

# Protokoll

Akustische Messtechnik 2, LU  
Betreuer: DI Franz Zotter

Andrea Sereinig (0331131), Daniel Deboy (0573049)  
Graz, 2009-04-03



**UNIVERSITÄT**  
FÜR MUSIK UND  
DARSTELLENDEN KUNST  
GRAZ - AUSTRIA

institut für elektronische musik und akustik



---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Vorbereitung und Ziel des Versuchs</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Aufbereitung der Signale</b>	<b>3</b>
2.1	Zerlegung in Kugelharmonische . . . . .	3
2.2	Plot im 3D Gitter . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Auswertung</b>	<b>4</b>
3.1	Alt-Saxophon . . . . .	4
3.2	Tenorhorn . . . . .	7
3.3	Klarinette . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Fazit</b>	<b>14</b>
<b>7</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>14</b>

## 1 Vorbereitung und Ziel des Versuchs

Ziel der an diesem Tag vorgenommenen Versuche war es, die Abstrahlcharakteristik unterschiedlicher Instrumente zu untersuchen. Verglichen werden soll jeweils das Abstrahlungsmuster bei einer fixen Frequenz, an der beim spielen unterschiedlicher Oktavlagen des gleichen Tones jeweils Teiltöne bzw. der Grundton zu liegen kommen.

Die Aufnahmen wurden wie schon in den vergangenen Labortagen in einem Kugelmikrofonarray mit 64 Mikrofonen vorgenommen. Das Schallfeld wird dabei in kugelharmonische Funktionen zerlegt. Anschließend wird das rekonstruierte Schallfeld mit Hilfe der aus der Zerlegung gewonnenen Koeffizienten in einem sphärischen Plot dargestellt.

Die Aufzeichnung der 64 Mikrofonkanäle wurde wie im gesamten Labor mit PD vorgenommen, die mathematischen Betrachtungen wurden anschließend mit Matlab realisiert und durchgeführt.

Es sollte erkennbar sein, dass die Töne verschiedener Oktavlagen ähnliche Abstrahlungsmuster einer fixen Frequenz der Teiltöne erzeugen. Des weiteren sollte natürlich die gewonnene Abstrahlinformation mit den physikalischen Dimensionen des Instruments sowie mit den Hörgewohnheiten übereinstimmen.

Diese Laborübung wurde von den Studierenden alleine abgehalten, da unser Betreuer krankheitsbedingt verhindert war.

Als Beispielinstrumente dienten:

**Alt-Saxophon**  
**Tenor-Horn**  
**B-Klarinette**

Die Instrumentalisten wurden so positioniert, dass das akustische Zentrum ungefähr im Zentrum des Mikrofonarrays liegt.

## 2 Aufbereitung der Signale

### 2.1 Zerlegung in Kugelharmonische

Für eine bestimmte Frequenz  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  ergibt sich mit Sample  $s = [1, 2, \dots, s_{max}]$  aus dem aufgezeichneten zeitdiskreten Schalldruck  $p(s)$  der Spektralanteil  $p_\omega$  zu:

$$p_\omega = \sum_{s=1}^{s_{max}} p(s) \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot s / f_s}$$

Zur Kalibrierung der Eingangspiegel der einzelnen Kanäle  $l$  wurde eine Referenzschallquelle genutzt, die daraus gewonnenen Amplitudenwerte  $gain(l)$  wurden invers als Kalibrierungsfaktor auf das aufgezeichnete Signal angewendet:

$$p_{\omega, kal}(l) = p_\omega(l) \cdot gain(l)$$

Die Positionen der 64 Mikrofone innerhalb des Kugelarrays sind nach dem in [1] beschriebenen Verfahren der Hyperinterpolation angeordnet. An diesen Positionen ist nun also der Schalldruck an der Kugeloberfläche des Arrays bekannt. Diese Information wird genutzt, um das Schallfeld in die Koeffizienten der kugelharmonischen Basisfunktionen zu zerlegen. Zur Erzeugung einer Kugelharmonischen Matrix  $Y_{sh}$  standen vorhandene Funktionen in Matlab zur Verfügung [2]. Sie enthält für jeden Koordinatenpunkt 64 Einträge (Ordnung  $N = 7$  ergibt  $q_{max} = (N + 1)^2 = 64$  Komponenten, da jede Ordnungszahl  $n = [1, 2, \dots, 7]$  die Grade  $m = 2n + 1$  aufwirft).

Mit  $q$  als Laufindex für die Komponente und  $l$  für die Kanalnummer gilt:

$$p_{\omega, kal}(l) = \sum_{q=1}^{64} \psi_\omega(l) \cdot Y_{sh, Mic}(q, l)$$

Bzw. in Vektorschreibweise für alle 64 Kanäle:

$$\vec{p}_{\omega, kal} = Y_{sh, Mic} \cdot \vec{p}_{s_i \omega}$$

Durch einfache Multiplikation mit der invertierten Zerlegungsmatrix kann jetzt das Kugelwellenzahlspektrum  $\psi$  gewonnen werden:

$$\vec{\psi}_\omega = Y_{sh, Mic}^{-1} \cdot \vec{p}_{\omega, kal}$$

Dieses Kugelwellenzahlspektrum kann nun als Gewichtungsfunktion der kugelharmonischen Basisfunktionen für beliebige Koordinatenpunkte genutzt werden, um das Schallfeld zu rekonstruieren. Als Koordinatenpunkte werden beispielsweise bei der Rekonstruktion 3200 Gitterpunkte der Plotfunktion "trimesh" in Matlab verwendet. Um die Darstellung abschließend anschaulicher zu machen, wurde der angezeigte Dynamikbereich auf 30dB beschränkt. Die Amplitudenwerte wurden auf den vorhandenen Maximalwert der Messung normiert.

