

# Richtwirkung erzeugen

---

## Inhalt

Einleitung.....	3
Membran.....	3
Größe.....	3
Geometrie .....	4
Quadrat .....	4
Kreis.....	5
Ring.....	6
Kugelausschnitt (konvex).....	6
Kugelausschnitt (konkav).....	7
Zusammenfassung.....	7
Kammer mit Schlitz.....	8
Interferenzen durch multiple Schallquellen.....	10
Kohärente Schallquellen.....	10
Allgemein.....	10
Reduktion von Nebenkeulen.....	10
Auswirkung der Stützstellen.....	11
Mehrwegger nach Horbach und Keele.....	12
Inkohärente Schallquellen.....	14
Dipol .....	14
Kardioide .....	15
Constant Beamwidth Transducer (CBT) .....	15
Gehäuse.....	17
Baffle Step .....	17
Kantendiffraktionen .....	20
Hörner / Waveguides .....	22
Allgemein.....	22
Einfluss der Horntiefe.....	23
Einfluss des Munddurchmessers.....	24
Zusammenfassung.....	26
Kombinationen anhand praktischer Beispiele .....	27

Freistehendes Horn .....	27
Großer Flächenstrahler .....	28
Kardioider Subwoofer .....	31
2-Wege PA-Top.....	34
Referenzen .....	36

## Einleitung

Es gibt bei einem Lautsprecher verschiedene Arten, das Abstrahlverhalten zu beeinflussen. Im Folgenden soll darauf eingegangen werden, welche Möglichkeiten es gibt, eine signifikante Richtwirkung zu erzeugen und welche Eigenschaften sie besitzen.

Die Richtwirkungen werden anhand von BEM-Simulationen (ABEC und AxiDriver) visualisiert. Das hat den Vorteil, dass ideale Bedingungen geschaffen werden können, die eine gegenseitige Überlagerung der Wirkungsweisen ausschließen.

Die Sonogramme sind jeweils auf 0° normiert, um ausschließlich das Abstrahlverhalten darzustellen. Es wird also davon ausgegangen, dass ein Lautsprecher stets linear entzerrt und direkt auf den Hörer eingewinkelt wird.

## Membran

### Größe

Der Membrandurchmesser ist für eine stetig zunehmende Richtwirkung verantwortlich, die ungefähr bei der halben Wellenlänge beginnt, die dem Durchmesser in der betrachteten Dimension entspricht. Das heißt, dass bei rechteckigen Membranen das horizontale und vertikale Abstrahlverhalten getrennt betrachtet werden kann (z.B. bei Bändchen). Je größer der Membrandurchmesser, desto früher beginnt die Richtwirkung.

Das folgende Beispiel zeigt zwei Treiber mit unterschiedlich großen rotationssymmetrischen Membranen in unendlicher Schallwand. Die unendliche Schallwand sorgt dafür, dass ausschließlich das Richtverhalten der Membrangröße zum Tragen kommt.

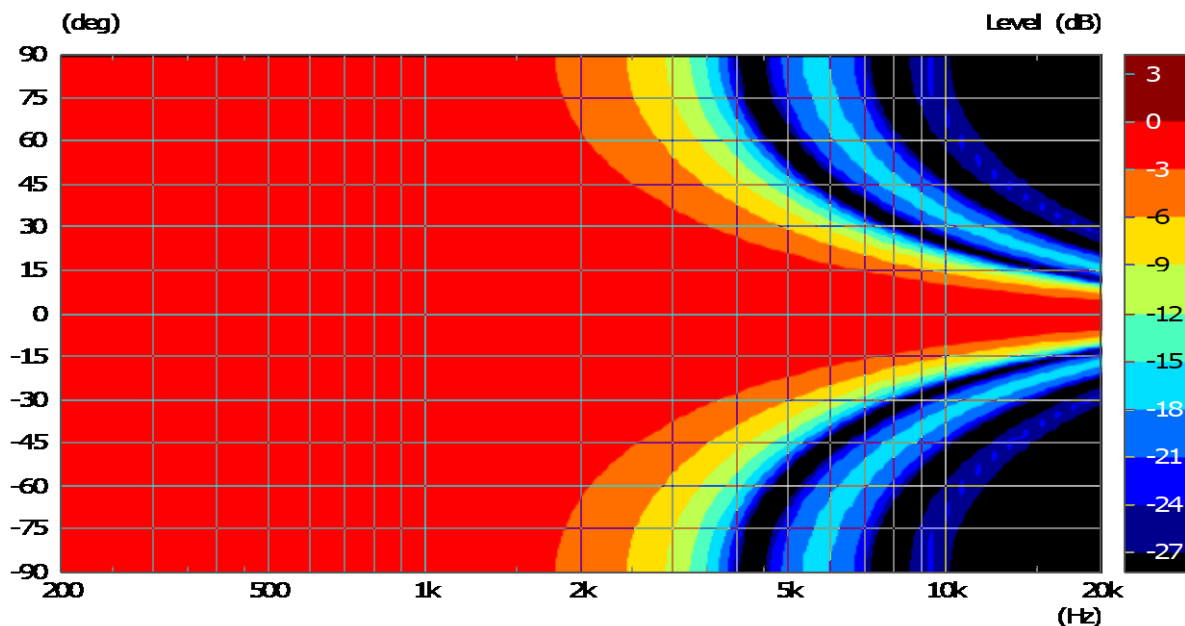


Abbildung 1: Abstrahlverhalten eines idealen Treibers mit 10 cm Durchmesser

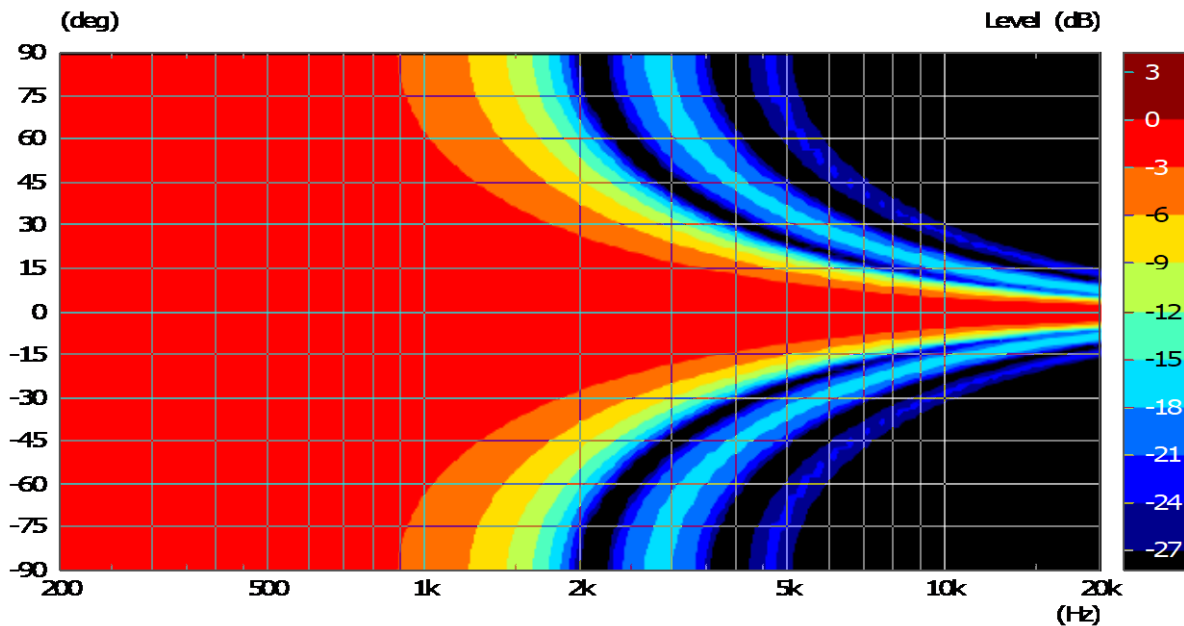


Abbildung 2: Abstrahlverhalten eines idealen Treibers mit 20 cm Durchmesser

Bei realen Konustreibern mit innenliegender Schwingspule koppelt der äußere Teil der Membran mit zunehmender Frequenz ab, so dass sich die effektive Membrangröße verkleinert. Daher steigt die Richtwirkung in der Regel weniger stark an als bei einer Kalotte, bei der die Schwingspule außen sitzt.

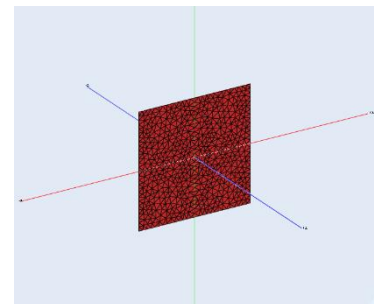
## Geometrie

Die Geometrie der Membran bestimmt maßgeblich, wie stark die Richtwirkung ausfällt. Das betrifft sowohl die zweidimensionale Oberfläche als auch die dritte Dimension, also die Tiefe. Zunächst wird die Auswirkung der Form von flachen Membranen aufgezeigt.

