

Akustische Messtechnik, LU

Laborbericht

Ander Gaspar Perez Palacios, Manuel Brandner, Florian Wendt

Betreuung: Dr. Franz Zotter

Graz, 1. Oktober 2012



institut für elektronische musik und akustik



Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	4
2	Einleitung	4
3	Messaufbau	4
3.1	Richtcharakteristik	4
3.2	Abstrahlcharakteristik	6
4	Signalverarbeitung	6
4.1	Sweep-Entfaltung der Mikrofonvermessung	6
4.2	Sweep-Entfaltung der Lautsprechervermessung	7
5	Sphärisches Wellenspektrum	8
6	Auswertung der Messergebnisse	9
6.1	Messung von Mikrofonen mittels kugelförmigen Lautsprecherarray	9
6.2	Messung des Genelec 8020 Lautsprechers mittels kugelförmigen Mikrofonarray	11
7	Conclusio	12

1 Kurzfassung

Mit einem kreisförmigen Lautsprecherarray ist es möglich, die frequenzabhängige Richtcharakteristik von Mikrofonen in 3-D zu ermitteln. Wird eine halbkreisförmige Mikrofonanordnung benutzt, ist es möglich, die Abstrahlcharakteristik eines Lautsprechers für verschiedene Frequenzen in 3-D zu ermitteln. Dieses Protokoll zeigt zu beiden Versuchen Auswertungen, die im Rahmen der Laborübungen am 24.5.2012 und 25.5.2012 anhand von MATLAB - Programmen errechnet wurden.

2 Einleitung

Jede Quelle (Lautsprecher) und jeder Empfänger (Mikrofon) hat ein eigenes Aufnahme- bzw. Abstrahlmuster. Mittels des holographischen Ansatzes kann man diese Muster messen und berechnen: Kennt man den Druck und die Schnelle auf der Oberfläche eines homogenen Volumens, ist der Druck an jedem Punkt dieses Volumens definiert und berechenbar (*Kirchhoff-Helmholtz-Integral*). Somit kann man sagen, dass die Abstrahlcharakteristikberechnung das umgekehrte Problem zur Richtcharakteristikberechnung ist. Einmal ist der Druck auf der Oberfläche bekannt (Richtcharakteristikberechnung) und einmal wird der Druck gemessen, um auf die Druckverteilung an einem Punkt des homogenen Volumens (Lautsprecher) zu schließen. Da das homogene Volumen (Kugel) nur endlich abgetastet werden kann (N Mikrofone bzw. M Lautsprecher), stellt sich bei holographischen Ansätze immer die Frage, in welchem Frequenzbereich diese Messung gültig ist: Bei hohen Frequenzen tritt das sogenannte *spatial aliasing* auf und die tiefste messbare Frequenz hängt von der unteren Grenzfrequenz der Quelle als auch des Empfängers ab. Das Ziel der beiden Messungen, die in diesem Protokoll erläutert werden, ist es, die Richtcharakteristik verschiedener Mikrofone und die Abstrahlcharakteristik eines Lautsprechers zu messen und die gültigen Frequenzbereiche zu ermitteln.

3 Messaufbau

3.1 Richtcharakteristik

Die Richtcharakteristik der 9 verschiedenen Mikrofontypen wurde mit einem kreisförmigen Array mit 16 Tröpfchenlautsprecher vermessen. Das zu messende Mikrofon wurde auf einem Drehteller gestellt und dieser in die Mitte des vom Arrays aufgespannten Kreises gestellt. Der Drehteller wurde für jede Messung um 12° rotiert und ein logarithmischer Sweep wurde über jeden Lautsprecher abgespielt. Dies führt zu $\frac{360}{12} * 16 = 480$ Messpunkten an einer Kugeloberfläche.

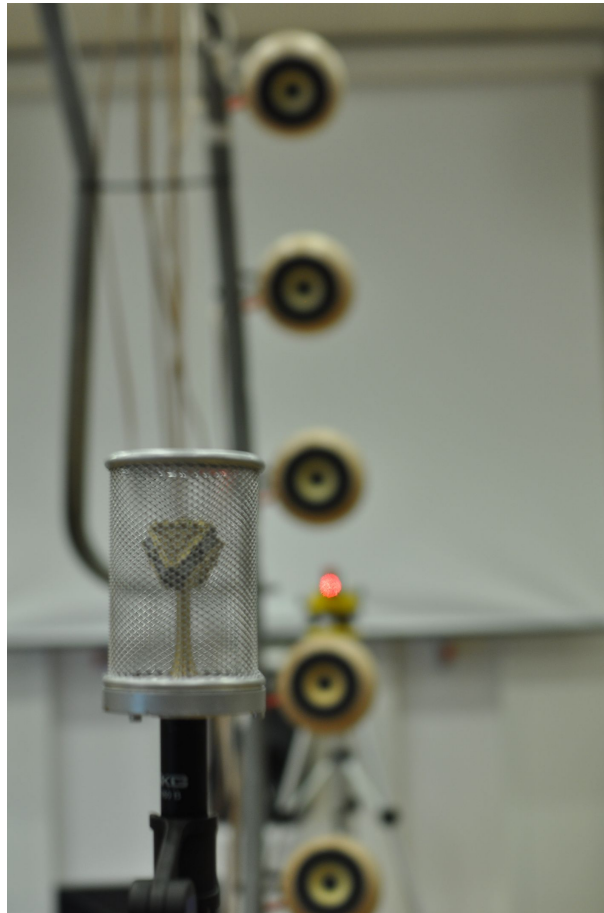


Abbildung 1: Messaufbau für die Richtcharakteristikmessung

Um für alle Lautsprecher einen gemeinsamen Referenzpegel zu ermitteln, wurde eine Kalibrierung mittels Messmikrofon durchgeführt. Das Messmikrofon wurde auf im Arraymittelpunkt mit 0° Auslenkung positioniert. Die Positionierung des Messmikrofons erfolgte mit Hilfe eines Lasers (siehe Abbildung 1). Der Messaufbau ist in Abbildung 1 zu sehen.

Im Konkreten wurden folgende Mikrofonkapseln vermessen:

1. AKG 480 (Niere)
2. AKG 414 (Kugel)
3. AKG 414 (Niere)
4. AKG 414 (Superniere)
5. AKG 414 (Acht)
6. 4 x AKG Tetris

3.2 Abstrahlcharakteristik

Die Abstrahlcharakteristik des Lautsprechers GENELEC 8020A wurde mittels eines kreisförmigen Mikrofonarrays mit 18 Behringer-Mikrofonen des Typs *ECM8000* gemessen. Der Lautsprecher, montiert auf einen Boxenstativ, wurde auf einen Drehteller gestellt und mit logarithmische Sweeps bespielt. Der Drehteller rotiert jedesmal um 10° . Dies führt zu $\frac{360}{10} * 18 = 684$ diskreten Messpunkten auf einer Kugeloberfläche. Die Höhe des Lautsprechers ist durch sein akustisches Zentrum festgelegt, das im Mittelpunkt des vom Mikrofonarray aufgespannten Halbkreises liegt. Abbildung 2 zeigt den Messaufbau zur Vermessung des Lautsprechers.