$$\vec{p}_\omega = Y_{sh, Mesh} \cdot \vec{\psi}_\omega$$

Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die ursprünglich 64 Koordinatenpunkte des Arrays nun auf beliebig viele Koordinatenpunkte des Darstellungsgitters erweitert werden können. Somit erhält man eine im Vergleich zur einfachen Darstellung der 64 Kanäle deutlich feinere Darstellung des Schallfelds.

Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit das Schallfeld nachträglich für beliebige Radien zu rekonstruieren. Der Radialanteil ist unabhängig von den Winkelanteilen, somit lässt er sich sehr leicht transformieren. Ein holographischer Einblick in den Ursprung des Schallfelds ist möglich. Die Voraussetzungen und Einschränkungen dieser Möglichkeit wurden in einer weiteren Laboreinheit kurz angesprochen.

## 2.2 Plot im 3D Gitter

Die Musiker waren bei der Aufzeichnung immer nach Vorne ausgerichtet (Blick entlang x-Achse), die gezeigten Fotos stimmen somit ungefähr mit der Einblickrichtung der Schallfelddarstellung überein.

Da die Koordinatenachsen der Schallfelddarstellung nicht mit denen des realen Messraums übereinstimmen, haben wir den Versuch gestartet, gezielt drei Mikrofone innerhalb einer Messung anzusteuern, um so die Koordinatenachsen des Kugelarrays in den Plot zu übernehmen.

Es wurde je eine Messung im Array mit einer Punktschallquelle (Kalibrator) an zwei einzelnen Mikrofonen, die orthogonal zueinander stehen, vorgenommen. Zur Feinabstimmung wurde eine weitere Messung mit zwei Punktschallquellen an beiden Mikrofonen in kurzer Folge gemacht. Somit werden beide Punkte in einem Plot ersichtlich und eine genaue Drehung des Koordinatensystems war von Hand möglich. So konnten zwei Koordinatenachsen direkt bestimmt und durch die Einzelmessungen die korrekte Ausrichtung überprüft werden.

## 3 Auswertung

### 3.1 Alt-Saxophon

Gespielt wurden  $g$ ,  $g'$  und  $g''$  (jeweils klingend). Die Grundfrequenz von  $g$  beträgt gemessene 196 Hz. Jene von  $g''$ , bei dessen Frequenz das Abstrahlverhalten gemessen wird, beträgt etwa 784 Hz.

Der zweite Teilton von  $g$  sollte dem ersten Teilton von  $g'$ , also seiner Grundfrequenz, entsprechen. Das Gleiche sollte für  $g'$  und  $g''$  gelten. Wenn man nun davon ausgeht, müsste auch das Abstrahlverhalten, der in der Theorie gleichen Teiltöne (= Frequenzen) ähnlich sein.



Abbildung 1: Saxophonist im kugelförmigen Mikroarray

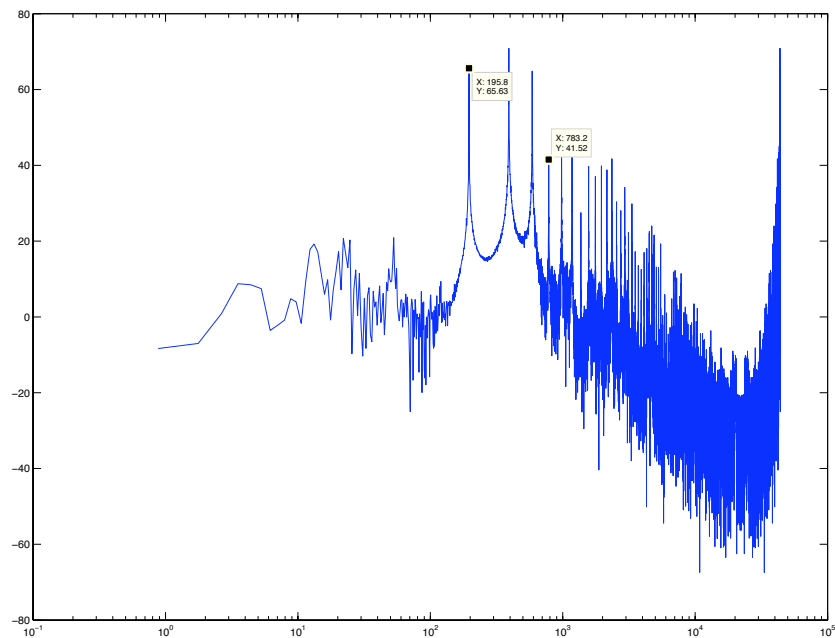


Abbildung 2: Spektrum des gespielten Tons g (Teilton bei 784Hz wird untersucht)

