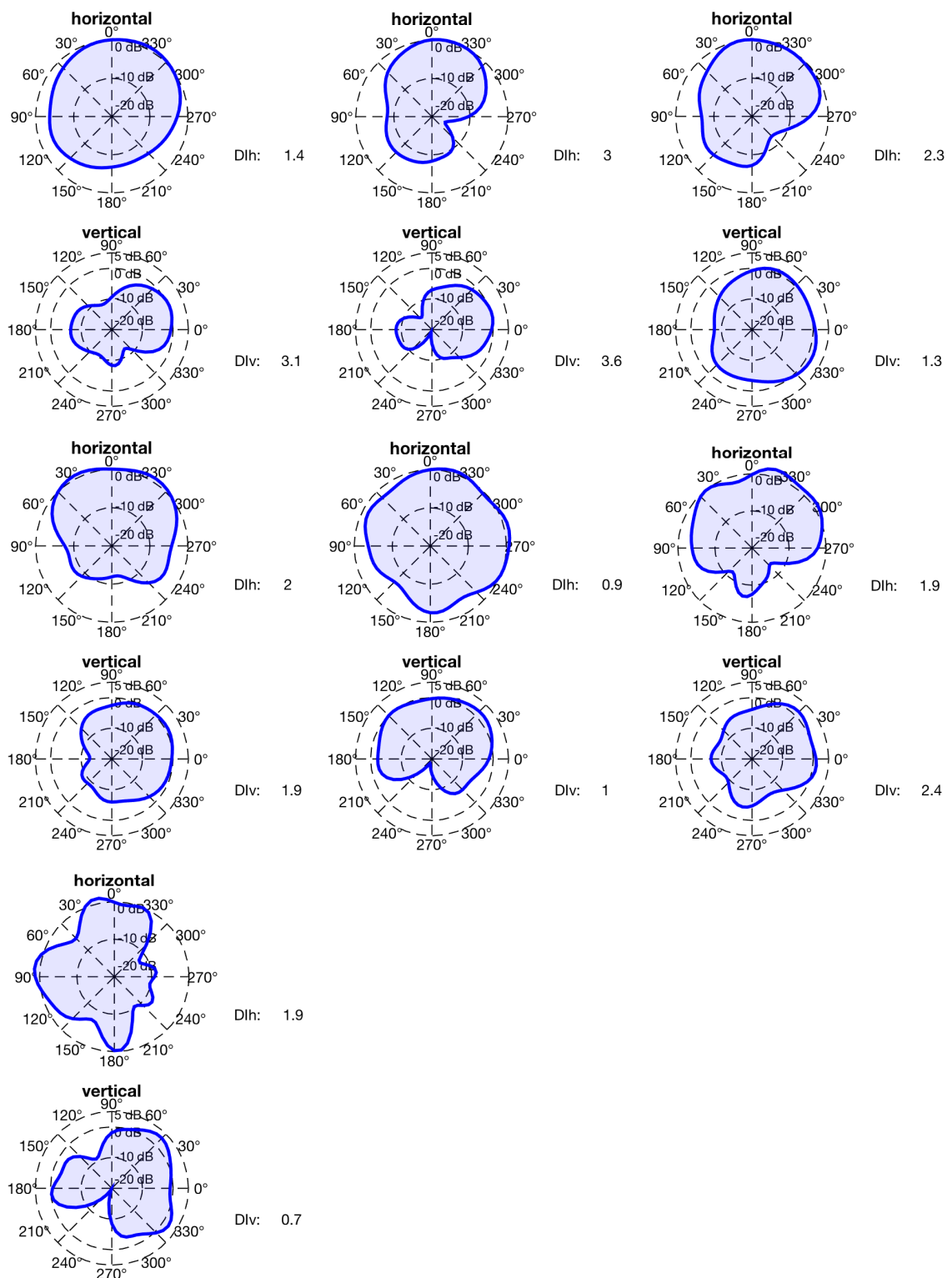


Abbildung 28 – Horizontale und vertikale Abstrahlcharakteristik der Resonatorgitarre bei Haltung 1. Von links nach rechts: c @ 131 Hz, e @ 165 Hz, g @ 196 Hz (Oben); h @ 247 Hz, d' @ 294 Hz, f' @ 349 Hz (Mitte); a' @ 440 Hz (Unten)

