

# Abstrahlcharakteristiken

Laborprotokoll aus Akustische Holografie LU SS 2014

Thomas Karl Mayr  
Thomas Wilding

Betreuung: Dr. Franz Zotter

Graz, 11. Juni 2014



institut für elektronische musik und akustik





## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Mikrofonkugel</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Matlab Grundlagen</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Saxophon</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Gitarre</b>	<b>12</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>13</b>

## 1 Einleitung

Im zweiten Teil der Laborübung wurde im Messraum das annähernd kugelförmige Mikrofonarray aufgebaut. Damit wurde anschließend die Abstrahlcharakteristik von zwei Instrumenten (Gitarre und Saxophon) vermessen.

Die Mikrofonkugel wurde dazu am ersten Tag aufgebaut, die 64 Eckpunkte mit Mikrofonen bestückt und verkabelt. Am nächsten Tag wurde damit begonnen, die einzelnen Mikrofone zu kalibrieren, um anschließend bei den Messungen möglichst genaue Ergebnisse zu erhalten.

Für die Messungen der Abstrahlcharakteristik der Instrumente befand sich jeweils ein Musiker in der Kugel und spielte eine Tonleiter. Zur Darstellung des Abstrahlverhaltens wurden dann die gemessenen Signale der 64 Mikrofone in Spherical Harmonics zerlegt, und wieder auf höher aufgelöste Spherical Harmonics aufmultipliziert.

## 2 Mikrofonkugel

Da die Mikrofonkugel noch nicht aufgebaut war, mussten zuerst die entsprechenden Eckpunkte mit den richtigen Stäben verbunden werden. Ein schematisches Abbild der Kugel geplottet in Matlab ist in Abbildung 1 zu sehen. Darin sind in rot die x-Achse, in grün die y-Achse und in blau die z-Achse des zugrundeliegenden Koordinatensystems eingezeichnet. Die "Kugel" an sich war ein 64-eckiges Polygon, aufgebaut aus vorwiegend dreieckigen Flächen, wobei ein paar der Verbindungsstangen ausgelassen wurden, um einen sicheren Standplatz für das Podest (benötigt um den Musiker in etwa in der Mitte der Kugel zu positionieren), und um den Einstieg zu erleichtern.

Wie man jedoch auch in Abb. 4 sehen kann, war die fertige Kugel nicht wirklich exakt rund, eine in der Mitte platzierte Schallquelle wäre damit nicht gleich weit von allen Mikrofonen entfernt, was die Abstrahlcharakteristik ein wenig verfälschen dürfte.

Für die Kalibrierung wurde ein vorhandener Kalibrator verwendet. Mit der dabei entstandenen Aufnahme wurden dann die Mikrofon-Gainfaktoren bestimmt, die benötigt werden, um mit allen Mikrofonen möglichst gleich laut aufzunehmen. Die eingestellten Gainfaktoren in dB sind in Abbildung 2 zu sehen. Wie man sehen kann, war besonders bei einem Mikrofon mehr Korrektur notwendig, da dieses merklich leiser aufnahm. Das bei zwei Mikrofonen anfangs festgestellte hohe Rauschen konnte bei einem auf einen Defekt des Mikrofons selbst, und bei dem zweiten auf einen fehlerhafte Verbindung der Interfaces zum Computer zurückgeführt werden. Beides konnte behoben werden.

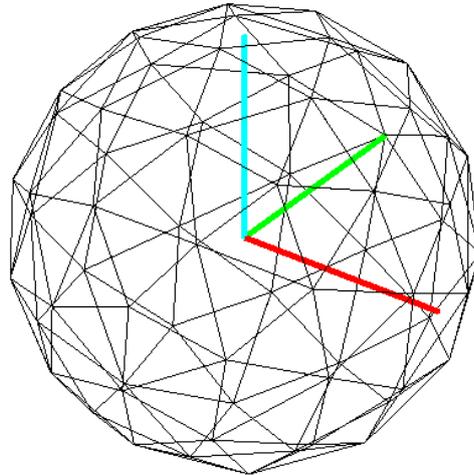


Abbildung 1: Matlab plot der Mikrofonkugel mit eingezeichneten Achsen (rot = x-Achse, grün = y-Achse, blau = z-Achse). Die y-Achse (grün) zielt bei der fertig aufgehängten Kugel auf die Angeln des Fensters, die x-Achse (rot) entspricht somit der Blickrichtung des Musikers (in Falle unserer Messungen) mit Richtung auf die Wand mit der Eingangstür.