Der Durchmesser der Beispiele beträgt jeweils 10 cm. Das Abstrahlverhalten wird jeweils horizontal angegeben.

### Quadrat

Die Richtwirkung einer quadratförmigen Membran beginnt relativ früh im Frequenzbereich. Der Grund ist, dass über die gesamte Höhe dieselbe Breite vorliegt. Dass die Breite die horizontale Richtwirkung bestimmt, ist sie bezogen auf andere ausgefüllte Formen maximal.



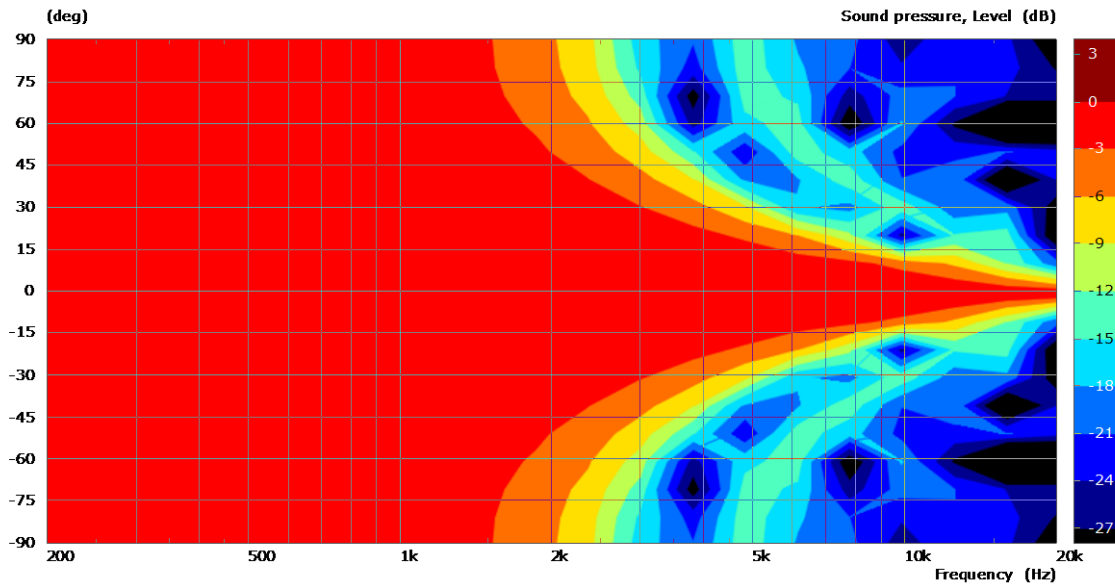


Abbildung 3: Horizontales Abstrahlverhalten einer quadratischen Membran

### Kreis

Bei der kreisförmigen Membran ändert sich die Breite, im Gegensatz zum Quadrat, über die gesamte Höhe. Nur in der Mitte ist sie maximal und verläuft sonst sinusförmig. Dadurch ist die Breite im Mittel geringer als beim Quadrat, was zu einer geringeren Richtwirkung führt. Sie beginnt in diesem Beispiel bei ca. 1,7 kHz anstatt bei 1,5 kHz.

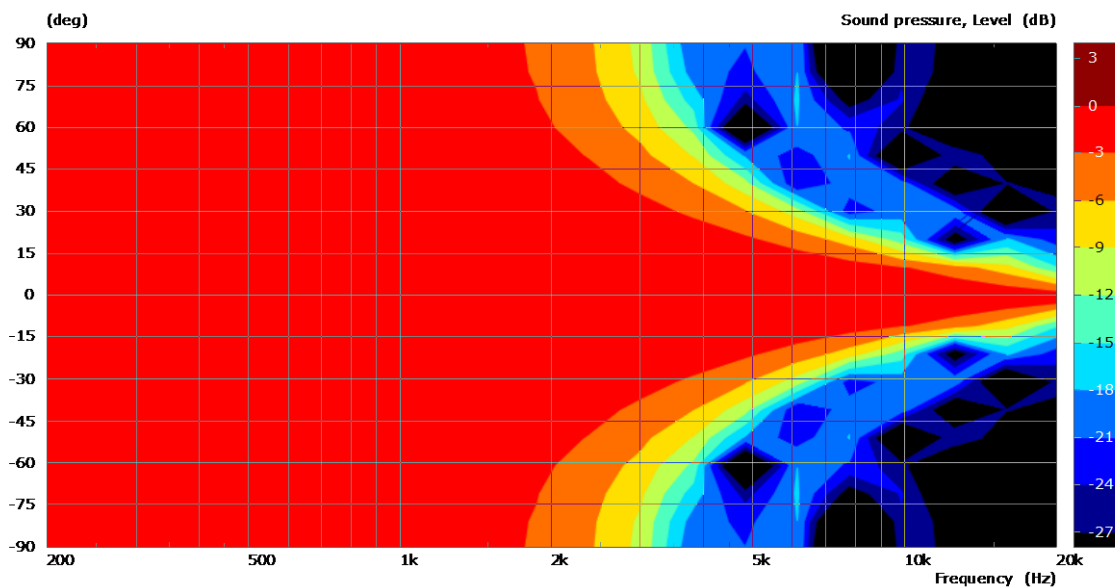
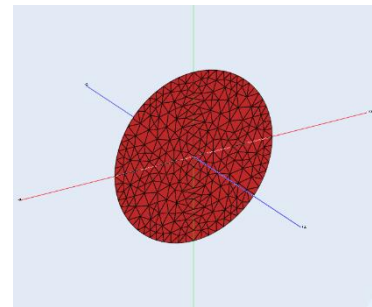


Abbildung 4: Horizontales Abstrahlverhalten einer kreisförmigen Membran

## Ring

Beim Ring befindet sich die schallabstrahlende Fläche nur außen, das innere trägt nicht dazu bei. Das hat zur Folge, dass sich das Gebilde über einen Großteil der Höhe horizontal jeweils in zwei getrennte Schallquellen aufteilen lässt. Das schlägt sich als Nebenkeulen nieder. Die Richtwirkung beginnt dementsprechend im Frequenzbereich früher als bei dem gefüllten Kreis und sogar etwas früher als bei dem Quadrat.

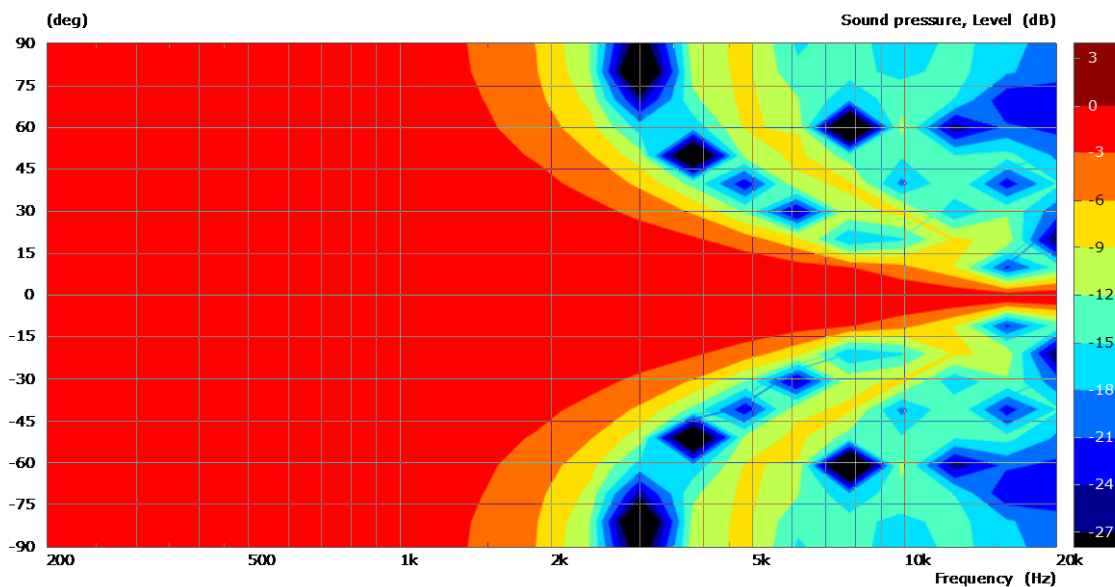
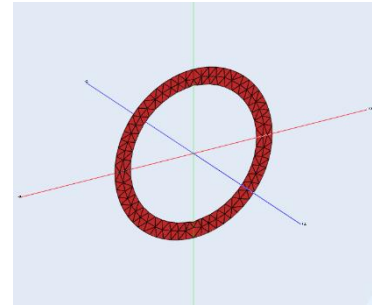
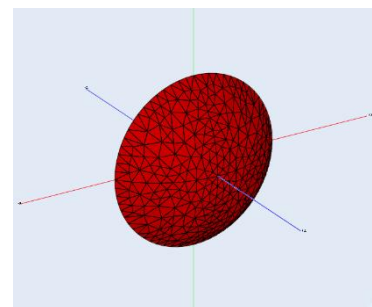


Abbildung 5: Horizontales Abstrahlverhalten einer ringförmigen Membran

## Kugelausschnitt (konvex)

Im Folgenden wird die dritte Dimension, also die Tiefe der Membran, betrachtet. In diesem Beispiel ist die Membran konvex, wölbt sich also aus der Fläche heraus. Als Tiefe wurde der halbe Radius angenommen.