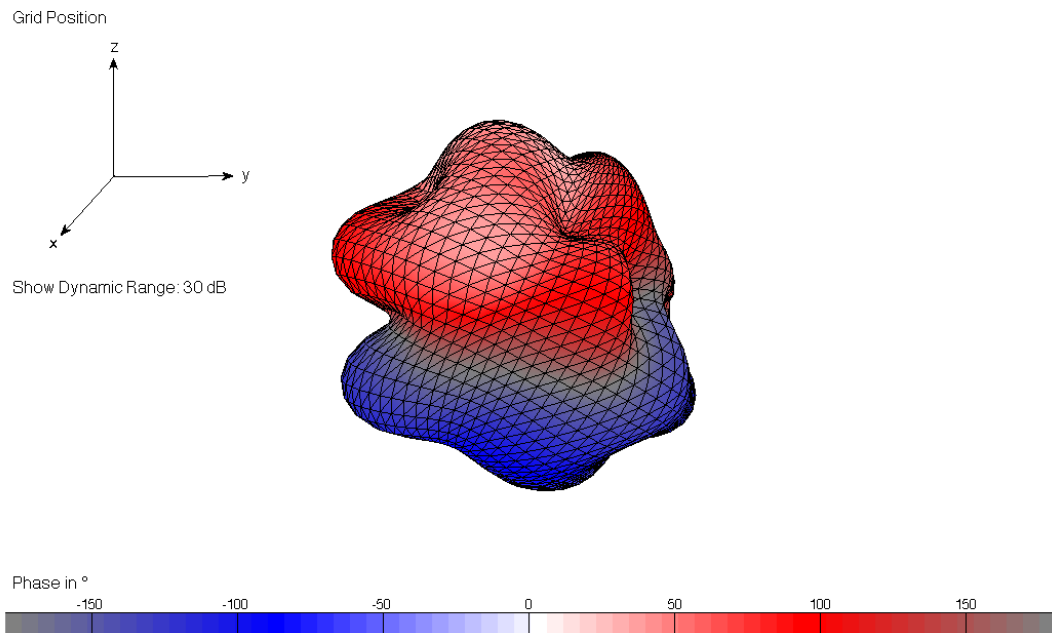


Abbildung 3: Richtcharakteristik des Grundtones g bei 784 Hz (Saxophon)

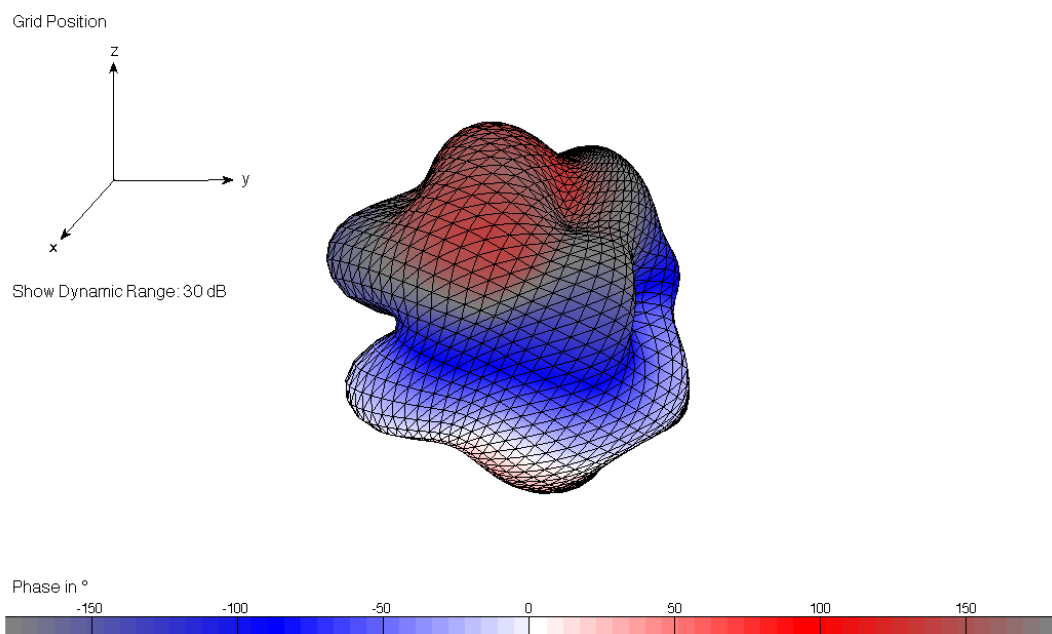


Abbildung 4: Richtcharakteristik des Tones g' bei 784 Hz(Saxophon)