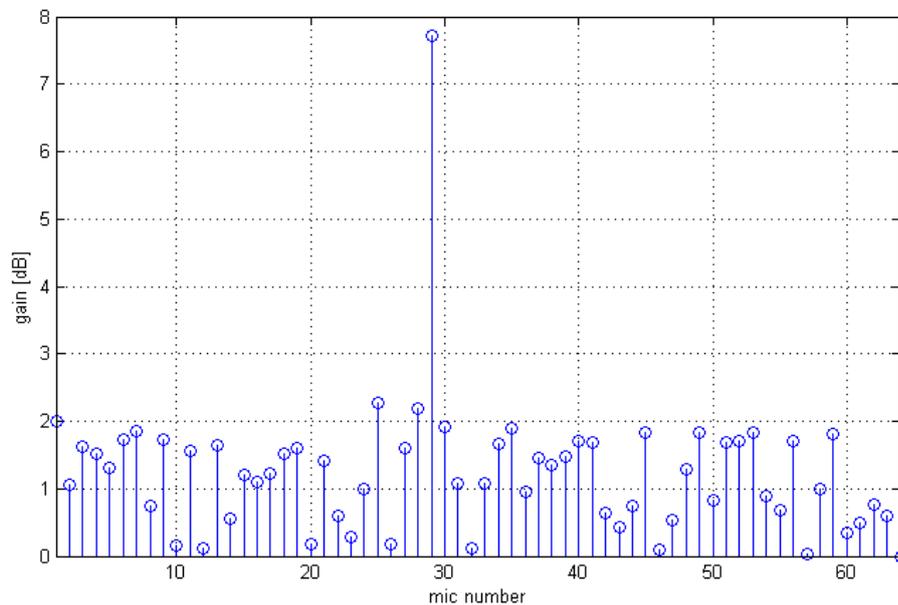


Abbildung 2: Die verwendeten Gainfaktoren, bestimmt aus der Kalibrierung des Mikrofonarrays.

### 3 Matlab Grundlagen

Die in Matlab erzeugten Plots wurden alle nach dem gleichen Schema erzeugt. Als Beispiel wird hier kurz die Nachbildung einer Abstrahlcharakteristik von 1 in Richtung eines

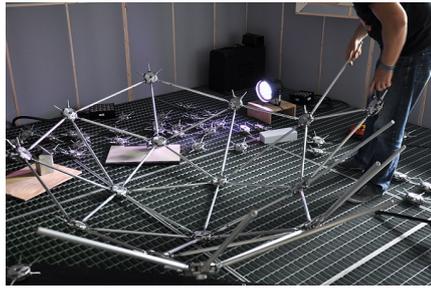


Abbildung 3: Beginn des Aufbaus der Mikrofonkugel.

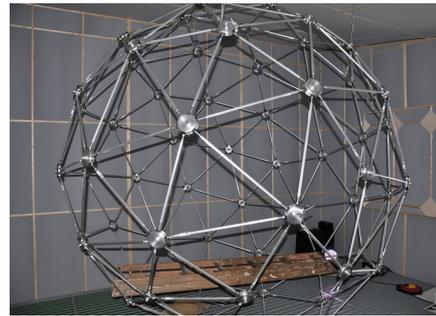


Abbildung 4: Die fertige Mikrofonkugel.



Abbildung 5: Die montierten Mikrofone mit und ohne Absorbern, um die Mikrofone vor Reflexionen von den Eckpunkten der Kugel zu schützen.



Abbildung 6: Detailansicht eines verkabelten Mikrofons. Die Mikrofonkabel wurden mit Kabelbinder an den Stangen befestigt.

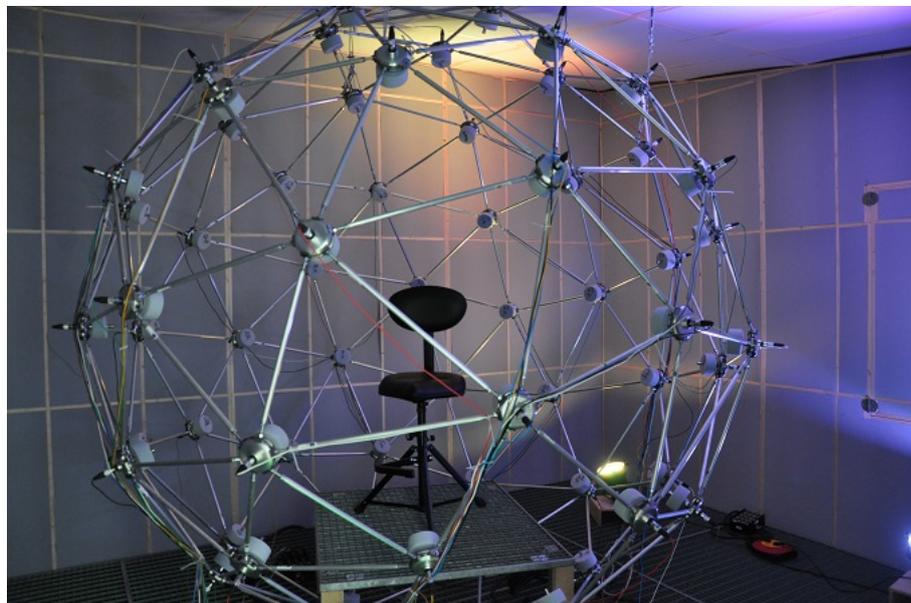


Abbildung 7: Die leere Kugel, mit Sessel für den Musiker. Die linke Wand liegt parallel zur x-Achse (rote Achse).