Abbildung 2: Messaufbau für die Abstrahlcharakteristikmessung

4 Signalverarbeitung

4.1 Sweep-Entfaltung der Mikrofonvermessung

Um die Übertragungsfunktionen der ausgemessenen Mikrofone zu erhalten, werden die aufgenommenen Sweepsignale entfaltet. Dabei kommt als Referenzsignal der mittels

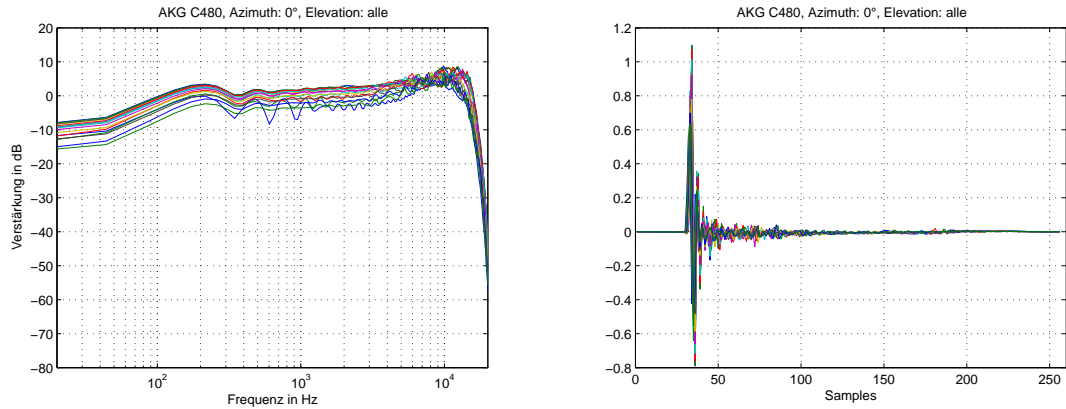


Abbildung 3: Amplitudenverläufe und Impulsantworten des AKG C480 (Niere)

Messmikrofon aufgenommene Sweep zum Einsatz.

Dazu werden in einem ersten Schritt die einzelnen Sweeps aus den wav-Files extrahiert. Dies geschieht in einer Schleife durch Ausfensterung (Hann-Fenster) auf je 256 Samples pro Impulsantwort (siehe Abbildung 3). Dabei enthält jedes wav-File für einen bestimmten Azimutwinkel die Sweeps der diskreten Zenitwinkel. Dadurch sollten gleichzeitig etwaige Raumreflexionen aus den Messungen entfernt werden.

Die Entfaltung berechnet sich dann im Frequenzbereich wie folgt:

$$H_{mic}^{\phi,\vartheta}(\omega) = \frac{Y_{meas}^{\phi,\vartheta}(\omega)}{S_{ref}(\omega)} H_{LS}^{\vartheta}(\omega) * W(\omega), \quad (1)$$

mit $H_{mic}^{\phi,\vartheta}(\omega)$ als Frequenzantwort des jeweiligen Mikrofons für die diskreten Zenitwinkel ϑ und Azimutwinkel ϕ , $Y_{meas}^{\phi,\vartheta}(\omega)$ als fouriertransformiertes Sweepsignal, aufgenommen durch die jeweilige Mikrophonkapseln, $S(\omega)$ fouriertransformiertes Sweepsignal und $H_{LS}^{\vartheta}(\omega)$ als Frequenzantwort der Lautsprecher, gefenstert mit $W(\omega)$. Dadurch werden alle Tröpfchenlautsprecher individuell entzerrt.

Die Amplitudenverläufe über den Frequenzbereich einer Mikrophonkapsel sind in 3(a) dargestellt. In 3(b) sind die Impulsantworten dargestellt.

Es ergeben sich für jedes der 9 gemessenen Mikrophonkapseln 480 Impuls- bzw. Frequenzantworten.

4.2 Sweep-Entfaltung der Lautsprechervermessung

Die Sweep-Entfaltung der Lautsprechervermessung geschieht auf ähnliche Art und Weise wie jene der Mikrofonvermessung, allerdings sind außen nun Mikrofone und innen der zu vermessende Lautsprecher. Dies bedeutet, dass wir nun für jeden vom Lautsprecher abgespielten Sweep 18 gleichzeitig aufgenommene wav-Files für jeden Azimutwinkel erhalten. Die Ausfensterung dieser aufgenommenen Sweeps erfolgte wieder mittels Hann-Fenster und 256 Samples (Raumreflexionen). Als Referenzsignal wurde das dem Lautsprecher zugespielte Sweepsignal verwendet und die Frequenzantwort des Lautsprechers berechnet

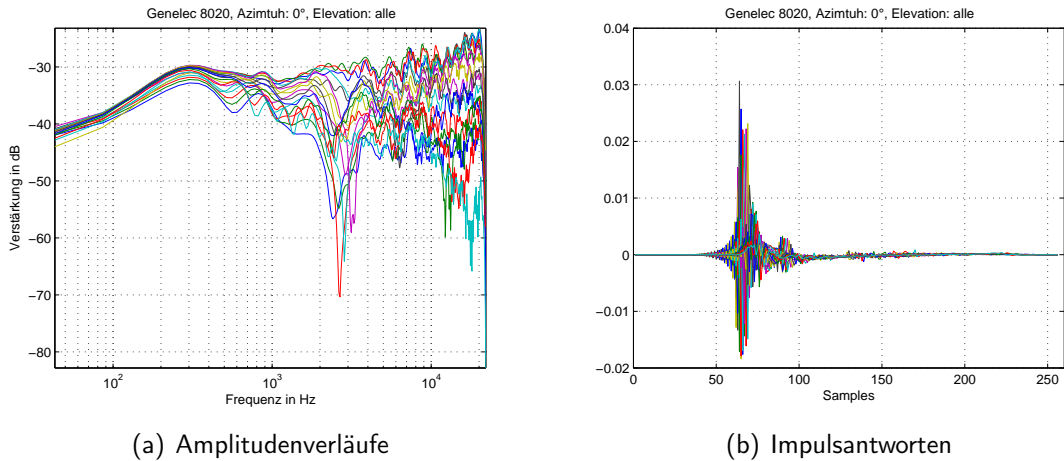


Abbildung 4: Amplitudenverläufe und Impulsantworten des Genelec 8020

sich analog zu Gleichung (1) im Frequenzbereich aus:

$$H_{LS}^{\phi, \vartheta}(\omega) = \frac{Y_{meas}^{\phi, \vartheta}(\omega)}{X_{sweep}(\omega)}. \quad (2)$$