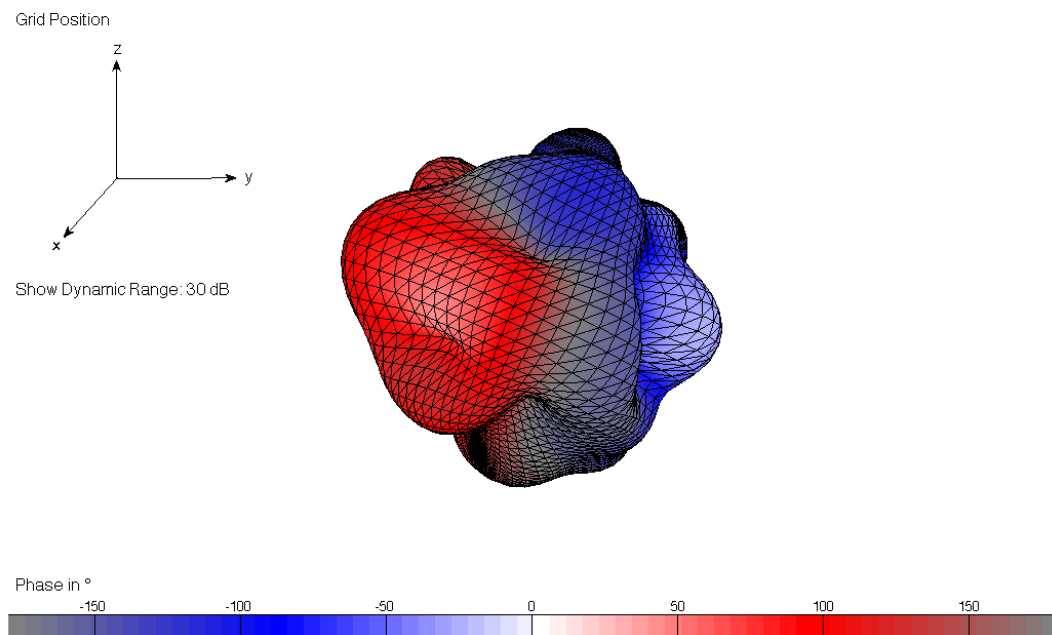


Abbildung 5: Richtcharakteristik des Tones  $g''$  bei dessen Grundfrequenz 784 Hz (Saxophon)

Gut zu erkennen ist die Übereinstimmung der Abstrahlcharakteristik der beiden Töne  $g$  und  $g'$ . Die bei 784Hz beobachtbaren Töne entsprechen bei  $g$  dem 4. und bei  $g'$  dem 2. Teilton, wobei die Griffstellung beider Töne die selbe ist. Die stärkste Abstrahlung ist im Bereich der Klappenöffnungen des Instruments auszumachen. Für  $g''$  stellt es den Grundton dar, bei dem die Oktavklappe des Saxophons zusätzlich gedrückt wurde, daher ist hier eine geringe Abweichung der Charakteristik zu beobachten. Die Öffnung der Oktavklappen bewirkt eine zusätzliche Keule in der Hauptabstrahlrichtung.

### 3.2 Tenorhorn

Im zweiten Versuch wurde das Abstrahlverhalten eines Tenorhorns näher untersucht. Wieder wurden, wie schon bei der Messung mit dem Saxophon, drei Töne, die bei einer bestimmten Frequenz die selbe Richtcharakteristik haben sollten, betrachtet. Diesmal spielte ein anderer Studierender die notierten Töne  $c'$ ,  $c''$  und  $c'''$ , die klingend einem B, b, und  $b'$  entsprechen. Die Grundfrequenz von  $b'$  beträgt nach Messung 656 Hz. Jene von B liegt bei 164 Hz.





Abbildung 6: Hornist im kugelförmigen Mikroarray

Der Blickwinkel ist in den folgenden Plots frontal zur Vorderseite des Instrumentalisten. Die Richtwirkung des Trichters ist deutlich zu erkennen.

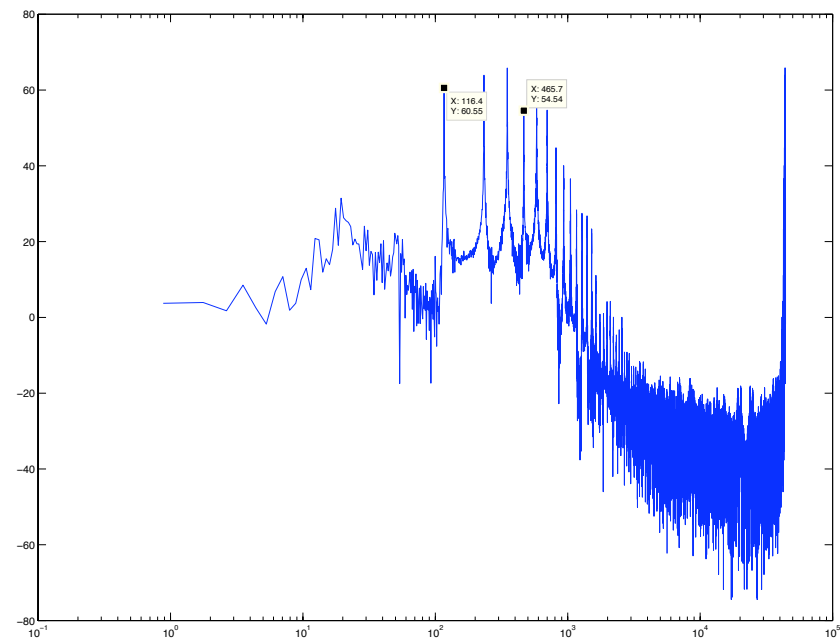


Abbildung 7: Spektrum des gespielten Tons B (Teilton bei 656Hz wird untersucht)