Mikrofones und von 0 in Richtung aller anderen Mikrofone erklärt (zu sehen in Abb. 8).

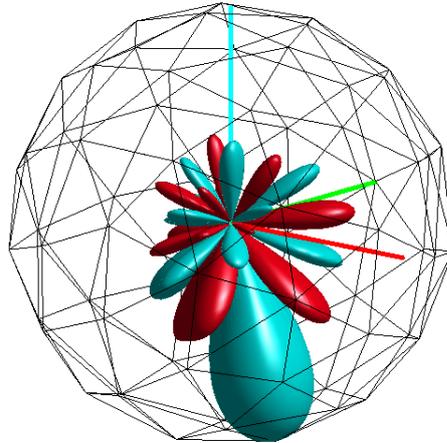


Abbildung 8: Beispielhafte Abbildung einer Richtcharakteristik von 1 (0dB) in Richtung des ersten Mikrofons und 0 ( $-\infty$  dB) in Richtung von allen anderen Mikrofonen.

Die verschiedenen Farben in den Richtplots entsprechen der Phase der der Abstrahlung. Die Colormap wird der Übersicht nur einmal representativ für alle plots in Abb. 9 dargestellt. Zusätzlich würde der Radius der dargestellten Mikrofonkugle auf 35dB normiert, die Kugel spiegelt somit die 35dB Marke wieder.

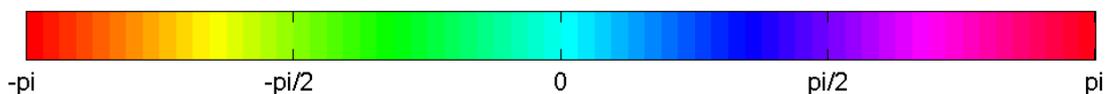


Abbildung 9: Die Colormap für die Abstrahlungsplots der Phase. Eine Phase von  $+\pi$  und  $-\pi$  (gleiche Phase) hat auch die gleiche Farbe.

Um die Charakteristik zu berechnen müssen zuerst die Spherical Harmonics mit der entsprechenden Auflösung berechnet werden, wobei die Auflösung als Anzahl der berechneten Punkte angegeben wird. Die gemessenen 64 Punkte werden also dazu verwendet, um diese Werte auch auf der Oberfläche mit z.B. 200 Punkten zu fixieren.

Dazu wird in dem Matlab Skript `plot_sax.m` (Zeile 22 bis 27) zuerst die neue Auflösung angegeben (`Nresinterp = 200`), und dann damit die neuen Werte für Elevations- und Azimuthwinkel zu bestimmen. Mittels `meshgrid` erzeugt man sich das Koordinatennetz, welches dann über die Funktion `sh_matrix_real(N,phi,theta)` in Spherical Harmonics bis zur N-ten Ordnung zerlegt wird.

Um die Spherical Harmonics mit niedrigerer Auflösung herausrechnen zu können, werden diese in Form der inversen SH-Matrix erzeugt, welche dann einfach mit den vorhandenen

Amplituden bei einer Frequenz multipliziert werden kann, um die Spherical Harmonics mit niedrigerer Auflösung herauszurechnen (Zeile 45 in `plot_sax.m`). Die Amplitude bei einer Frequenz erhält man, in dem man die Mikrofonsignale mit einem Vektor aus Fourier-Kernen multipliziert:

$$\mathbf{w} = \left( \dots e^{-j2\pi f_0 \frac{k}{f_s} n} \dots \right)^T, \quad (1)$$

wo  $k$  das entsprechende Ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz ist, und  $n$  der Variable für die Zeit entspricht. Es wird also immer eine Abstrahlcharakteristik für ein  $k \cdot f_0$  bestimmt.

## 4 Saxophon

In Abb. 10 ist das Spektrum des ersten vom Saxophon gespielten Tones zu sehen. Der Grundton liegt bei dem 16-ten Frequenzbin, was einer Frequenz von

$$f_0 = n \cdot \frac{f_s}{\text{window}} = 16 \cdot \frac{44100}{4096} = 172.2656 \text{ Hz}. \quad (2)$$

Weiters kann man erkennen, das bis zum 10-ten Teilton mit gut erkennbarer Amplitude abgestrahlt werden müsste.