Die erhaltenen Kalibrationsfaktoren (siehe Kapitel 3) wurden in die Entfaltung miteinbezogen. Dies äußert sich im Zeitbereich wie folgt:

$$h_{LS,cal}^{\phi, \vartheta}[n] = h_{LS}^{\phi, \vartheta}[n]g^{\vartheta}, \quad (3)$$

mit g^{ϑ} als Gewichtung des jeweiligen Mikrofons der dazugehörigen Zenitwinkel ϑ . Die Frequenz- und Impulsantworten des Lautsprechers sind in Abbildung 4 dargestellt. Bei ca. 20ms, sowie bei 80ms, sind Reflexionen erkennbar. Vermutlich ergibt sich die erste Reflexion durch die schmale Stirnfläche der Holzplatte, im Abstand von ca. 7cm zu den Mikrofonkapseln, auf der die Mikrofone befestigt waren. Die zweite Reflexion könnte von der Decke oder dem Boden hervorgerufen worden sein.

5 Sphärisches Wellenspektrum

Zur Erzeugung der Plots der Abstrahlcharakteristik des Lautsprechers bzw. der Richtcharakteristik der Mikrofonkapseln muss das sphärische Wellenspektrum ψ_N berechnet werden.

Dies geschieht für beide Messsysteme auf die selbe Art und Weise und ist wie folgt definiert:

$$\mathbf{p} = \mathbf{Y}_N \psi_N \quad (4)$$

mit \mathbf{p} als Vektor aller gemessenen Schalldrücke auf der Kugeloberfläche mit Radius R , ψ_N als sphärisches Wellenspektrum, \mathbf{Y}_N als Kugelflächenfunktionen und N als Ordnung.

Die Ordnung N berechnet sich aus der Anzahl diskreter Messpunkte M und steht im folgenden Zusammenhang:

$$M = (N + 1)^2. \quad (5)$$

Zur Berechnung des sphärischen Wellenspektrums wird nun Gleichung (4) umgeformt und wir erhalten:

$$\psi_N = \mathbf{Y}_N^{-1} \mathbf{p} \quad (6)$$

Da es sich bei der Matrix \mathbf{Y}_N im Allgemeinen nicht um eine quadratische Matrix handelt, muss N so gewählt werden, dass \mathbf{Y}_N invertiert werden kann (Pseudoinverse). Dies geschieht durch die Konditionierungszahl und wir erhalten folgende Ordnungen:

- $N = 14$ für die Mikrofonkapselvermessung,
- $N = 15$ für die Lautsprechervermessung.

6 Auswertung der Messergebnisse

6.1 Messung von Mikrofonen mittels kugelförmigen Lautsprecherarray

Die Messergebnisse der Mikrofone ergab sich weitläufig wie erwartet. Im mittleren Frequenzbereich verhalten sich die Mikrofone annähernd ihrer Richtcharakteristik aus dem Herstellerdatenblatt.

Beim AKG C414 handelt es sich um eine Mikrofon mit einer Membrangröße von 2 Zoll und einem nicht symmetrischen Korb. Die Membran des C480 ist ca. um die Hälfte kleiner. Die Grenzfrequenz, ab welcher Kolbenmembranen stark zu bündeln beginnen errechnet sich wie folgt:

$$kr_{kolb} = \frac{\omega}{c} = 1, \quad (7)$$

wobei r_{kolb} der Radius der Kolbenmembran und k die Wellenzahl ist. Wird nun diese Gleichung auf die zu vermessenden Mikrofone angewandt, so ergeben sich Bündelungsgrenzfrequenzen von einerseits $f_{g,b} = 4kHz$ für das C414 (Abb. 5 (b)) sowie $f_{g,b} = 8kHz$ für das C480 (Abb. 6). Jedoch ist klar aus der Messung zu erkennen, dass das Kleinmembranmikrofon viel geringere Bündelungen als das Großmembranmikrofon, vor allem effektive Sensitivitätsverluste abseits der axialen Richtung, aufweist.

Beim Kleinmembranmikrofon ist ab ca. 7 kHz ein Sensitivitätsverlust im Bereich von 180° ersichtlich. Beim C414 ist bei näherer Betrachtung zu erkennen, dass der vertikale Schnitt nicht die gleichen Ergebnisse wie der horizontale liefert (Abb. 7, 10 und 11). Diese Abweichung ist hauptsächlich auf den nicht symmetrischen Korb zurück zu führen und beim C480 (Abb. 8) nicht vorhanden. Für tiefe Frequenzen ergibt sich wie erwartet eine höhere Lokalisationsschärfe für das Kleinmembranmikrofon (Abb. 9).

Die baulichen Einflüsse der Mikrofone (Korb und Aufhängungen der Mikrofone) dürfen

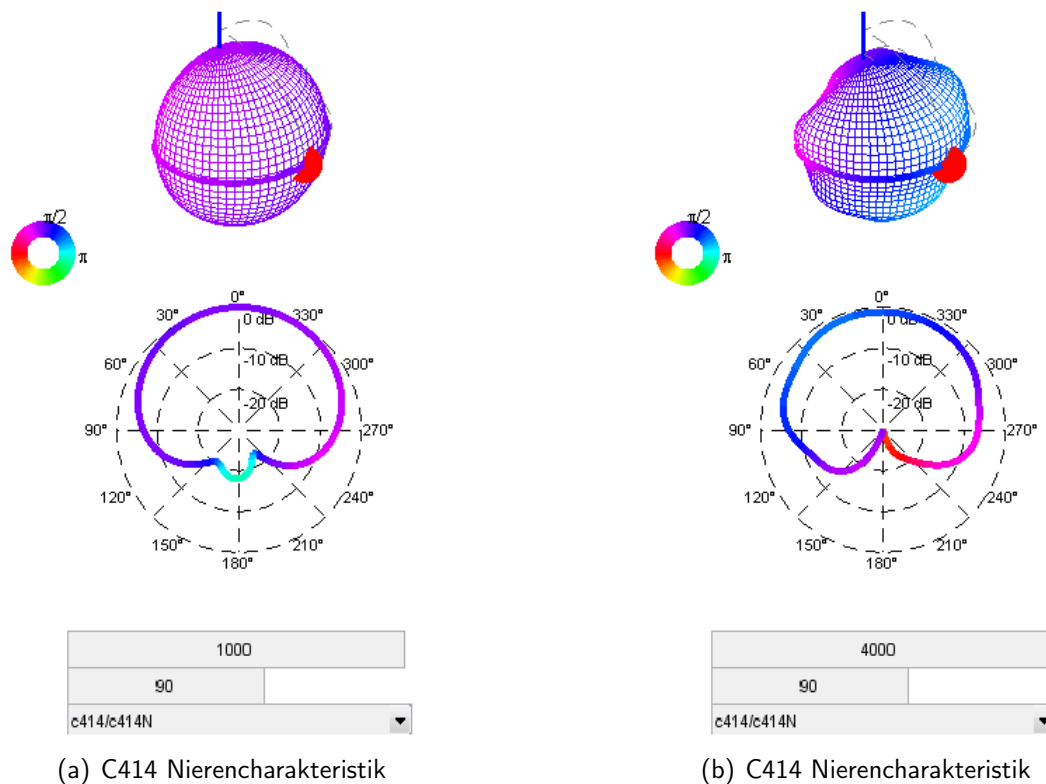


Abbildung 5: Richtcharakteristik des Großmembranmikrofons AKG C414 für $f=1000$ Hz und $f=4000$ Hz