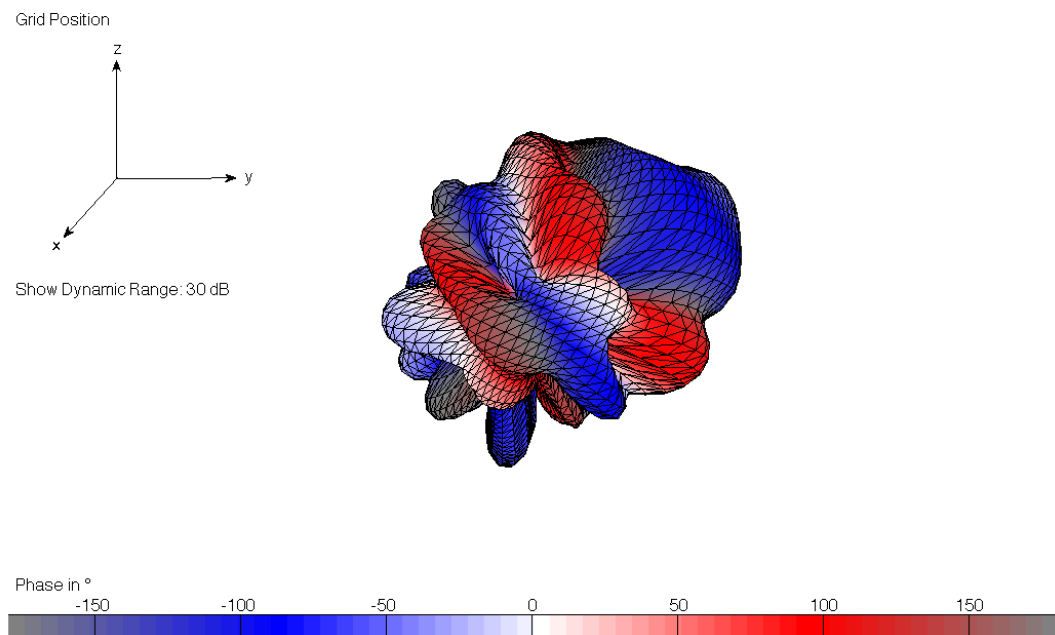


Abbildung 8: Richtcharakteristik des Tones B bei 656 Hz (Tenorhorn)

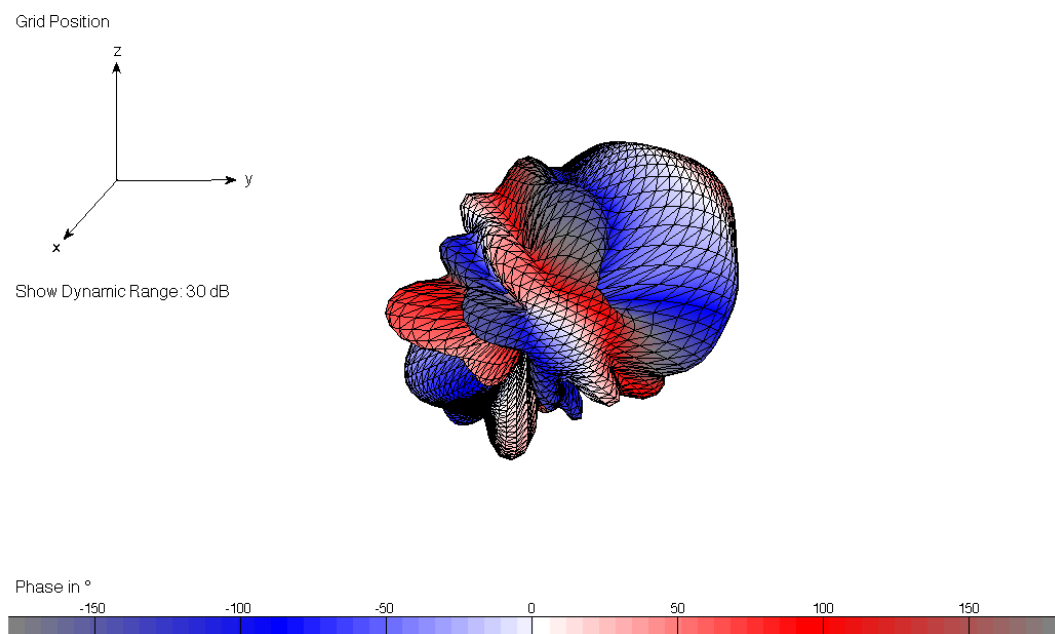


Abbildung 9: Richtcharakteristik des Tones b bei 656 Hz (Tenorhorn)