Die Abstrahlcharakteristik bei verschiedenen Frequenzen ist in den folgenden Abbildungen 11-20 bis zur 10-fachen Grundfrequenz dargestellt. Wie man sehr schön erkennen kann, beginnt das Saxophon erst ab der 7-fachen Grundfrequenz etwas mehr zu bündeln, und bei der 9-fachen und 10-fachen Grundfrequenz lässt sich eine deutlich höhere Abstrahlung in Richtung der roten Achse erkennen, wo annähernd eine 1 zu sehen ist. Bei tiefen Frequenzen ist die Bündelung also noch nicht vorhanden, und verstärkt sich bei höheren Frequenzen recht schnell.

Die geringere Abstrahlung nach hinten (negative x-Achse) lässt sich durch eine bei höheren Frequenzen stärkere Abschattung durch den Körper des Musikers erklären, der bei hohen Frequenzen eher ein Hindernis in der Größenordnung der Wellenlänge darstellt, und damit Beugungserscheinungen verringert.

Die Ausgewerteten Frequenzen können aus der folgenden Tabelle ausgelesen werden:

Die Abstrahlplots für des zweiten gespielten Ton sind in den folgenden Abbildungen dargestellt, die entsprechenden Frequenzen der plots werden in obiger Tabelle 1 in den entsprechenden Spalten angefügt. Da bis zum 7-ten Teilton keine wirkliche Bündelung erkennbar ist, werden diese plots ausgelassen und nur die Teiltöne 7 bis 10 geplottet.

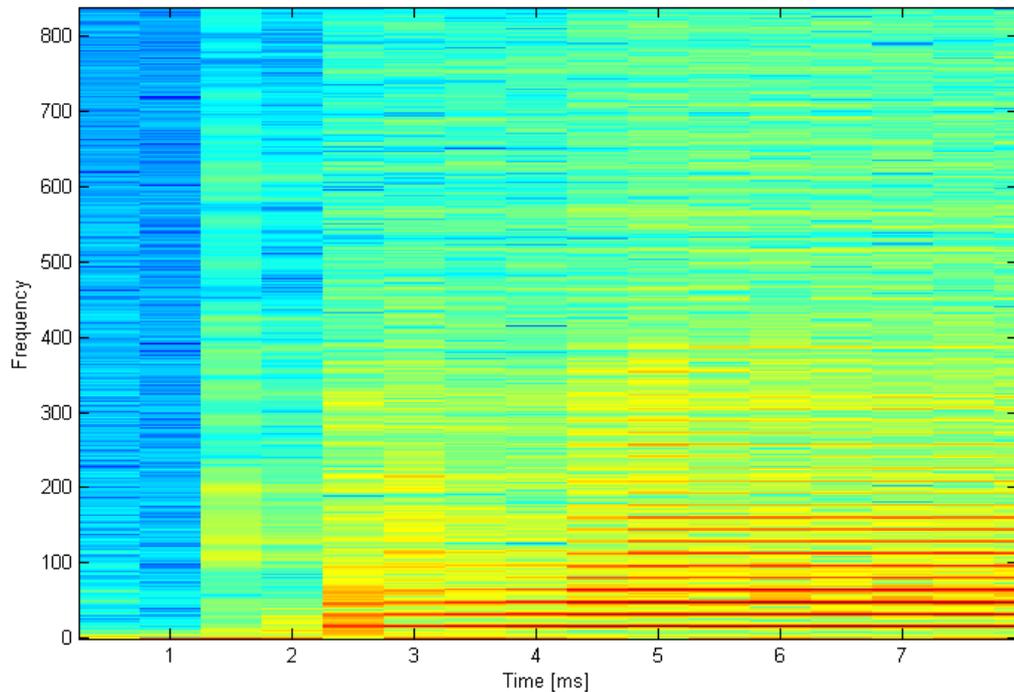


Abbildung 10: Das Spektrum des ersten gespielten Tones des Saxophons. Der Grundton liegt bei dem Frequenzbin 16, und lässt sich aus Fensterlänge und Abtastrate in die entsprechende Frequenz umrechnen.

Tabelle 1: Tabelle mit den ausgewerteten Frequenzen des Saxophons.

k	1. Ton [Hz]	2. Ton [Hz]
1	172.3	193.8
2	344.5	387.6
3	516.8	581.4
4	689.1	775.2
5	861.3	969.0
6	1033.6	1162.8
7	1205.9	1356.6
8	1378.1	1550.4
9	1550.4	1744.2
10	1722.7	1938.0

An den Werten aus Tab. 1, kann man erkennen dass sich ein möglicher Vergleich der Richtcharakteristiken anhand der Plots für die 9-fache Grundfrequenz des ersten gespielten Tones, und der 8-fachen Grundfrequenz des zweiten gespielten Tones durchführen lässt, da diese ident sein sollten (gleiche Frequenz).