Wie im Abstrahlverhalten ersichtlich, beginnt die Richtwirkung im Frequenzbereich später als bei dem flachen Kreis. Im oberen Frequenzbereich weitet die Abstrahlung sogar wieder auf.



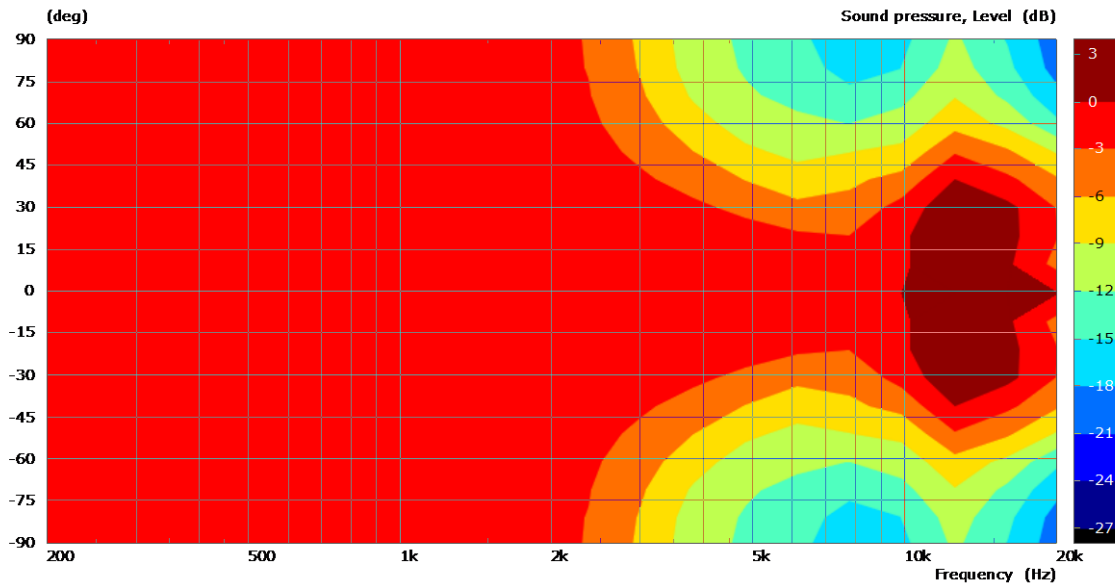


Abbildung 6: Horizontales Abstrahlverhalten einer konvexen Membran

### Kugelausschnitt (konkav)

Auch bei der konkaven Membran beginnt die Richtwirkung im Frequenzbereich etwas weiter oben. Allerdings wirkt der obere Frequenzbereich relativ chaotisch.

Im Grunde erzeugt diese Form eine Art Parabolspiegel während konusförmige Membranen eine Art Horn formen.

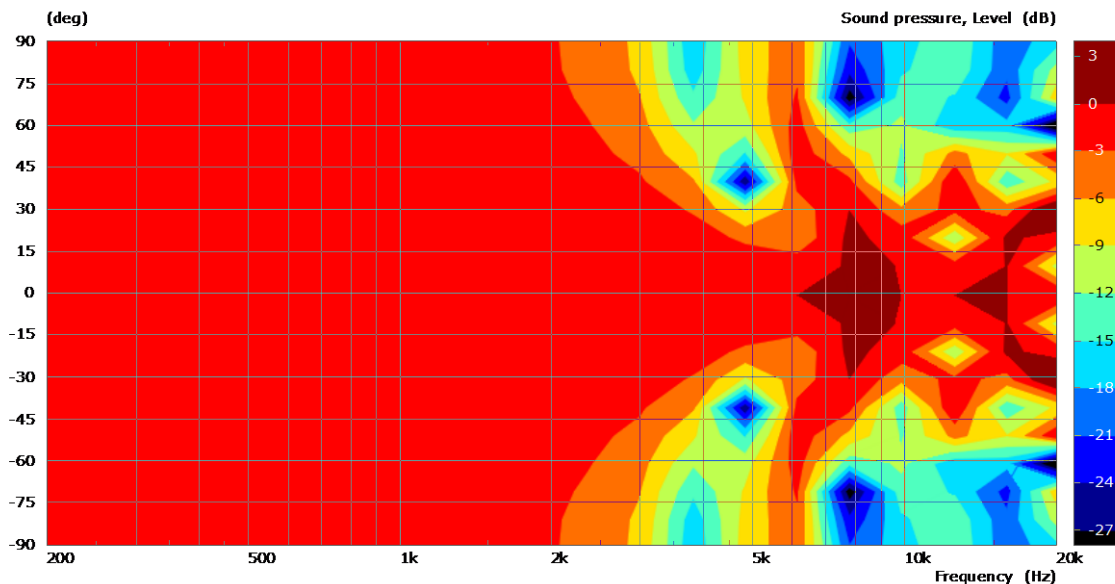
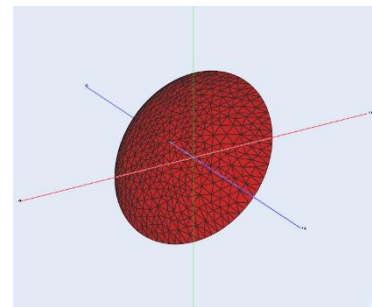


Abbildung 7: Horizontales Abstrahlverhalten einer konkaven Membran

### Zusammenfassung

Die zweidimensionale Membrangeometrie kann als eine Menge von unendlich vielen Einzelschallquellen aufgefasst werden. Hierbei ist es wichtig, dass nur parallel ausgerichtete,

rechteckige Membranen zweidimensional bewertet und simuliert werden können. Für alle anderen Formen ist die Breite (bzw. Höhe) nicht über die gesamte Höhe (bzw. Breite) konstant, so dass ihre Richtwirkung abgeschwächt wird. Hier ist eine dreidimensionale Simulation notwendig.

Mit der dritten Dimension lässt sich die Richtwirkung weiter beeinflussen. Bezogen auf unendlich viele Einzelschallquellen entspricht das einer zeitlichen Verzögerung der äußeren bzw. inneren Schallquellen.

Was in der Betrachtung fehlt, ist das Aufbrechen der Membran ab einer gewissen Frequenz. Das unterstützen ABEC und AxiDriver nicht. Die Membranen werden immer als Kolbenschwinger simuliert. Der obere Frequenzbereich ist somit nur begrenzt auf reale Membranen anwendbar.

## Kammer mit Schlitz

Es ist möglich, die schallabstrahlende Fläche zu vergrößern, indem ein Objekt vor der Membran platziert wird, das größer ist als die Membran selbst. Rundherum wird ein Schlitz gelassen, durch den der Schall austreten kann. Die Richtwirkung erhöht sich dadurch deutlich. Allerdings treten auch analog zu der ringförmigen Membran Nebenkeulen und Resonanzen in der Kammer auf.