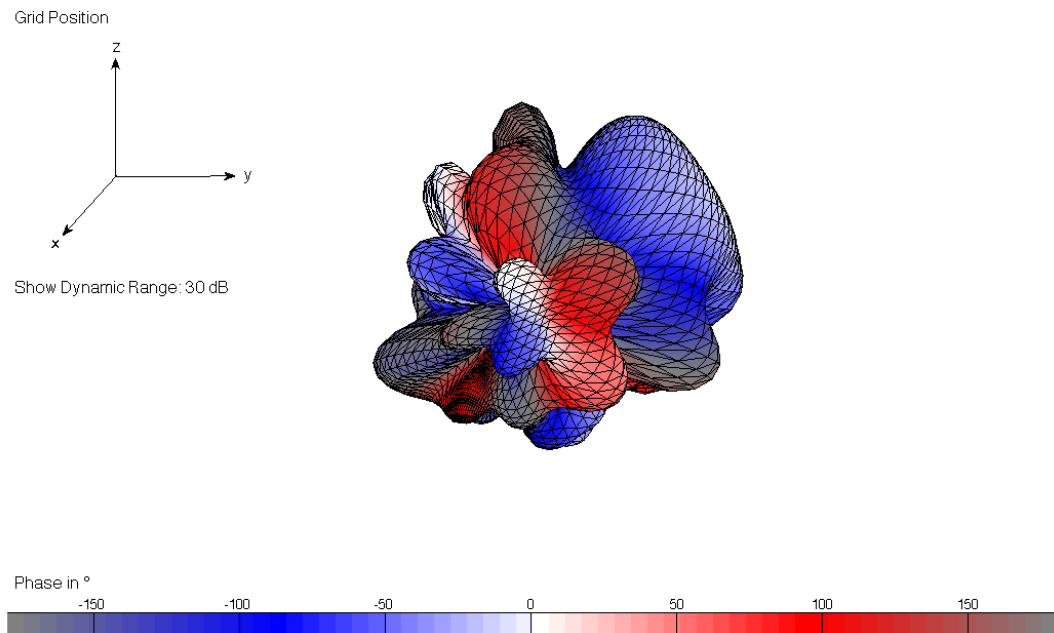


Abbildung 10: Richtcharakteristik des Tones  $b'$  bei 656 Hz (Tenorhorn)

Die Abstrahlcharakteristika stimmen bei allen drei Beispielen relativ gut überein. Die Hauptabstrahlrichtung liegt in Richtung des Trichters. Beim Tenorhorn ändert die Ventilstellung lediglich die Laufzeit durch das Instrument, die Schallabstrahlung findet jedoch immer durch den Trichter statt. Auch ist beim sog. Überblasen in unterschiedliche Oktavlagen keine Änderung der Ventilstellung nötig. Das erklärt die Ähnlichkeit der dargestellten Abstrahlungsmuster.

### 3.3 Klarinette

Die letzte Messung wurde mit einer Klarinette in B durchgeführt. Die drei verwendeten Töne waren diesmal die notierten  $e$ ,  $e'$ ,  $e''$  und  $e'''$ . Klingend entsprechen sie den Tönen  $d$ ,  $d'$ ,  $d''$  und  $d'''$ . Der gemessene Grundton von  $d$  beträgt 147 Hz. Die Frequenz, bei der die Abstrahlcharakteristika betrachtet werden beträgt 1175 Hz.



Abbildung 11: Klarinettist im kugelförmigen Mikroarray

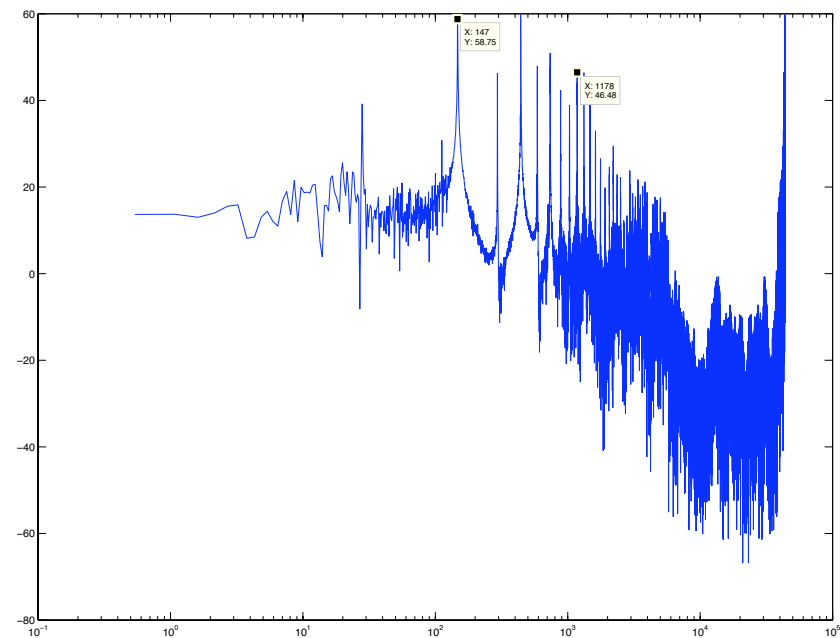


Abbildung 12: Spektrum des gespielten Tons d (Teilton bei 1175Hz wird untersucht)