Die Unterschiede in den Abstrahlcharakteristiken lässt darauf schließen, dass unterschied-

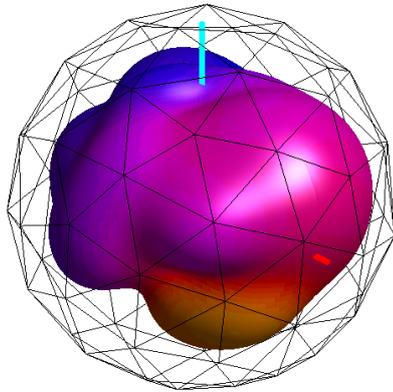


Abbildung 11:  $f_{1.Ton} = 1 \cdot f_0$

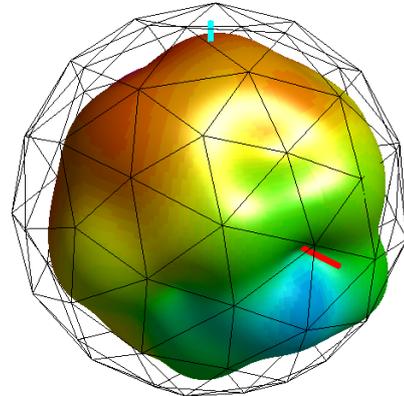


Abbildung 12:  $f_{1.Ton} = 2 \cdot f_0$

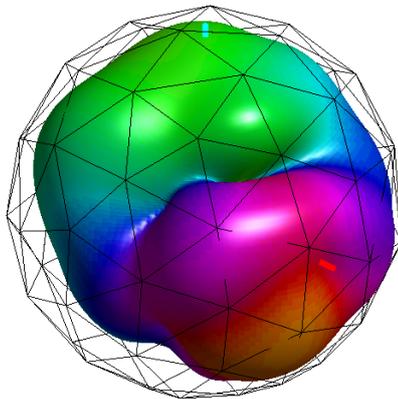


Abbildung 13:  $f_{1.Ton} = 3 \cdot f_0$

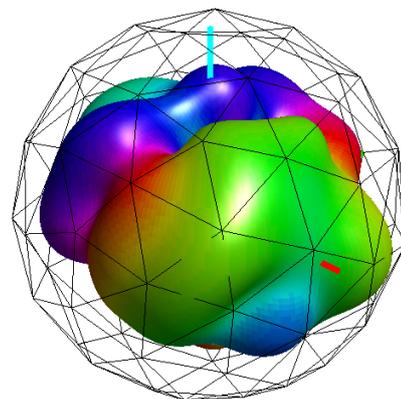


Abbildung 14:  $f_{1.Ton} = 4 \cdot f_0$

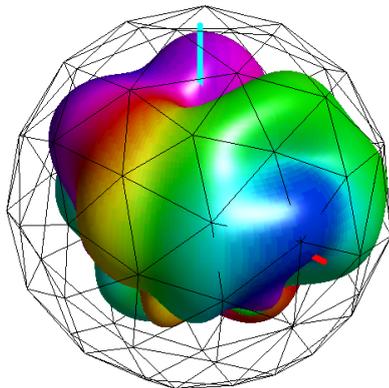


Abbildung 15:  $f_{1.Ton} = 5 \cdot f_0$

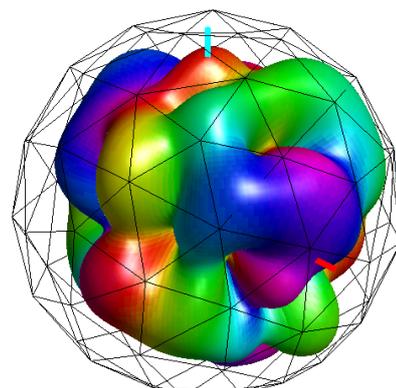


Abbildung 16:  $f_{1.Ton} = 6 \cdot f_0$

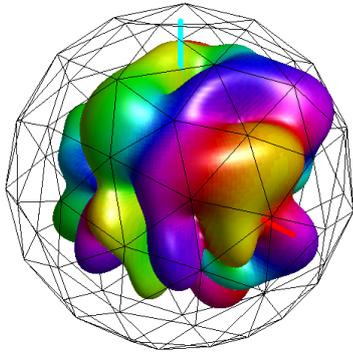


Abbildung 17:  $f_{1.Ton} = 7 \cdot f_0$

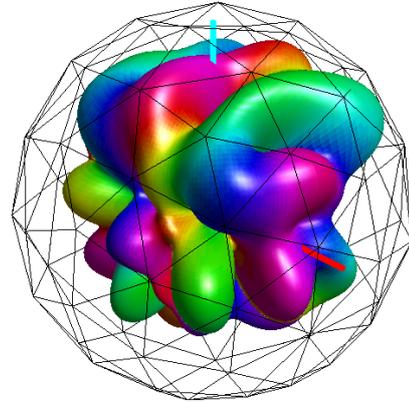


Abbildung 18:  $f_{1.Ton} = 8 \cdot f_0$

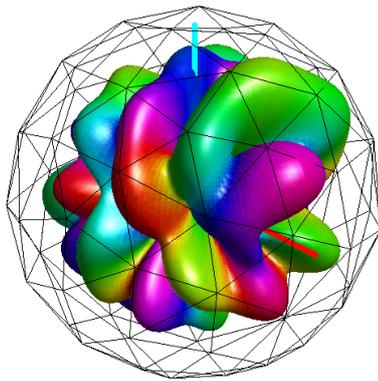


Abbildung 19:  $f_{1.Ton} = 9 \cdot f_0$

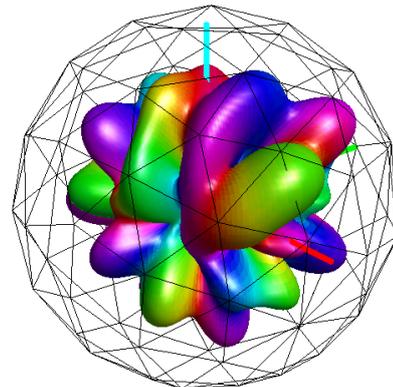


Abbildung 20:  $f_{1.Ton} = 10 \cdot f_0$

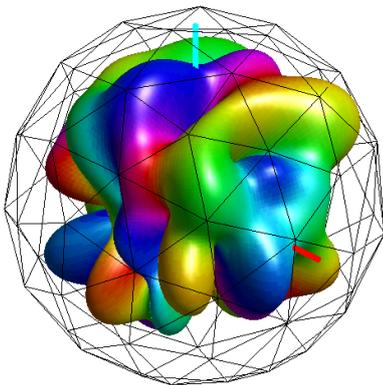