nicht vernachlässigt werden. Eine weitere notwendige Betrachtung bei den Messergebnissen ist die Beeinflussung durch nicht exakte zentrale Anordnung der zu messenden Mikrofone vom idealen Mittelpunkt des Messaufbaus, welcher eine erhöhte Ordnungszahl N zur korrekten Darstellung der Messergebnisse über die Kugelflächenfunktionen voraussetzt.

Den stärksten Einfluss durch bauliche Abweichungen ließ sich bei den Messergebnissen des Tetrismikrofons erkennen, bei dem die Kapseln 3 und 4 eine deutliche Abweichung ihrer 0° - Richtung aufweisen (vgl. Abb. 12). Das Tetrismikrofon selbst besteht aus vier Kapseln, die so zu einander ausgerichtet sind, dass die Anordnung der Verteilungsvorschrift für Holografie entspricht. Damit kann man das Schallfeld mit 1. Ordnung sphärischen Harmonischen beschreiben. Die axiale Richtung sollte bei allen Kapseln jeweils die 0° - Richtung sein, die wie schon erwähnt wurde, bei 2 Kapseln abweicht. Ungenauigkeiten könnten einerseits durch den zylindrischen Korb des Mikrofons hervorgerufen werden, sowie eine nicht genaue Zentrierung der Mikrofonkapseln.

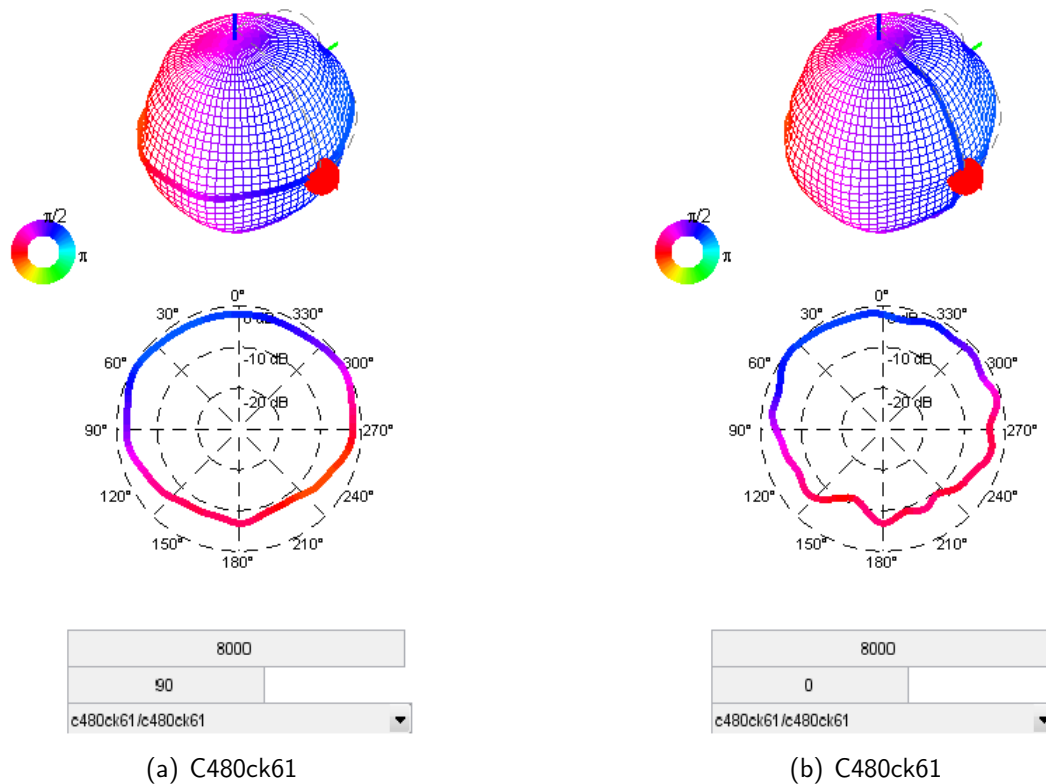


Abbildung 6: Richtcharakteristik des Kleinmembranmikrofons AKG C480ck61 für $f=8000$ Hz für vertikalen und horizontalen Schnitt

6.2 Messung des Genelec 8020 Lautsprechers mittels kugelförmigen Mikrofonarray

Es ist klar aus Abb. 13 ersichtlich, dass sich für tiefe Frequenzen eine deutliche kugelförmige Abstrahlcharakteristik für den Genelec Lautsprecher ergibt. Laut Hersteller befindet sich die Trennfrequenz des Lautsprechers bei 3 kHz. Die Messergebnisse liefern ein stabiles Zentrum des Studiolautsprechers und eine konstante Pegelabstrahlung ab 2 kHz im vorderen 180° Bereich (vgl. 14 (b)). Für höhere Frequenzen sind deutliche Bündelungen zu erkennen und weisen auf das typische Abstrahlverhalten einer Kolbenmembran im oberen Frequenzbereich hin (vgl. 14 (c), (d)). Für die Auswertung der Richtcharakteristika hin zu hohen Frequenzen ist zusätzlich darauf zu achten, dass die Frequenzauflösung durch das spatiale Aliasing, hervorgerufen durch die diskrete Abtastung der angeordneten (endlich in der Anzahl und nicht infinitesimal klein) Messmikrofone, begrenzt wird.