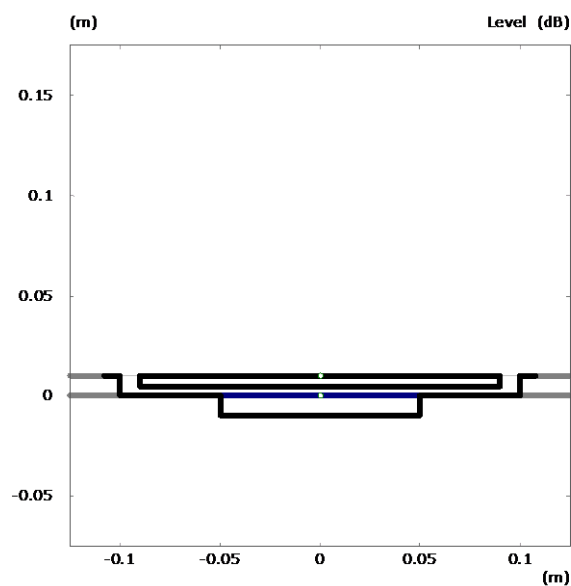


Abbildung 8: Kammer mit kreisförmigem Schlitz vor der Membran



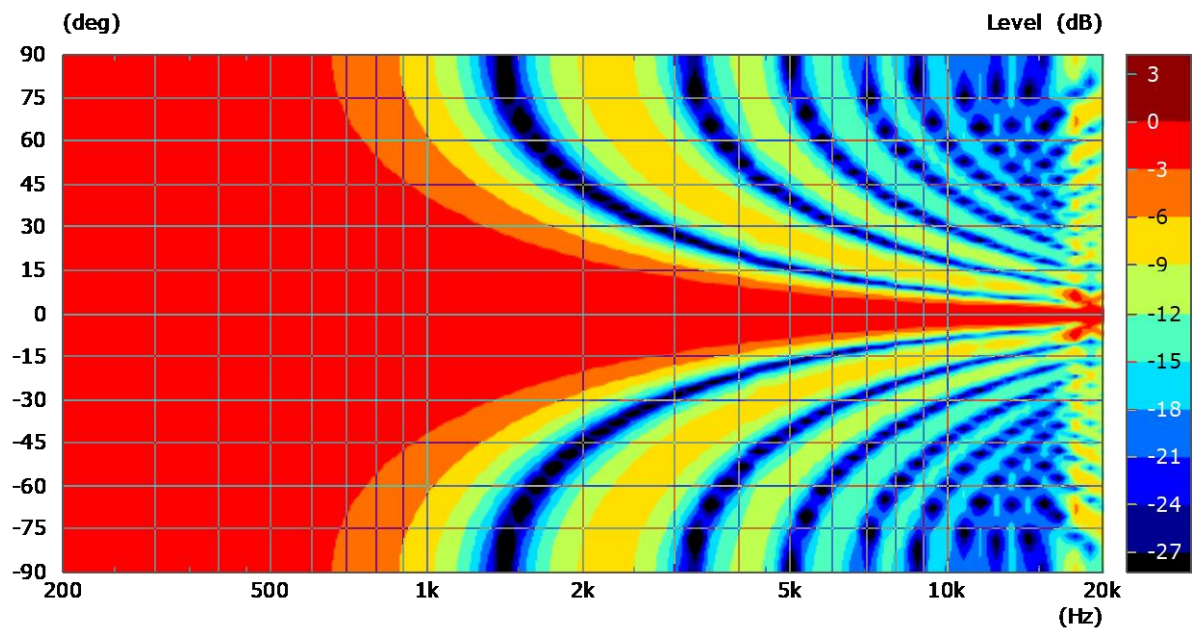


Abbildung 9: Abstrahlverhalten der Kammer mit Schlitz

# Interferenzen durch multiple Schallquellen

## Kohärente Schallquellen

### Allgemein

Sobald mindestens zwei *kohärente* Schallquellen aktiv sind, entstehen Interferenzen. Zwei Schallquellen erzeugen eine stetig zunehmende Richtwirkung ungefähr ab der Wellenlänge die einem Viertel ihres Abstandes zueinander liegt. Sobald die Wellenlänge in die Nähe des halben Abstands der Schallquellen kommt, entstehen Nebenkeulen. Je größer der Abstand der Schallquellen, desto früher setzt die Richtwirkung ein.

Das folgende Beispiel wurde mit zwei idealen Punktquellen und einem Abstand von 10 cm erstellt. Die erste Nebenkeule tritt also im Bereich von 3,4 kHz auf.

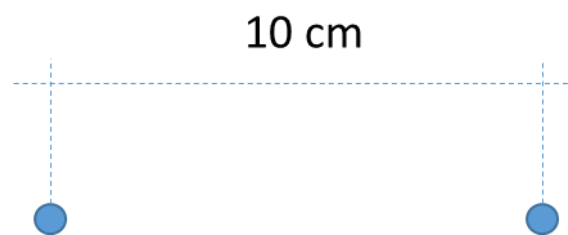


Abbildung 10: Zwei kohärente Schallquellen

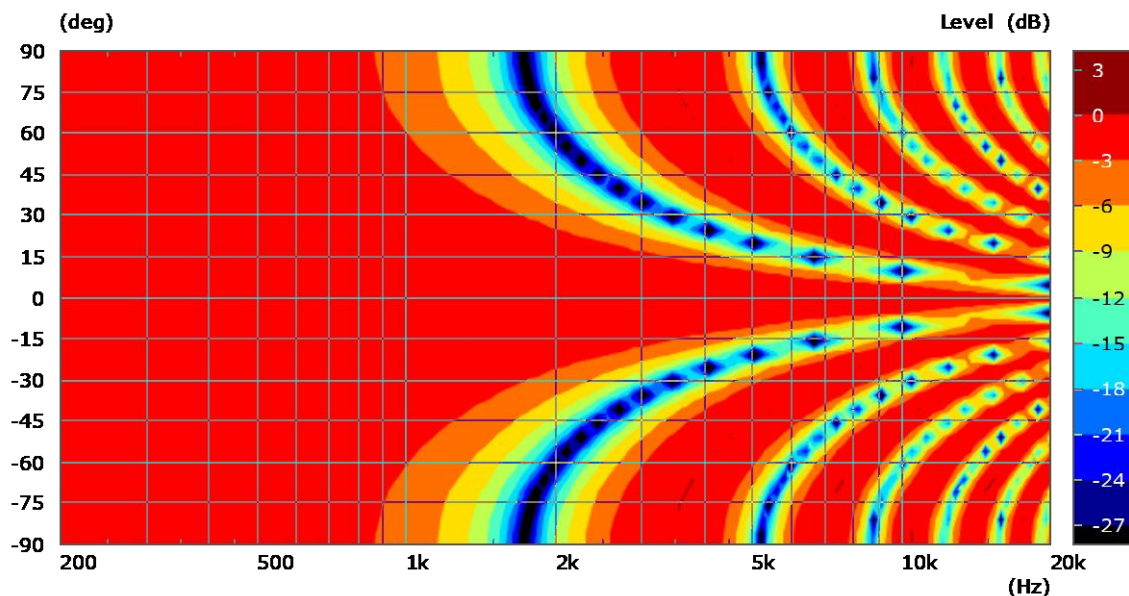


Abbildung 11: Abstrahlverhalten von zwei idealen Punktschallquellen

### Reduktion von Nebenkeulen

Nebenkeulen treten abgeschwächt auf, wenn die einzelnen Schallquellen selbst eine Richtwirkung aufweisen. Dies kann z.B. durch die Membrangröße oder durch ein Horn realisiert werden. Das folgende Beispiel zeigt die verringerten Nebenkeulen durch eine Richtwirkung zweier Einzelquellen.