Abbildung 21:  $f_{2.Ton} = 7 \cdot f_0$

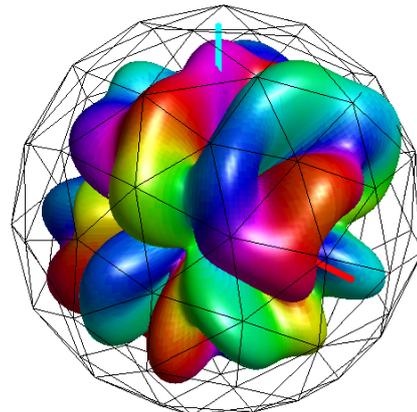
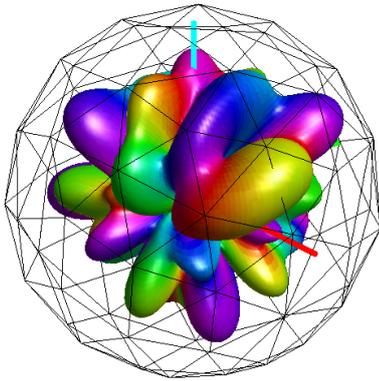
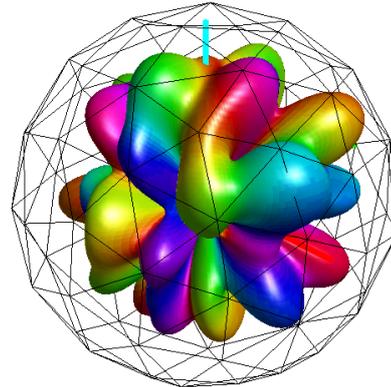


Abbildung 22:  $f_{2.Ton} = 8 \cdot f_0$

Abbildung 23:  $f_{2.Ton} = 9 \cdot f_0$ Abbildung 24:  $f_{2.Ton} = 10 \cdot f_0$ 

liche Griffmuster, unterschiedliche Abstrahlungsmuster erzeugen, wenn auch nur recht gering unterschiedliche. Die Hauptabstrahlungsrichtung (in Blickrichtung leicht nach oben, mit etwa  $30^\circ$  Elevationswinkel) bleibt unverändert.

Was zusätzlich noch auffällt sind die schärferen Nebenkeulen die bei höheren Frequenzen auftreten, also beispielsweise bei den 9- und 10-fachen der Grundfrequenz des zweiten gespielten Tones.

## 5 Gitarre

Da die Gitarrentöne recht schnell ausklingen und auch um einiges leiser als die des Saxophons waren, wurden die Signale recht stark beschnitten, um möglichst wenig Zupfgeräusche und Bewegungen des Spielers in den auszuwertenden Zeitfenstern zurückzulassen.