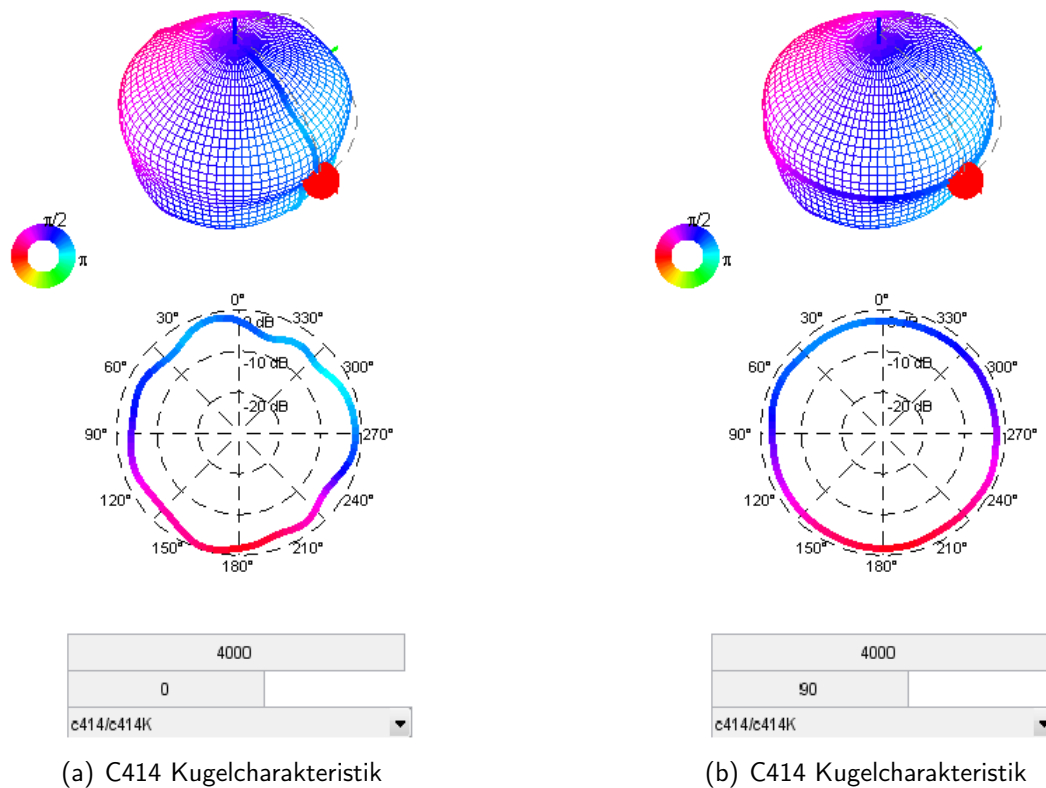


Abbildung 7: Richtcharakteristik des Großmembranmikrofons AKG C414 $f=4000$ Hz für vertikalen und horizontalen Schnitt

7 Conclusio

Die Messungen verliefen alle erfolgreich und man konnte gut anhand der ausgewerteten Messwerte die Verhalten der Mikrofone über den Frequenzbereich beobachten. Es war sehr schön zu sehen, wie sich verschiedene Bauweisen und Randbedingungen in den Messwerten manifestieren. Des Weiteren konnte man die Unterschiede zwischen der Bauweise eines Kleinmembran- und Großmembranmikrofons analysieren. Die Auswirkungen einer komplexeren Mikrofonanordnung wurde durch das Tetrismikrofon ersichtlich und erhöhte die Aufmerksamkeit in Bezug auf messtechnische Fehlerquellen.

Beim Genelec-Lautsprecher ergab sich ein schöner Verlauf der Abstrahlungscharakteristik über den ganzen Frequenzbereich, was wiederum einen Studiomonitor ausmacht. Die Messaufbauten lieferten auch durchgehend positive Ergebnisse und keine gravierende Störeinflüsse. Es wäre sicher doch noch genauere Anordnung des Messequipments möglich bessere Messungen zu erzielen. Dazu müssten noch genauere Zentrierungen der zu messenden Mikrofone vorgenommen werden. Jedoch ist es trotz geringeren Ungenauigkeiten möglich gewesen, sehr positive Ergebnisse zu erzielen.

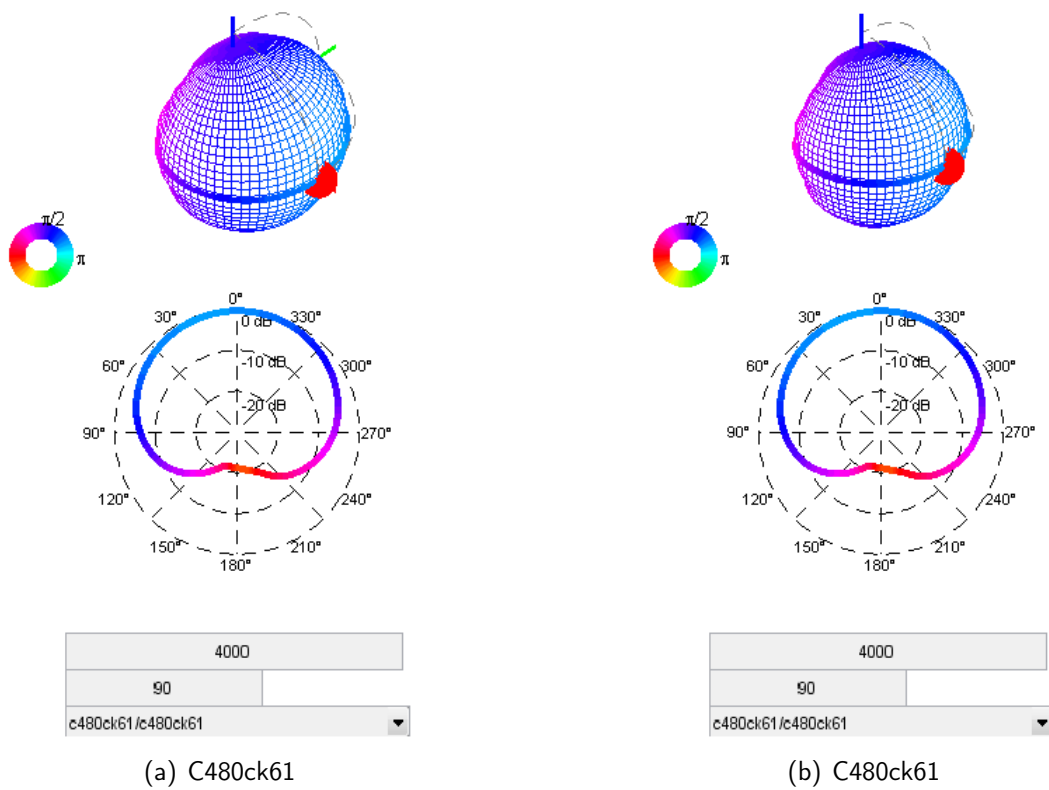


Abbildung 8: Richtcharakteristik des Kleinmembranmikrofons AKG C480ck61 für $f=4000$ Hz für vertikalen und horizontalen Schnitt