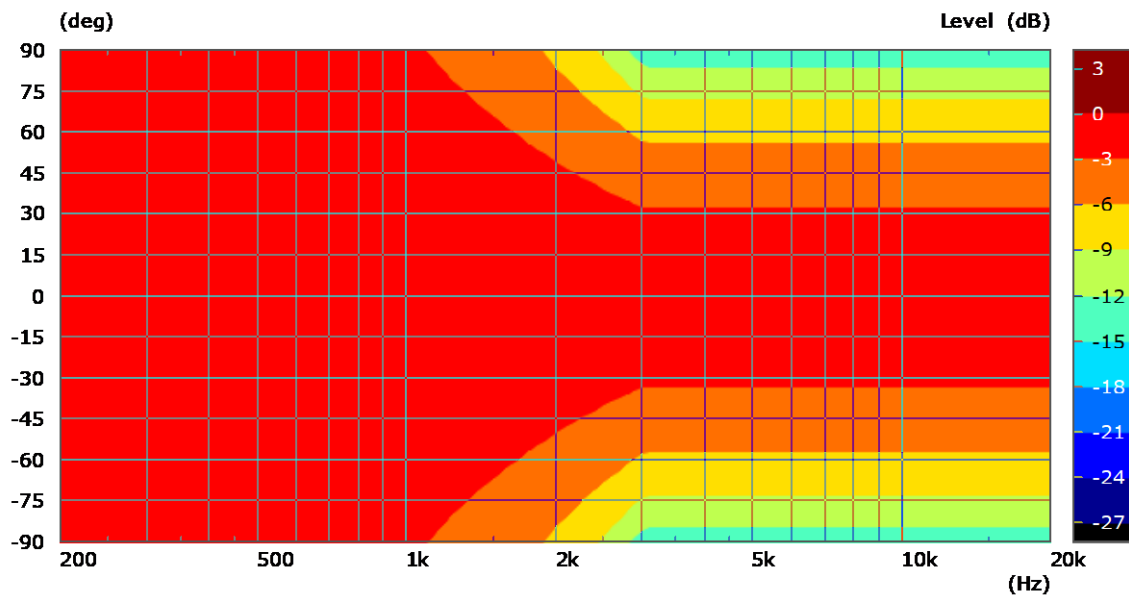


Abbildung 12: Abstrahlverhalten der einzelnen Schallquellen

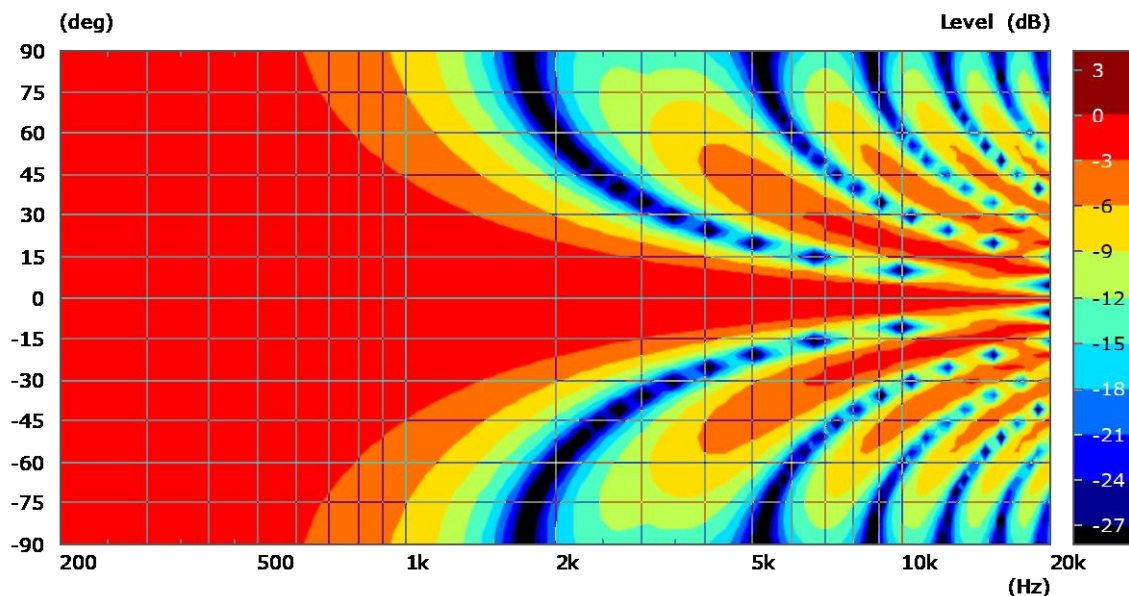


Abbildung 13: 2 Zwei Schallquellen mit Richtwirkung und verringerten Nebenkeulen

### Auswirkung der Stützstellen

Eine Erhöhung der Anzahl an Schallquellen bei gleichbleibender Gesamtlänge der Anordnung erzeugt keine höhere Richtwirkung, sondern eine Verschiebung der Nebenkeulen im Frequenzbereich. Die zusätzlichen Schallquellen lassen die Richtwirkung allerdings bei einer etwas höheren Frequenz einsetzen. Es entsteht ein Linienstrahler, dessen Schalldruckpegel abhängig von Länge und Frequenz mit 3 dB pro Entfernungsverdopplung abnimmt [3].

In folgendem Beispiel wurde der Gesamtabstand nicht verändert und zusätzlich zwei weitere Schallquellen äquidistant zwischen die beiden vorhandenen eingefügt. Das reduziert den Abstand zweier benachbarter Schallquellen auf ein Drittel zum vorherigen Beispiel. Dadurch setzt die

Richtwirkung nun erst bei 1,2 kHz ein und die Nebenkeulen werden von 3,4 kHz auf 10,2 kHz verschoben (also um den Faktor 3).

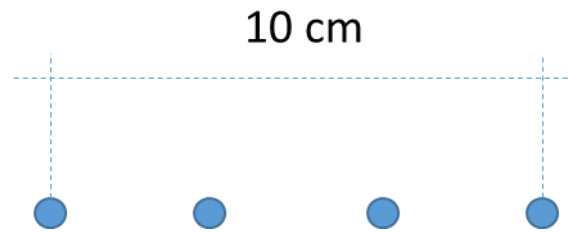


Abbildung 14: Vier äquidistante kohärente Schallquellen

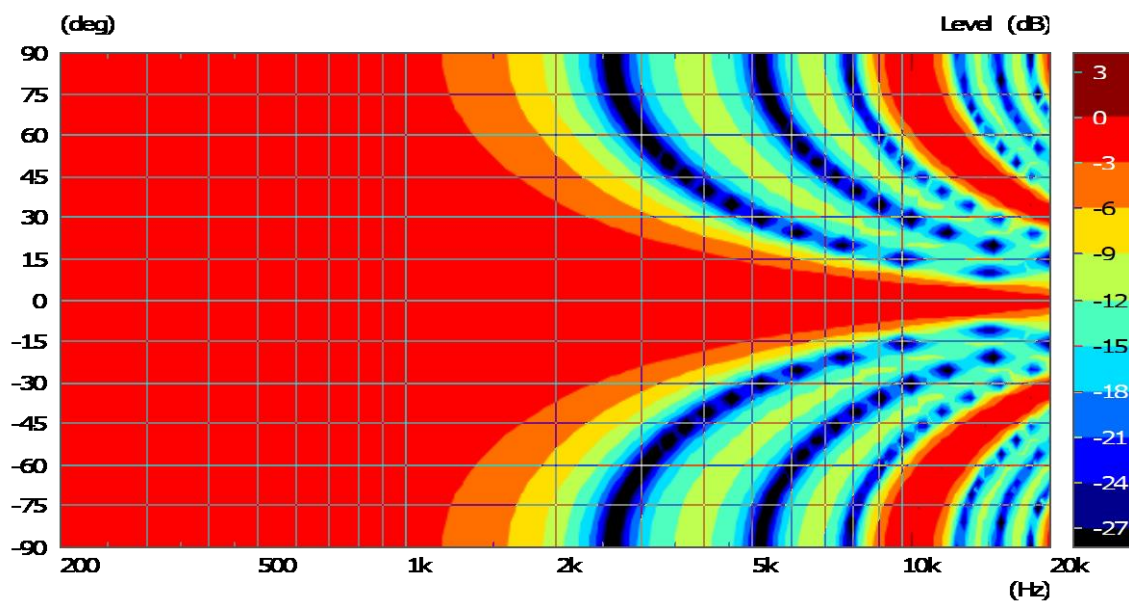


Abbildung 15; Abstrahlverhalten von vier idealen Punktschallquellen mit Gesamtlänge 10 cm

### Mehrwegger nach Horbach und Keele

Horbach und Keele haben gezeigt [1], dass mit kohärenten Treiberpärchen mit einem bestimmten Abstand und speziellen FIR-Filtern ein nahezu konstantes Abstrahlverhalten erzeugt werden kann, wenn genug Wege eingesetzt werden. Dabei ist jedes Treiberpärchen nur in einem engen Frequenzbereich aktiv und überlagert seine mit der Frequenz ansteigende Richtwirkung mit dem nächst kleineren Zweig, der dort weniger stark richtet. In der Summe bleibt die Richtwirkung somit nahezu konstant.

Voraussetzung ist, dass die Abstände der Treiber einem bestimmten Muster folgen und die eingesetzten Filterfunktionen einer speziellen, asymmetrischen Form folgen (linearphasige Subtraktionsfilter).