Zur Auswertung wurden immer die Frequenzen verwendet, die im Spektrum am stärksten zu erkennen sind, da im Gegensatz zum Saxophon die Obertöne nicht immer ausschließlich als ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz waren. Von jeder gespielten Saite wurde die lauteste Frequenz verwendet. Diese sind nochmals in folgender Tabelle eingetragen:

Die Abstrahlplots sind in den folgenden Abbildungen 25-30 abgebildet. Die Blickrichtung des Musikers ist ident zu der im Falle des Saxophons (in Richtung positive x-Achse (rot)).

Wie auch beim Saxophon ist auch bei der Gitarre die Bündelung bei tiefen Frequenzen kaum vorhanden (86 Hz, Abb. 25), und bei 495 Hz bereits eine merklich höhere Abstrahlung nach vorne und nach hinten (in Blickrichtung = vorne, entgegen der Blickrichtung = hinten) der Gitarre. Nach oben und nach unten (also von den Seitenflächen der Gitarre) wird kaum etwas abgestrahlt. Auch ist bis 600 Hz noch keine starke Abschirmung der Abstrahlung durch den Musiker zu merken, welche erst bei hohen Frequenzen erkennbar

Tabelle 2: Tabelle mit den ausgewerteten Frequenzen der Gitarre.

Saite	Frequenz des TT [Hz]
E	86.1
A	549.1
d	1022.8
g	581.4
h	495.3
e'	2293.3

wird.

In den beiden Plots für 549 und 581 Hz ist außerdem eine beginnende stärkere Bündelung nach vorne zu erkennen (vorhandene Keule in Richtung x-Achse) wobei bei 581 Hz bereits erste Abschirmungserscheinungen durch den Musiker erkennbar werden (Einbruch der Abstrahlung in negativer x-Richtung).

Bei Frequenzen über 1kHz beginnen sich ähnlich wie beim Saxophon sehr starke Nebenkeulen auszubilden, wobei die direkte Abstrahlung nach vorne immer mehr abnimmt.

## 6 Zusammenfassung

Was bei den Abstrahlcharakteristiken der Gitarre im Vergleich zum Saxophon auffällt, ist ein im allgemeinen etwas glatterer Verlauf der Abstrahlung mit geringeren Keulen bei tiefen und bei hohen Frequenzen. Ein weiterer Faktor der bei der Beeinflussung der Abstrahlcharakteristik mitspielt sind ausschließlich beim Saxophon die Griffmuster der Töne. Da sich für unterschiedliche Griffmuster andere Löcher öffnen, ergibt sich dadurch natürlich eine andere Abstrahlcharakteristik. Bei der Gitarre hingegen sollten gleiche Obertöne auch mit annähernd gleichen Mustern abgestrahlt werden (aufgrund der geringen Anzahl an Plots läßt sich das jedoch nicht direkt aus obigen Abbildungen herauslesen).

Weiters sind die Obertöne beim Saxophon ganzzahlige Vielfache zur Grundfrequenz. Bei der Gitarre hingegen sind die Obertöne nicht immer ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz und auch nicht immer die am stärksten ausgeprägten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass eine schwingende Luftsäule eine saubere Obertonstruktur aufweist als die Gitarre bei der viel mehr Komponenten an der Tonerzeugung beteiligt sind. Insbesondere wären dies der Anschlag, die Übertragung der Schwingung auf den Resonanzkörper und die Abstrahlung von Decke und Boden der Gitarre.

Wir haben weiters gemutmaß, dass die doch recht starken Nebenkeulen auch bei höheren Frequenzen auf räumliches Aliasing aufgrund der für hohen Frequenzen zu niedrigen Auflösung des Mikrofonarrays. Nach der Formel  $f_{\text{grenz}} = \frac{c}{2 \cdot \Delta x \cdot \sin \theta}$  berechnet sich eine obere Grenzfrequenz bei einem Mikrofonabstand von geschätzten 40cm zu  $428.75 \text{ Hz}$  bei

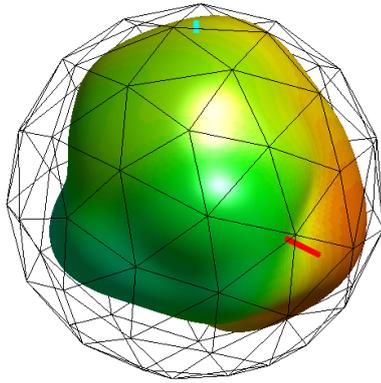


Abbildung 25: Abstrahlcharakteristik des Teiltons mit 86 Hz einer Gitarre.

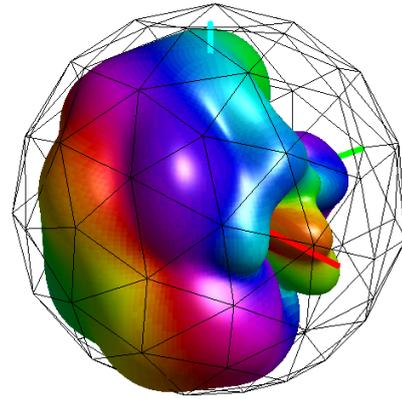


Abbildung 26: Abstrahlcharakteristik des Teiltons mit 495 Hz einer Gitarre.