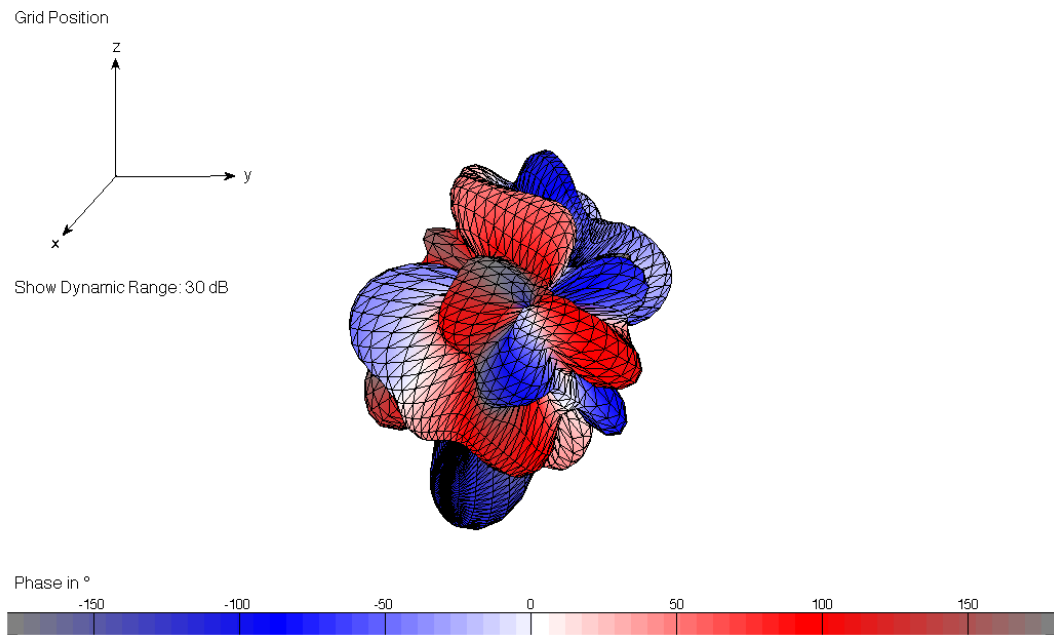


Abbildung 13: Richtcharakteristik des Tones d bei 1175 Hz (Klarinette)

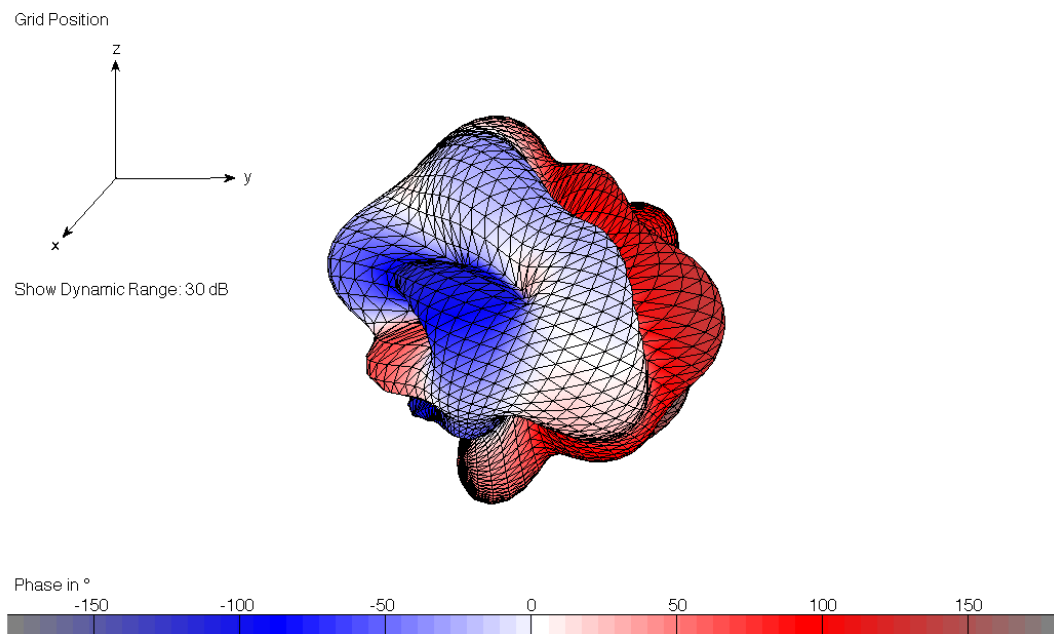


Abbildung 14: Richtcharakteristik des Tones d' bei 1175 Hz (Klarinette)

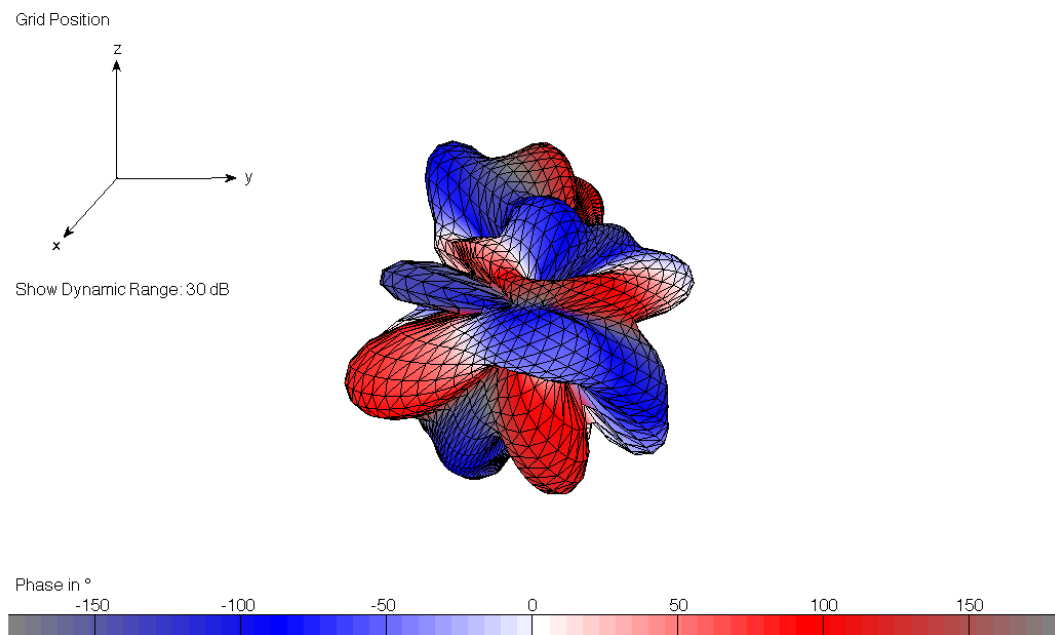


Abbildung 15: Richtcharakteristik des Tones d'' bei 1175 Hz (Klarinette)