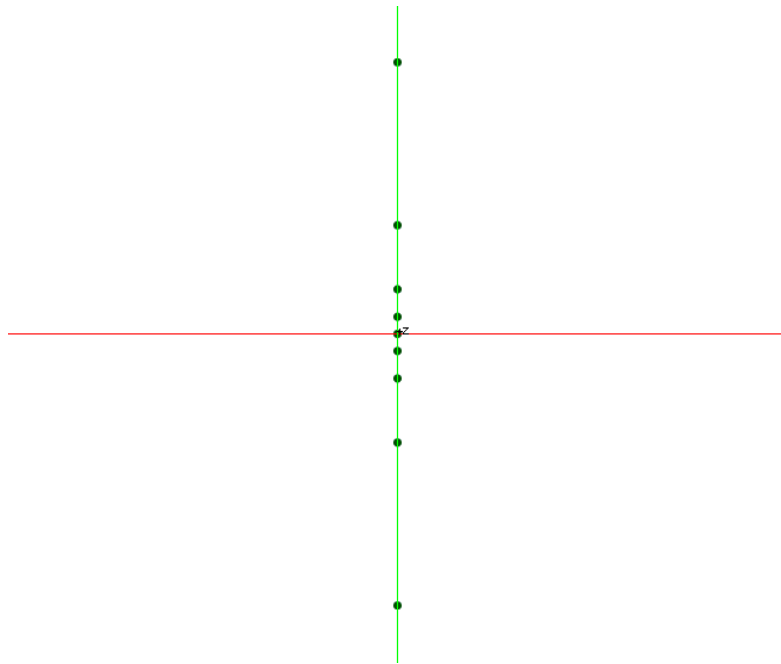


Abbildung 16: Kohärente Treiberpaaren als Mehrweger nach Horbach und Keele

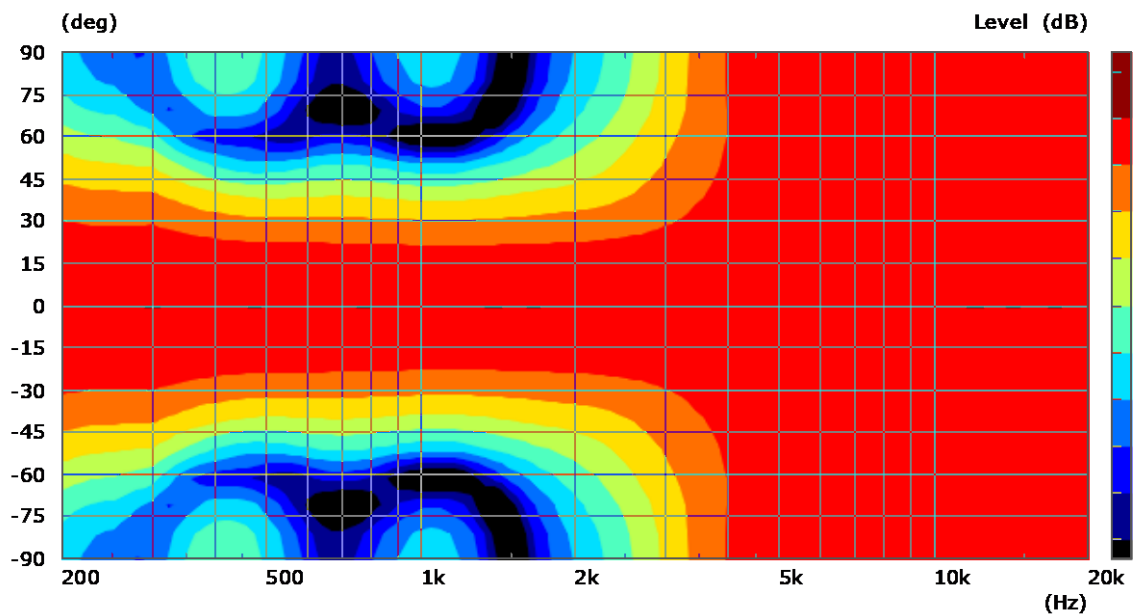


Abbildung 17: Vertikales Abstrahlverhalten des Mehrwegers

Der Hochtöner in der Mitte besitzt Prinzip bedingt keinen Partner und erzeugt somit keine ausreichende Richtwirkung, was die starke Aufweitung ab ca. 3 kHz erklärt. Der Hochtöner muss die Richtwirkung also auf andere Weise erzeugen (z.B. durch eine vertikal ausgedehnte Membran oder durch ein Horn).

## Inkohärente Schallquellen

Multiple Schallquellen können sich in ihrer Polarität, Pegel und Laufzeit unterscheiden. Da die Möglichkeiten sehr komplex und nahezu unbegrenzt sind, sollen nur einige Beispiele gezeigt werden.

### Dipol

Der Dipol besteht aus zwei benachbarten Schallquellen, die zueinander eine invertierte Polarität aufweisen. Im einfachsten Fall kann er durch einen Treiber ohne Gehäuse realisiert werden. Er erzeugt zwar eine Richtwirkung durch die Auslöschung des invertierten rückwärtigen Schalls, allerdings nur an den Seiten im Bereich von  $90^\circ$ . Das Abstrahlverhalten ist vorne und hinten symmetrisch (Achtercharakteristik). Weiterhin sorgt die Auslöschung dafür, dass der Schalldruckpegel unterhalb der Frequenz, deren Wellenlänge der Laufzeitdifferenz der beiden Schallquellen entspricht, mit 6 dB/Oktave fällt. Dadurch ist der Dipol im Bassbereich sehr ineffizient.

Das folgende Beispiel wurde mit idealen Punktquellen und ohne Gehäuse simuliert. In einem realen Gehäuse setzt der Dipoleffekt nicht mehr ein, wenn die Wellenlänge klein gegen die Gehäusebreite- bzw. Höhe wird.

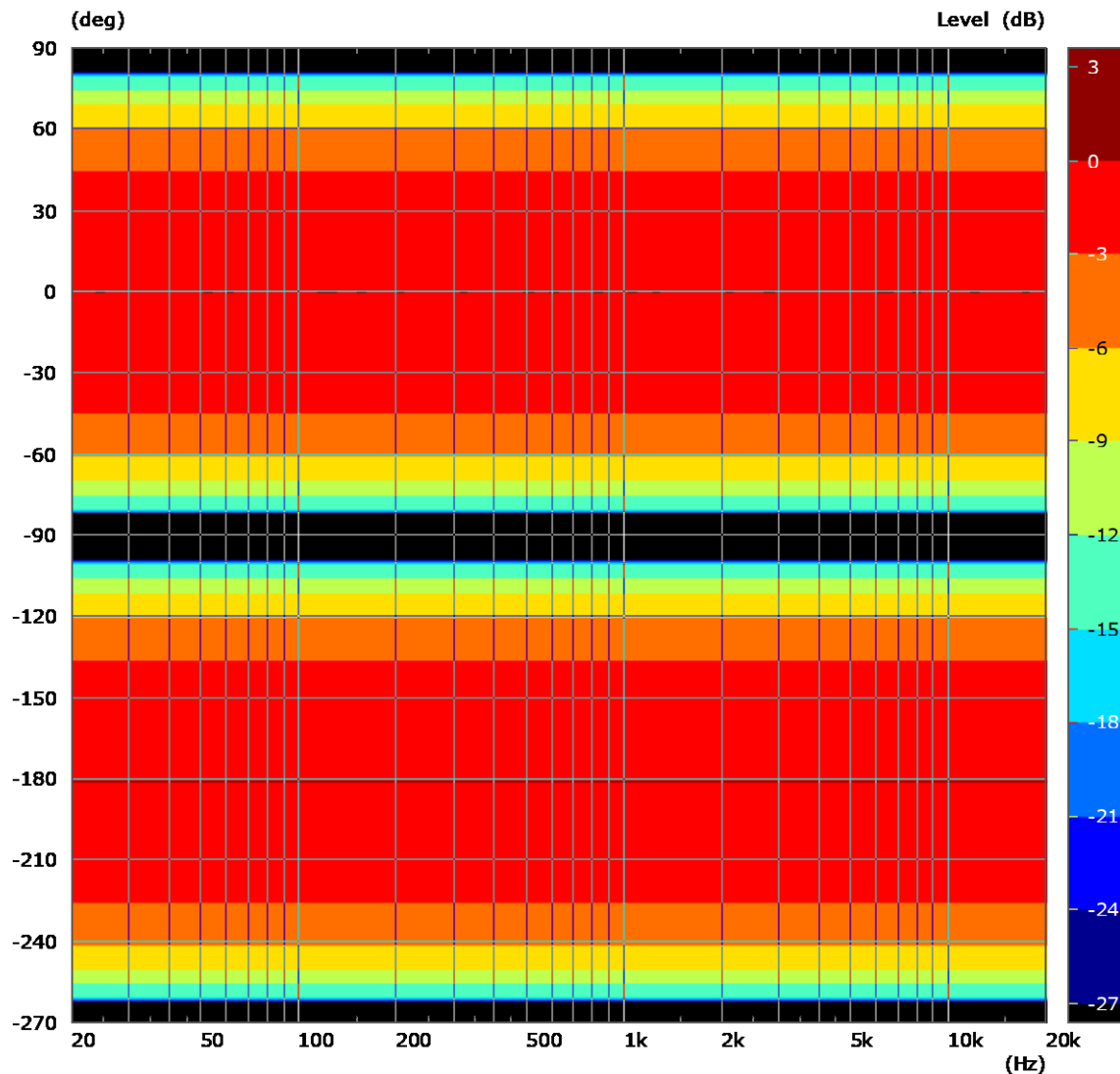


Abbildung 18: Abstrahlverhalten eines idealen Dipols

## Kardioide

Mit zwei im Gehäuse gegenüber platzierten Treibern lässt sich ein kardioides Abstrahlverhalten (Nierencharakteristik) erzeugen. Dafür muss der hintere Treiber invertiert und um die Laufzeit, die der Schall für die Beugung um das Gehäuse benötigt, verzögert werden. Die Richtwirkung beschränkt sich auf die hintere Hemisphäre, die bei 180° den geringsten Schalldruckpegel aufweist.

Das folgende Beispiel zeigt das Abstrahlverhalten eines idealen Kardioiden mit einer rückwärtigen Dämpfung von 30 dB.