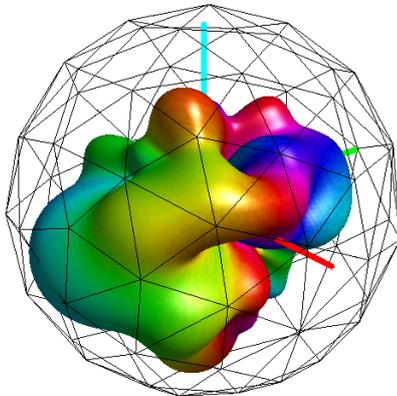


Abbildung 27: Abstrahlcharakteristik des Teiltons mit 549 Hz einer Gitarre.

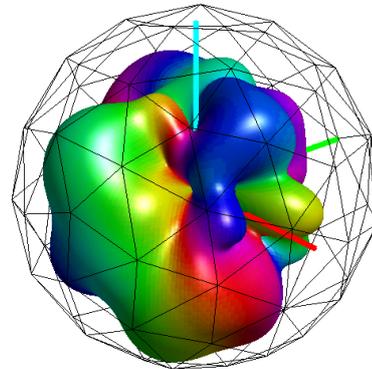


Abbildung 28: Abstrahlcharakteristik des Teiltons mit 581 Hz einer Gitarre.

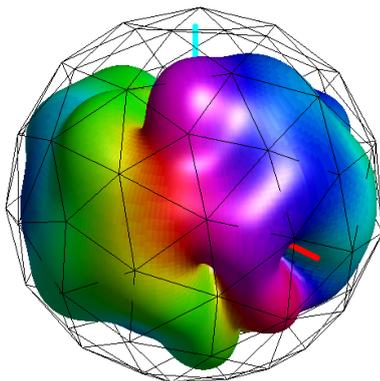


Abbildung 29: Abstrahlcharakteristik des Teiltons mit 1022 Hz einer Gitarre.

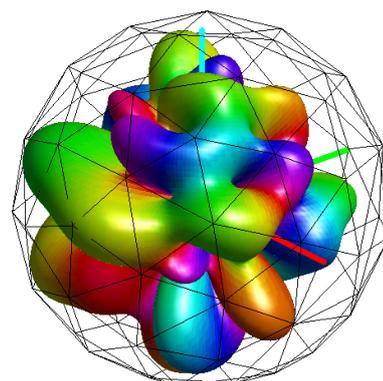


Abbildung 30: Abstrahlcharakteristik des Teiltons mit 2293 Hz einer Gitarre.

$c = 343\text{m/s}$ . Im Zuge dieser Grenzfrequenz vermuten wir räumliches Aliasing bei zu

hohen Frequenzen.

Zusätzlich kommt noch hinzu, dass für eine entsprechend gute Auflösung die Zerlegungsordnung sowie die Quellordnung in folgendem Zusammenhang stehen müssen:

$$N_a \geq k \cdot d + N_s \quad (3)$$

wobei  $N_a$  die Zerlegungsordnung,  $N_s$  die Quellordnung,  $k$  die Wellenzahl  $k = \frac{\omega}{c} \approx \frac{6}{\lambda}$  und  $d$  die Verschiebung der Quelle aus dem Kugelzentrum.

Unter der Annahme das die Quelle in der Mitte plaziert wurde bleibt nur noch die Quellordnung zu schätzen. Diese lässt mit Hilfe des Radius der Mikrofonkugel wie folgt annähern

$$N_s \approx k \cdot R = N_a, \quad (4)$$

wobei  $R$  dem Radius in dem alle Quellen sitzen entspricht, welcher mit etwa 0.6 m angenommen wurde. Da hier eine Ordnung von  $N_a = 7$  verwendet wurde, ergibt sich eine obere Grenzfrequenz von

$$N_a = k \cdot R \quad (5)$$

$$7 = \frac{6}{\lambda} \cdot 1.5 \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{6 \cdot 0.6}{7} = \frac{3.6}{7} = \underline{0.51 \text{ m}} \quad (7)$$

$$f_o = \frac{c}{\lambda} = \frac{343}{0.51} = \underline{672.5 \text{ Hz}} \quad (8)$$

ab der sich bereits räumliches Aliasing einstellt, die doch noch höher als die obige Grenzfrequenz  $f_{\text{grenz}}$ , jedoch nur unter der Annahme, das auch wirklich alle abstrahlenden Quellen innerhalb des angenommenen Radius liegen (i.e. die größten Ausdehnungen von Gitarre und Saxophon aus der Mitte heraus).