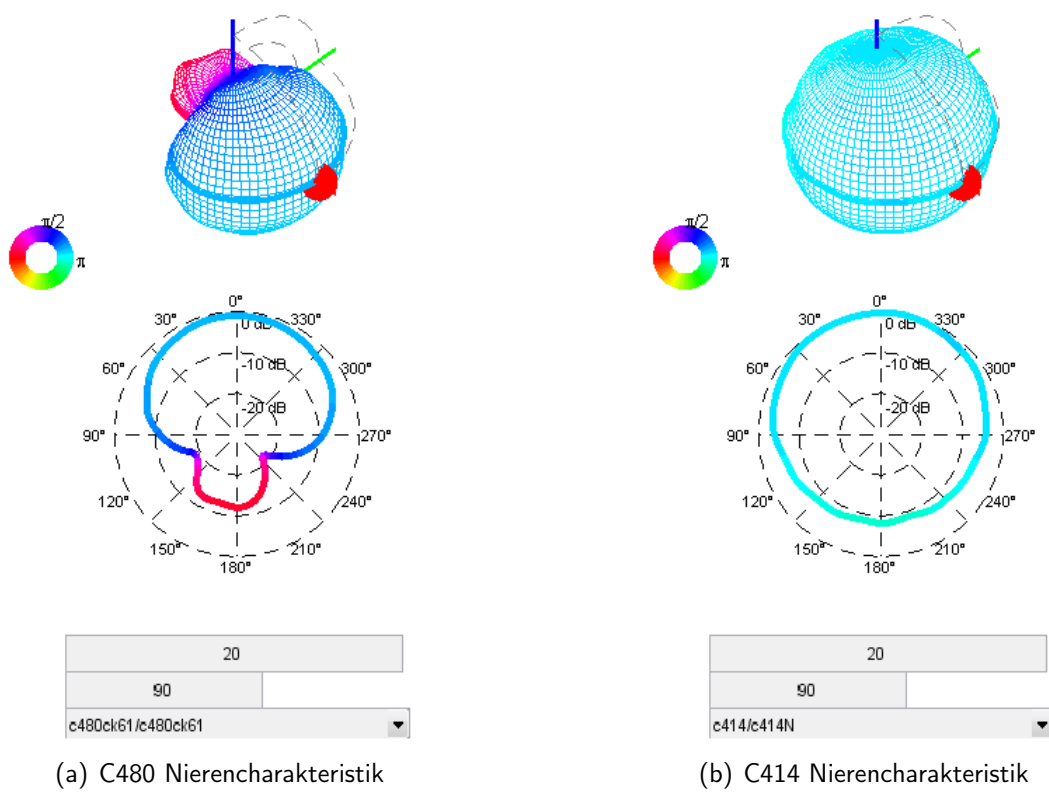


Abbildung 9: Richtcharakteristik des Großmembranmikrofons AKG C414 und des Kleinmembranmikrofons C480 für $f=20$ Hz - vertikaler Schnitt

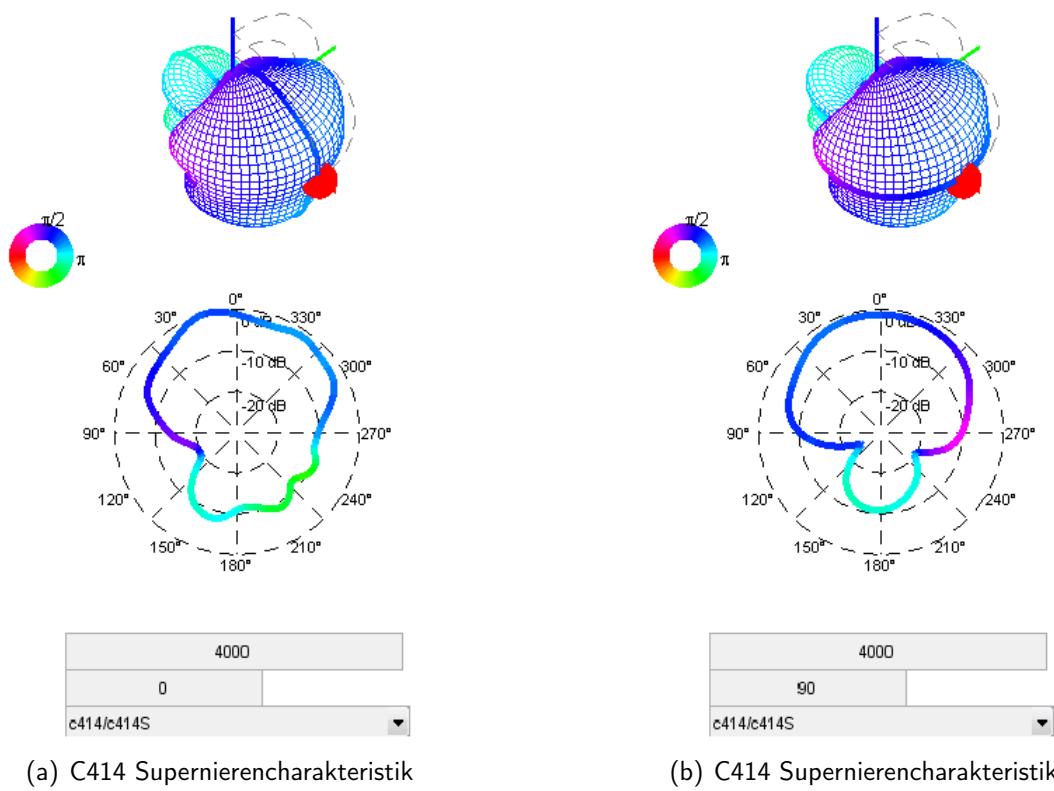


Abbildung 10: Richtcharakteristik des Großmembranmikrofons AKG C414 $f=4000$ Hz für vertikalen und horizontalen Schnitt