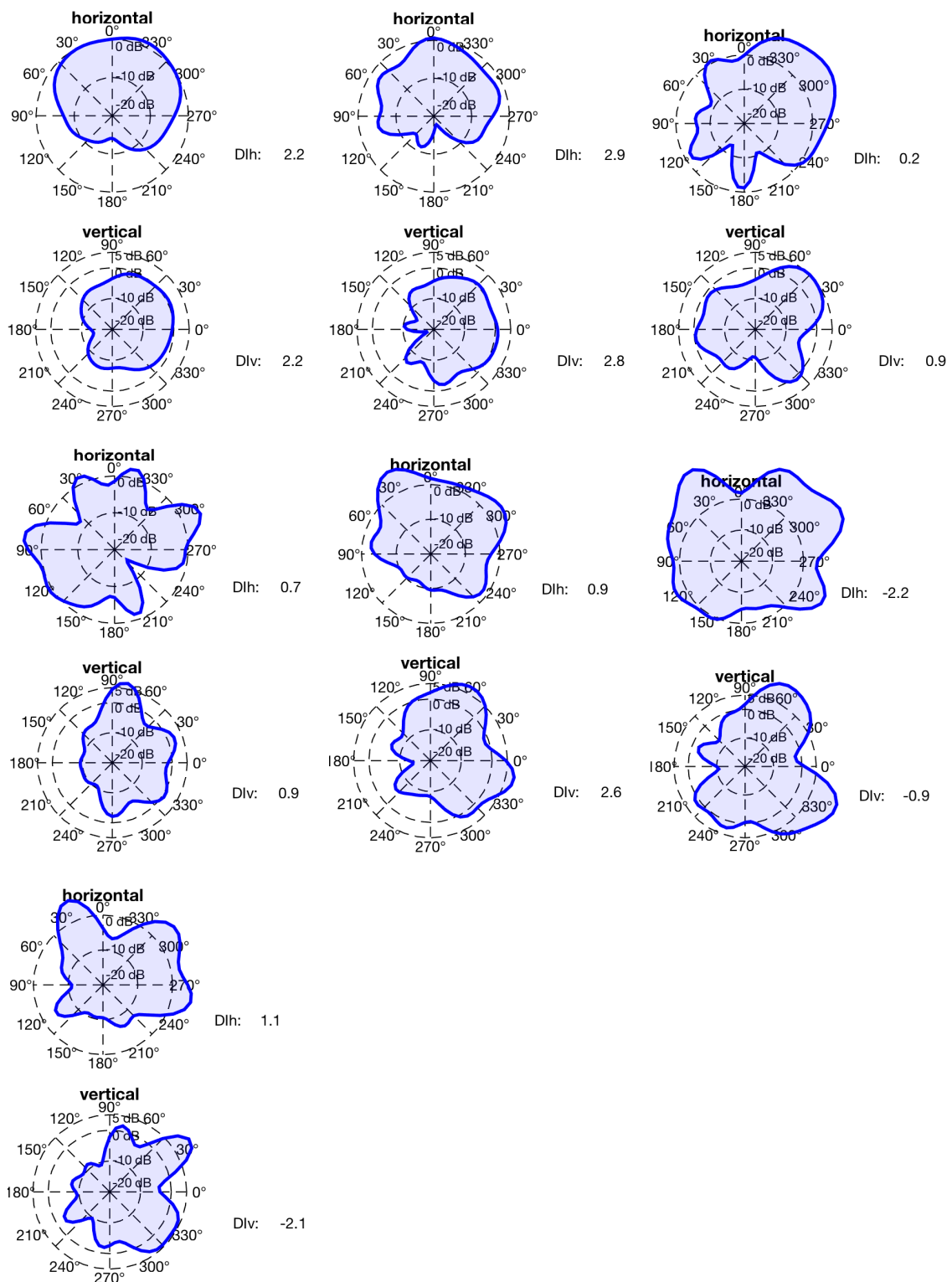


Abbildung 29 – Obertöne des Grundtones c' der Resonatorgitarre mit Haltung 1. Von links nach rechts: Grundton c' @ 262 Hz, 1.OT @ 524 Hz, 2.OT @ 786 Hz (Oben); 3.OT @ 1048 Hz, 4.OT @ 1310 Hz, 5.OT 1572 Hz (Mitte); 6.OT @ 1834 Hz (Unten)