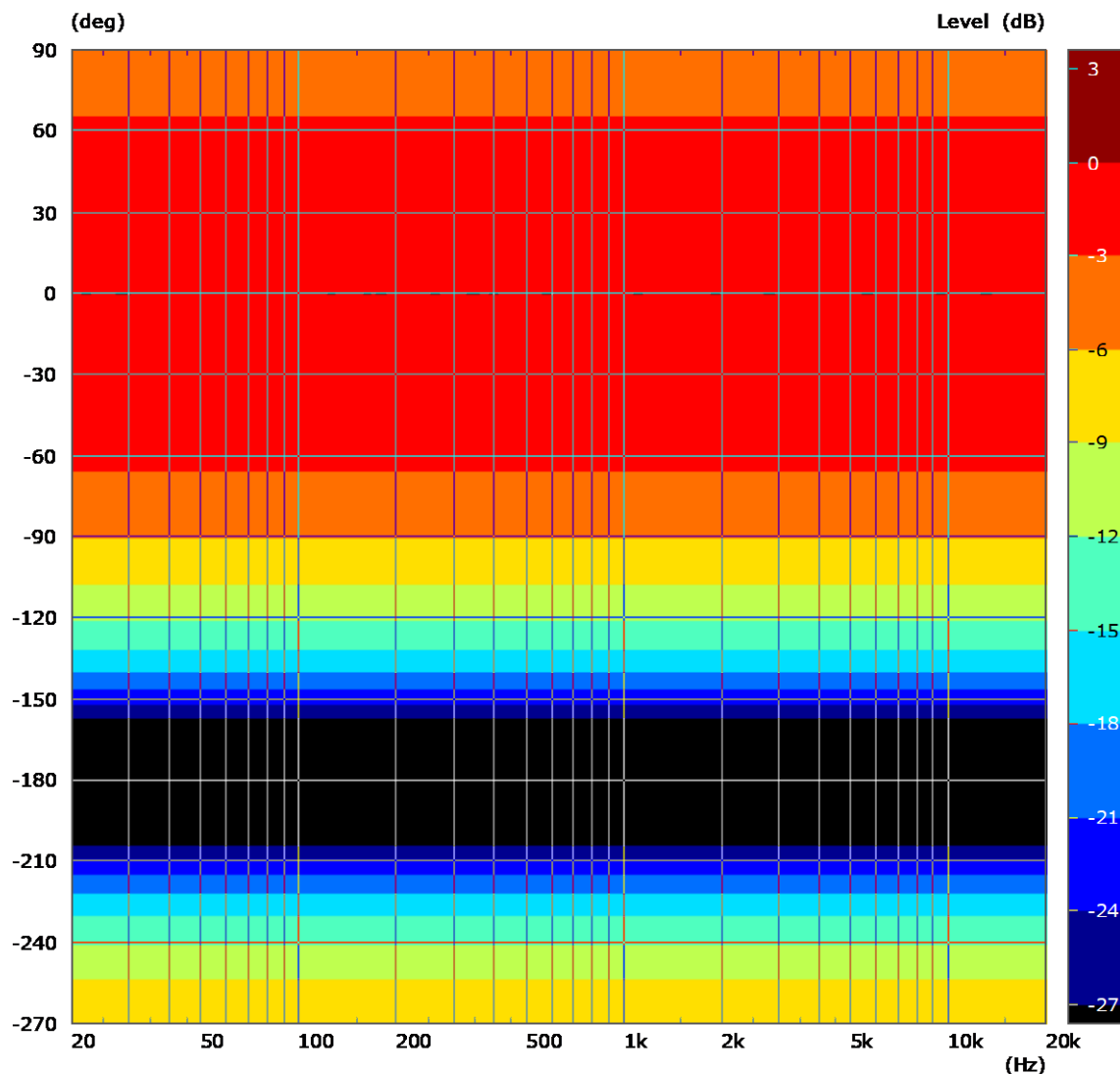


Abbildung 19: Abstrahlverhalten eines idealen Kardioiden

## Constant Beamwidth Transducer (CBT)

Neben diversen kardioiden Abstrahlungen gibt es auch komplexere Möglichkeiten, das Abstrahlverhalten zu beeinflussen. Beim sogenannten Beamforming wird die Wellenfront durch mehrere Schallquellen, die sich in Laufzeit und Pegel unterscheiden, geformt. Als Beispiel sei hier der Constant Beam Width Transducer (CBT) von Keele [2] genannt, der durch eine vertikale Anordnung von versetzten und im Pegel angepassten Treibern identischer Größe ein nahezu konstantes

Abstrahlverhalten erzeugt. Die Stärke der Richtwirkung kann dabei in relativ großen Grenzen parametrisiert werden. Es kommt das Legendre Shading zum Einsatz.

Im Gegensatz zu Linienstrahlern mit kohärenten Schallquellen nimmt der Schalldruckpegel einer CBT mit 6 dB pro Entfernungsverdopplung ab.

Eine CBT funktioniert nur bis zu der Frequenz bis zu der keine Nebenkeulen auftreten. Das heißt, die Treiber sollten möglichst klein sein. Als weiterer Nachteil sei die hohe Anzahl an notwendigen Treibern genannt. Im Folgenden wurde als Abstand zwischen den Schallquellen von 4 cm gewählt, was in der Realität durchaus erreicht werden kann.

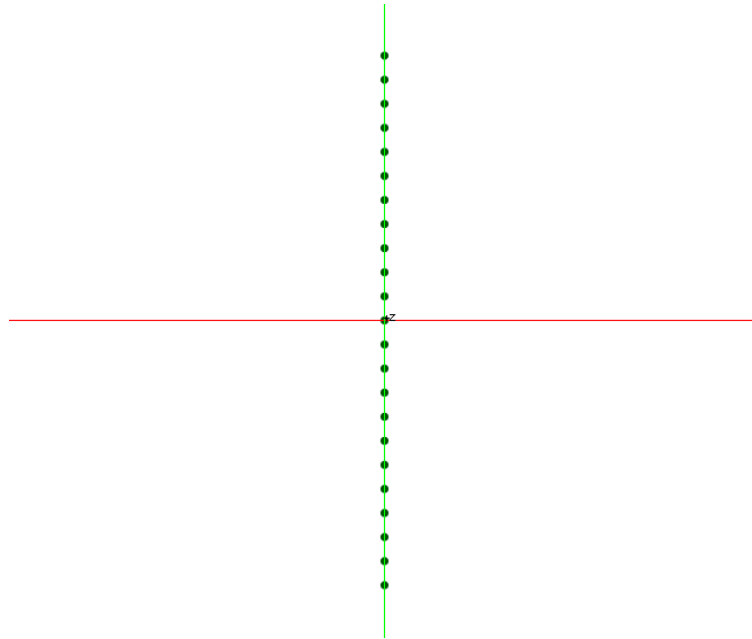


Abbildung 20: CBT aus idealen Punktschallquellen mit 4 cm Abstand

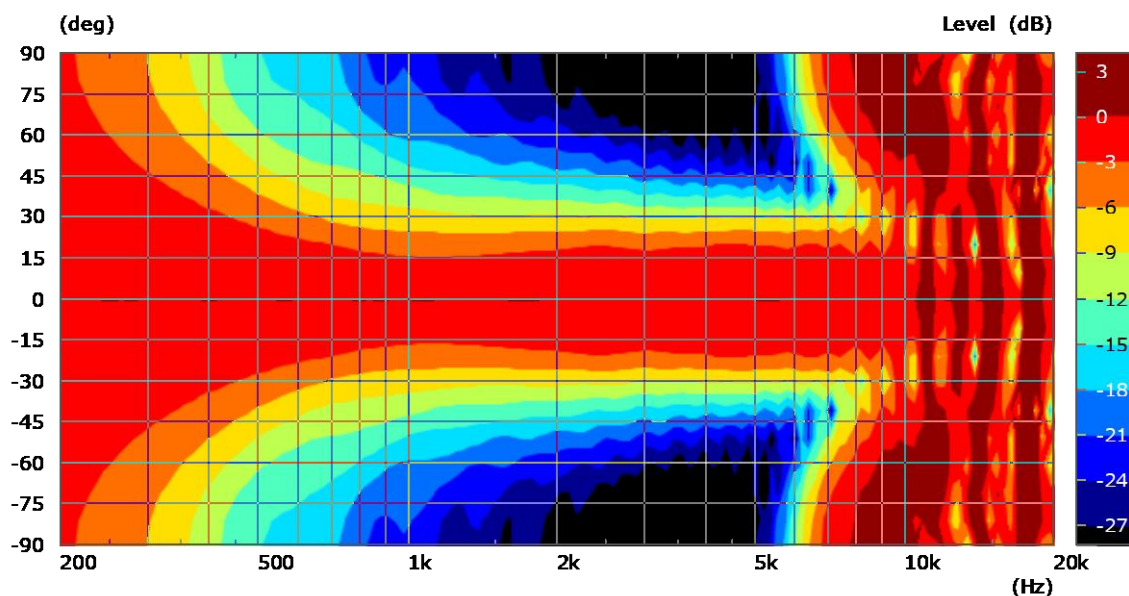


Abbildung 21: Vertikales Abstrahlverhalten der CBT mit 4 cm Abstand zwischen den Schallquellen



## Gehäuse

### Baffle Step

Das Gehäuse, in dem der Treiber verbaut ist, erzeugt abhängig von seinen Maßen eine Richtwirkung, indem es den Schall nach hinten abschattet. Das funktioniert nur ab Wellenlängen, die klein gegen die Gehäusemaße sind und somit nicht um das Gehäuse gebeugt werden.

Die Richtwirkung durch Abschattung ist auf die hintere Hemisphäre begrenzt. Ein Wandeinbau erzeugt somit dieselbe Wirkung, allerdings für den gesamten Frequenzbereich. Beim Wandeinbau wird nur in der vorderen Hemisphäre Schall abgestrahlt. Der Schalldruck steigt unter  $0^\circ$  maximal um 6 dB und dementsprechend auch das Bündelungsmaß. Bei endlich großen Gehäusen tritt im Bereich, in dem die Wellenlänge ähnlich groß wie die Gehäusedimensionen ist, der so genannte Baffle Step ein. Er markiert die fließende Grenze zwischen Vollraum- und Halbraumstrahler.