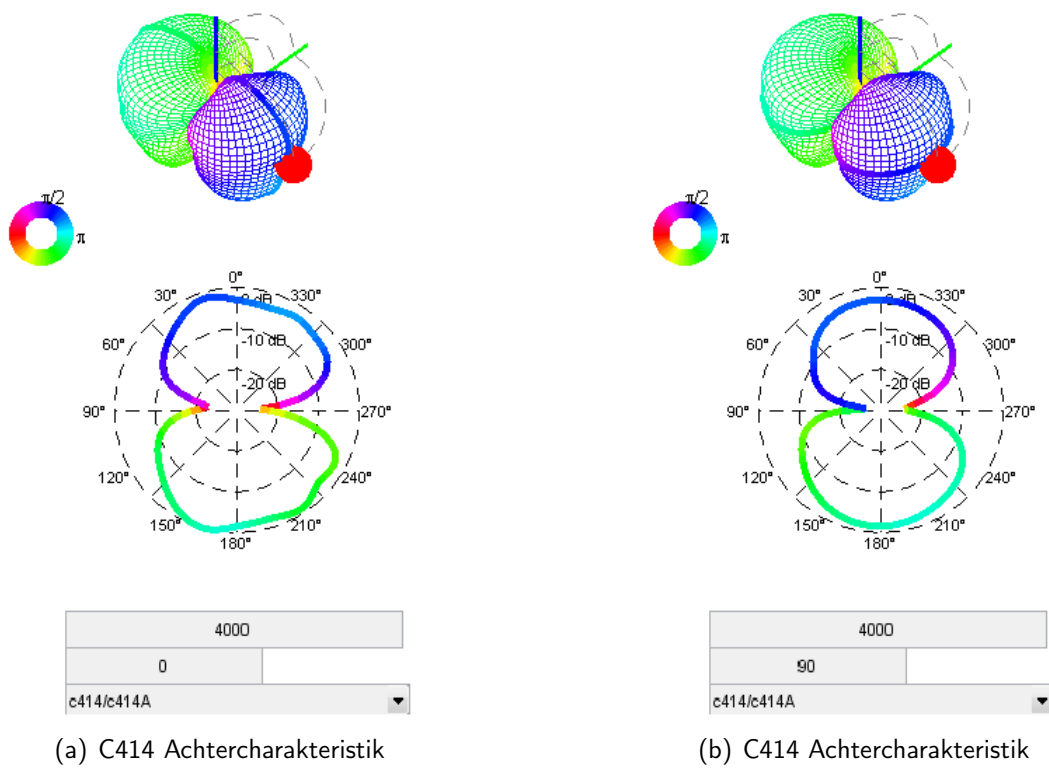
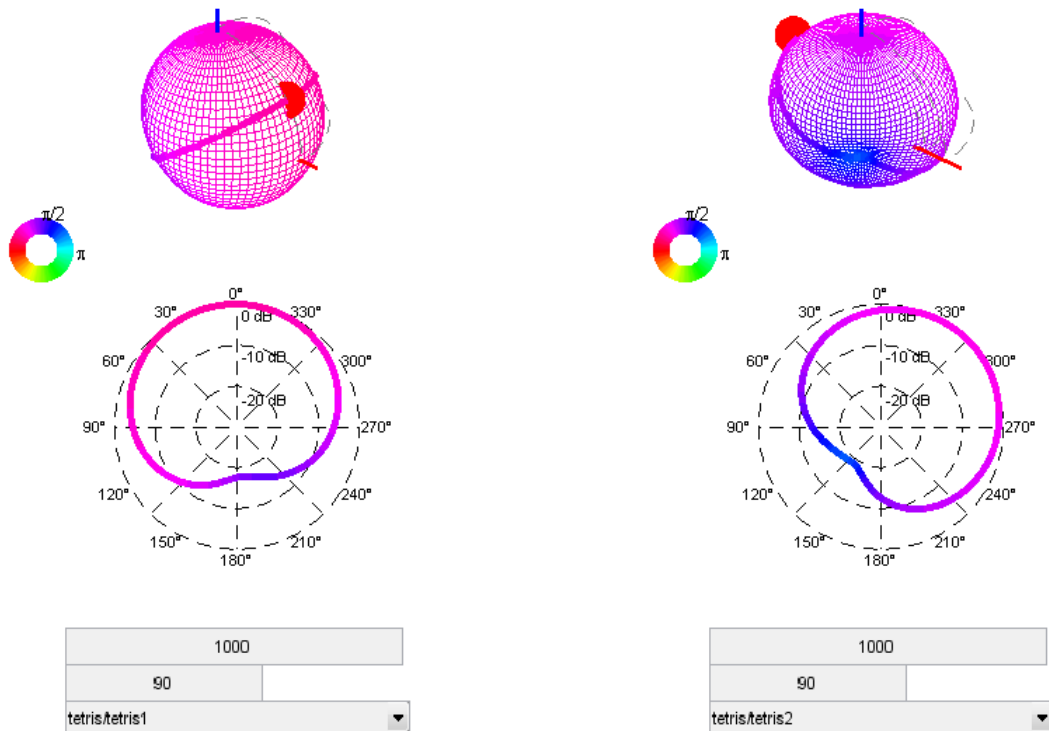
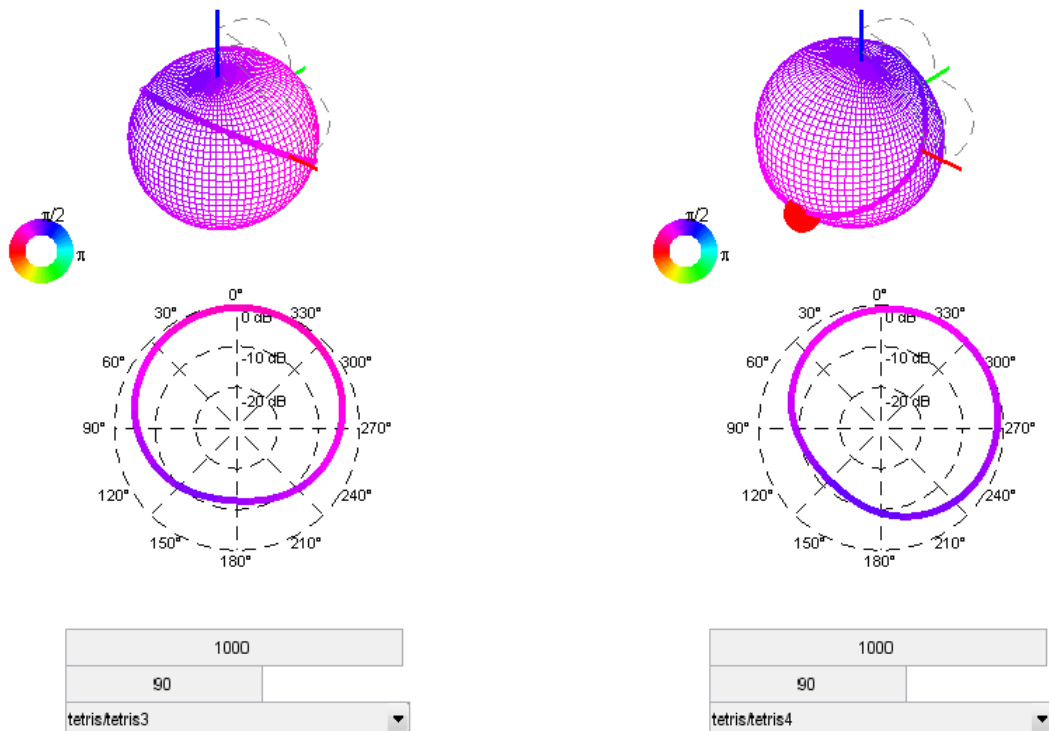


Abbildung 11: Richtcharakteristik des Großmembranmikrofons AKG C414 für $f=4000$ Hz für vertikalen und horizontalen Schnitt