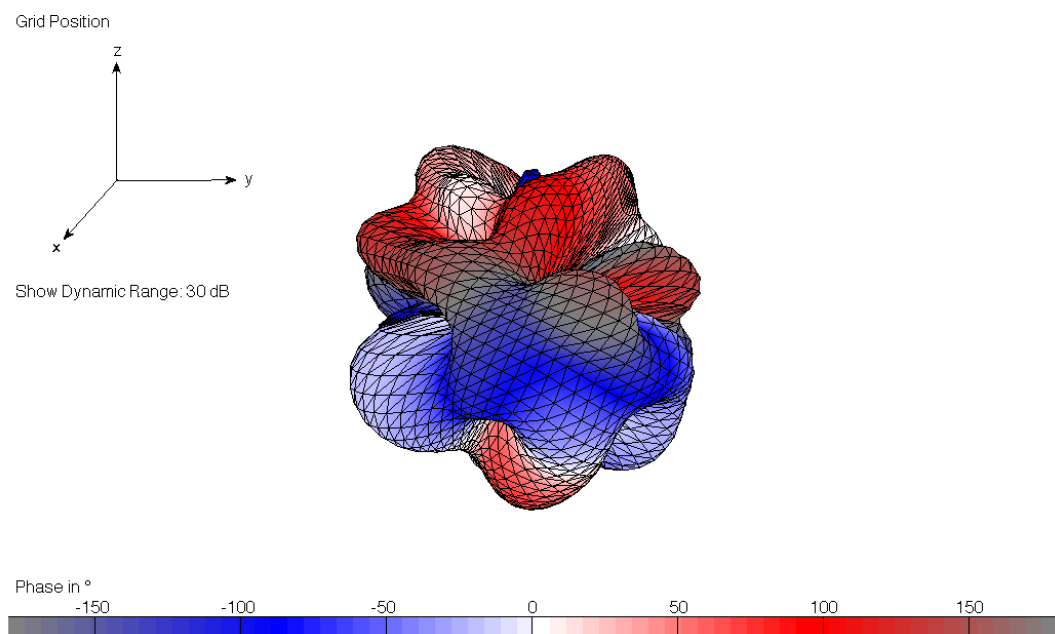


Abbildung 16: Richtcharakteristik des Tones d''' bei 1175 Hz (Klarinette)



Bei der Klarinette sind die stärksten Abweichungen im Abstrahlverhalten bei den gespielten Tönen zu erkennen.  $d$  und  $d''$  haben eine ähnliche Abstrahlcharakteristik, ebenso wie  $d'$  und  $d'''$ , diese weicht jedoch von der anderen ab. Zu erklären ist dies vermutlich durch die unterschiedlichen Griffpositionen am Instrument. Die Griffe für  $d$  und  $d''$  sehen weitgehend geschlossene Löcher vor, wohingegen  $d'$  und  $d'''$  mit offenen Löchern gespielt werden. Somit ist eine Hauptabstrahlrichtung für  $d$  und  $d''$  kaum auszumachen, bei  $d'$  und  $d'''$  ist eine Tendenz in Richtung der Lochöffnungen erkennbar.

## 4 Fazit

Die ursprüngliche Annahme bestand darin, dass sich die Abstrahlcharakteristik eines Instrumentes bei einer bestimmten Frequenz nicht wesentlich ändert, wenn Töne in verschiedenen Oktavlagen gespielt werden. Der vorangehende Versuch hat jedoch gezeigt, dass die Stellung von Öffnungen am Instrument einen Einfluss auf die Abstrahlung hat.

Grundsätzlich ist zu erwähnen, dass mit dem verwendeten Verfahren nur Tendenzen dargestellt werden können.

Da die Phasenlage der gemessenen Signal zufällig ist, kann die gewonnene Phaseninformation nicht zwischen verschiedenen Messungen verglichen werden. Es ist lediglich eine qualitative Aussage innerhalb einer Abstrahlcharakteristik möglich.

Für zukünftige Versuche sollten folgende Punkte beachtet werden:

- Ausschließen von Einflüssen durch unterschiedliche Spielweise bei mehrmaliger Wiederholung (beim vorangegangenen Versuch wurde jeder gespielte Ton nur jeweils einfach ausgewertet).
- Mathematische Rotationstransformation der Kugelharmonischen zur korrekten Ausrichtung am Koordinatensystem.
- Instrumente sollten sich möglichst genau im akustischen Zentrum der Kugel befinden.
- Genaue Dokumentation der Spielweise (Griffstellungen,...).

## Literatur

[1] K. Hesse and I. H. Sloan. Hyperinterpolation on the sphere. *Sydney NSW 2052*, May 2006.

[2] F. Zotter. Spherical Harmonic Framework for Matlab.