(a) Tetrismikrofon Kapsel 1

(b) Tetrismikrofon Kapsel 2



(c) Tetrismikrofon Kapsel 3

(d) Tetrismikrofon Kapsel 4

Abbildung 12: Richtcharakteristik des Tetrismikrofons für $f=1000$ Hz

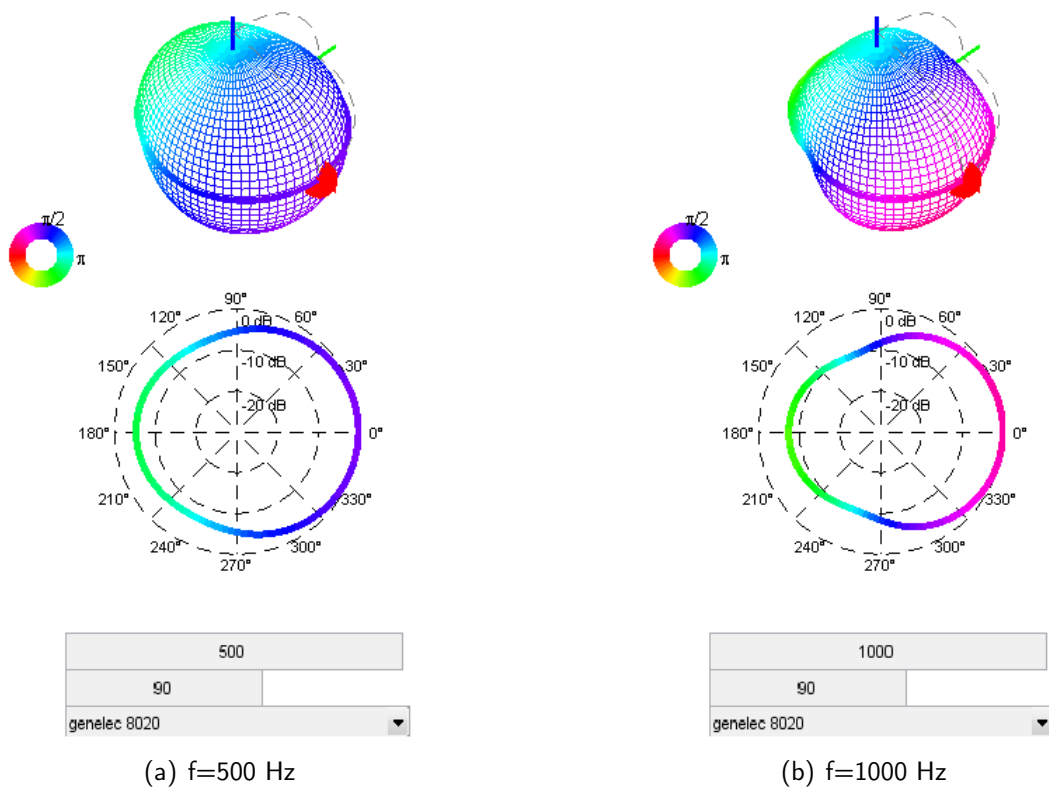


Abbildung 13: Richtcharakteristik des Genelec 8020 Lautsprechers

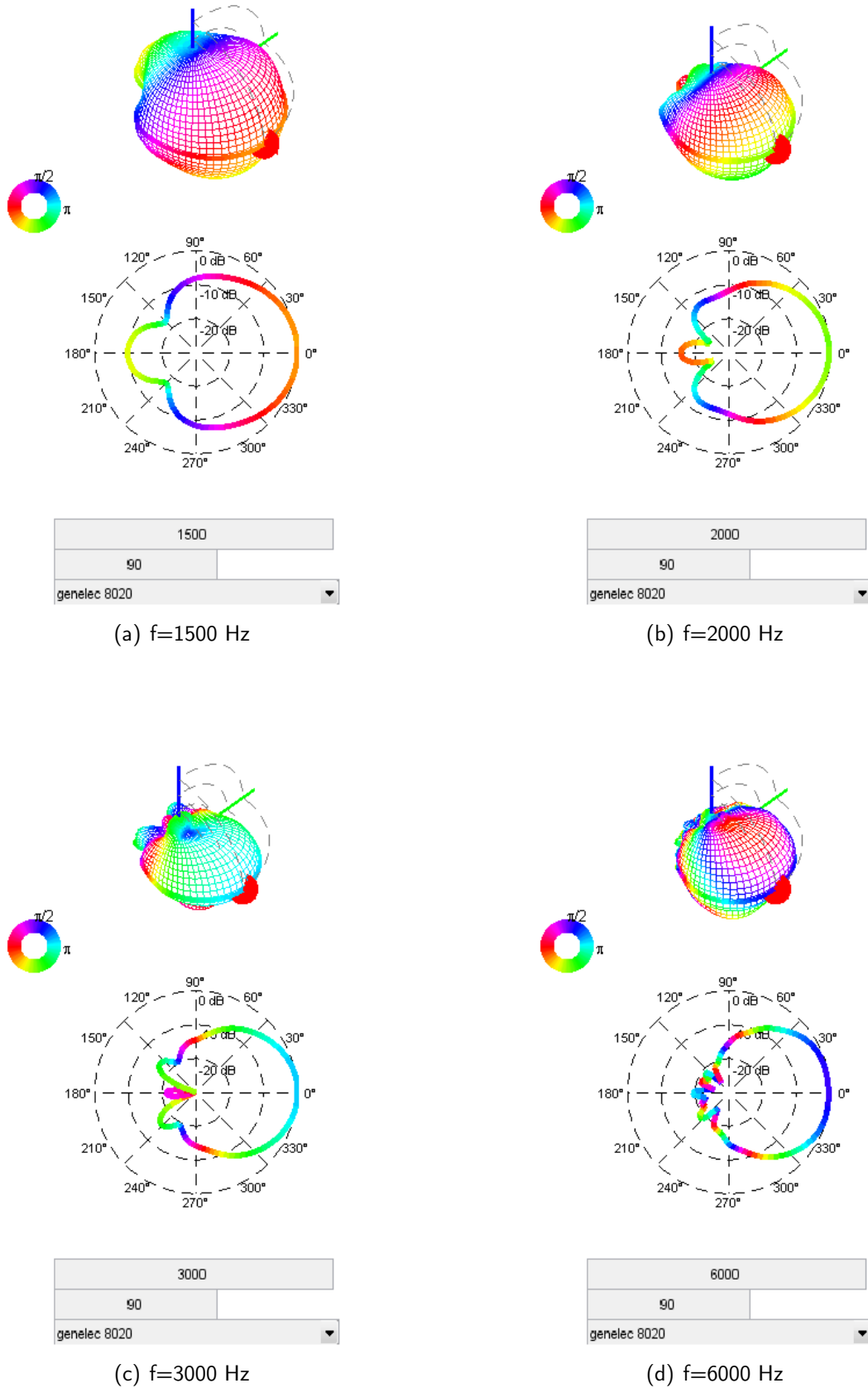


Abbildung 14: Richtcharakteristik des Genelec 8020 Lautsprechers, Trennfrequenz laut Hersteller bei f=3kHz