Das folgende Beispiel zeigt den Vergleich zwischen einem Kugelgehäuse mit 10 cm Durchmesser und einem mit 20 cm Durchmesser. Der Durchmesser des Treibers beträgt jeweils nur 8 mm. Durch das Kugelgehäuse entstehen keinerlei Kantendiffraktionen. Es schattet lediglich den Schall nach hinten hin ab.

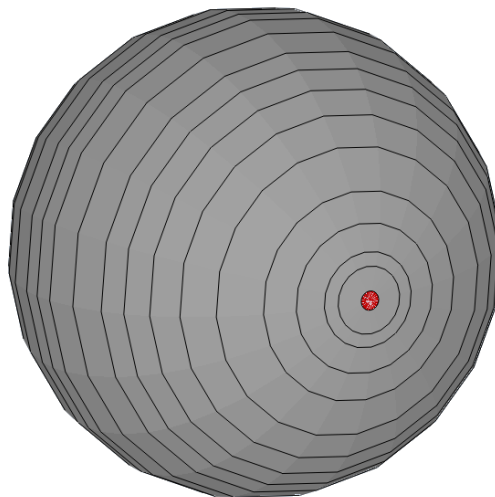


Abbildung 22: Kugelgehäuse

Die Beispiele zeigen, dass die Verdopplung des Durchmessers den Übergangsbereich der Beugung im Frequenzbereich um den Faktor zwei nach unten verschiebt.

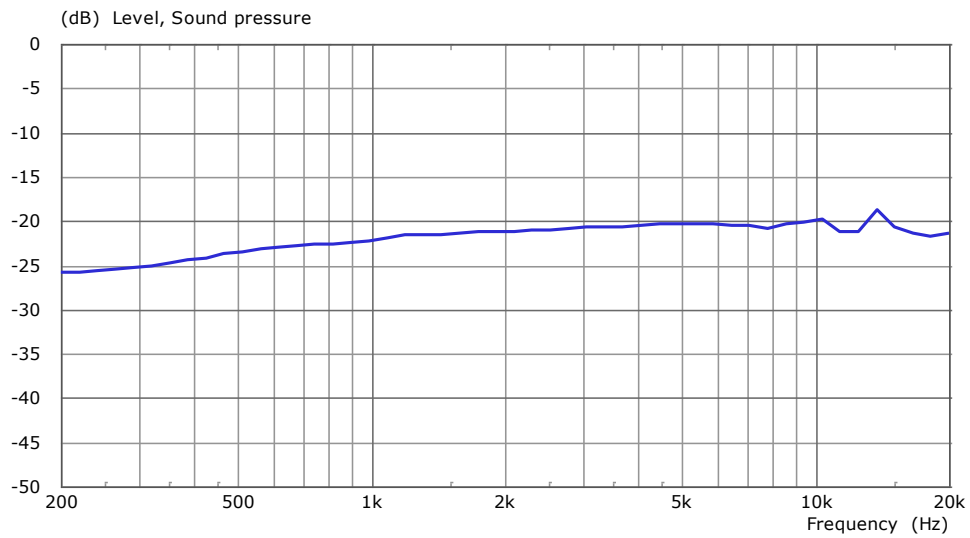


Abbildung 23: Amplitudengang unter 0° mit sanftem Baffle Step der 20 cm Kugel

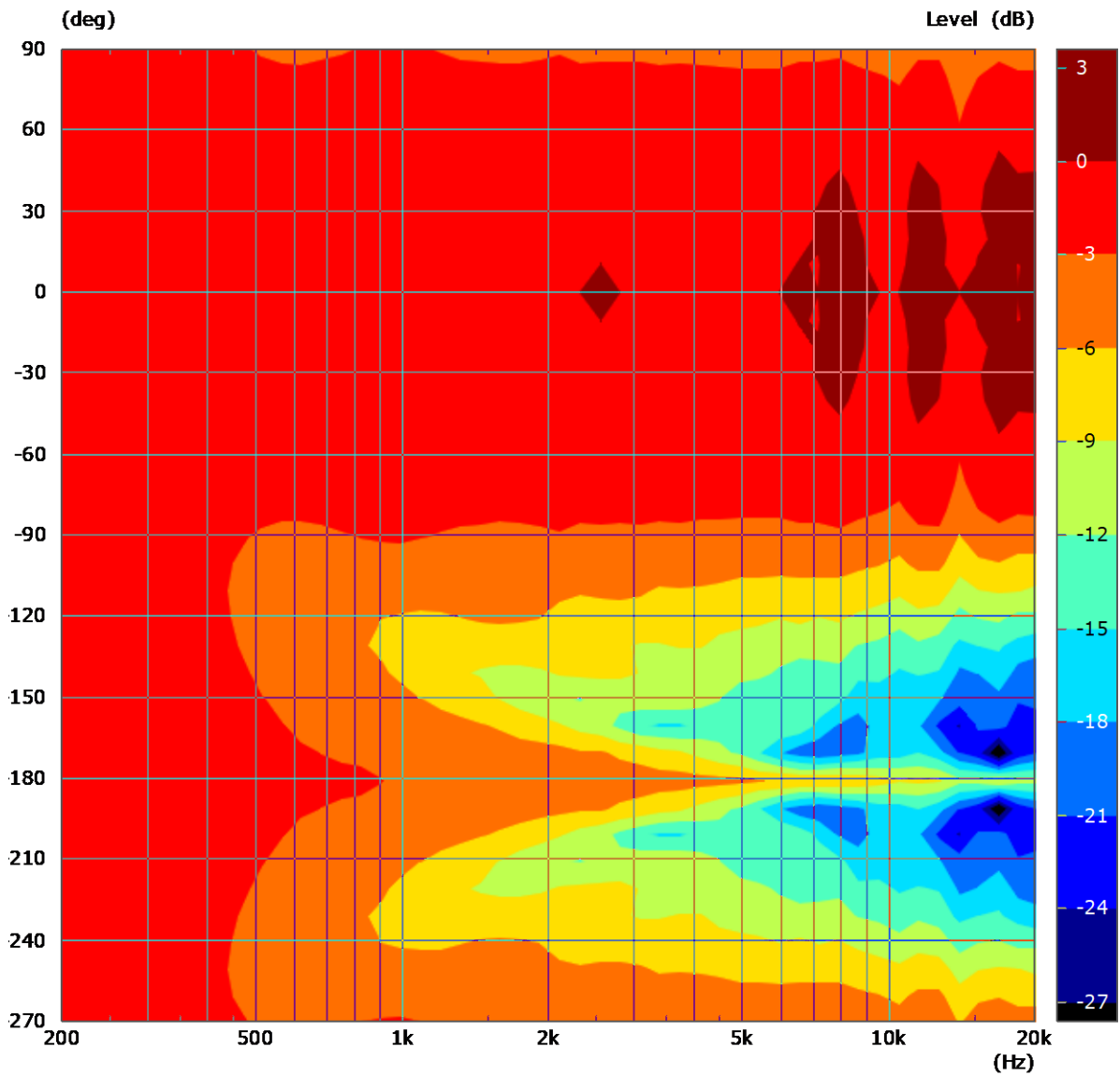


Abbildung 24: Rückwärtige Abschattung durch ein Kugelgehäuse mit 20 cm Durchmesser

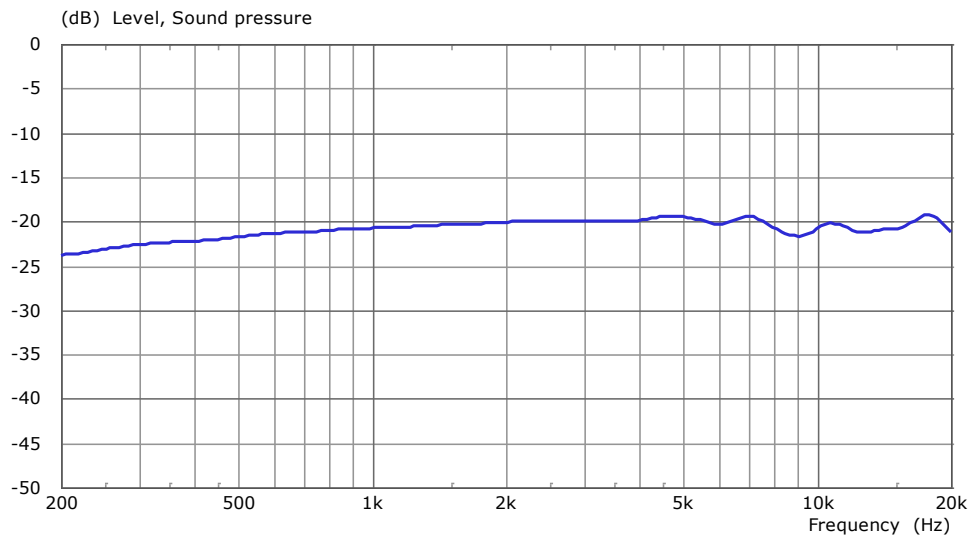


Abbildung 25: Amplitudengang unter 0° mit sanftem Baffle Step der 40 cm Kugel

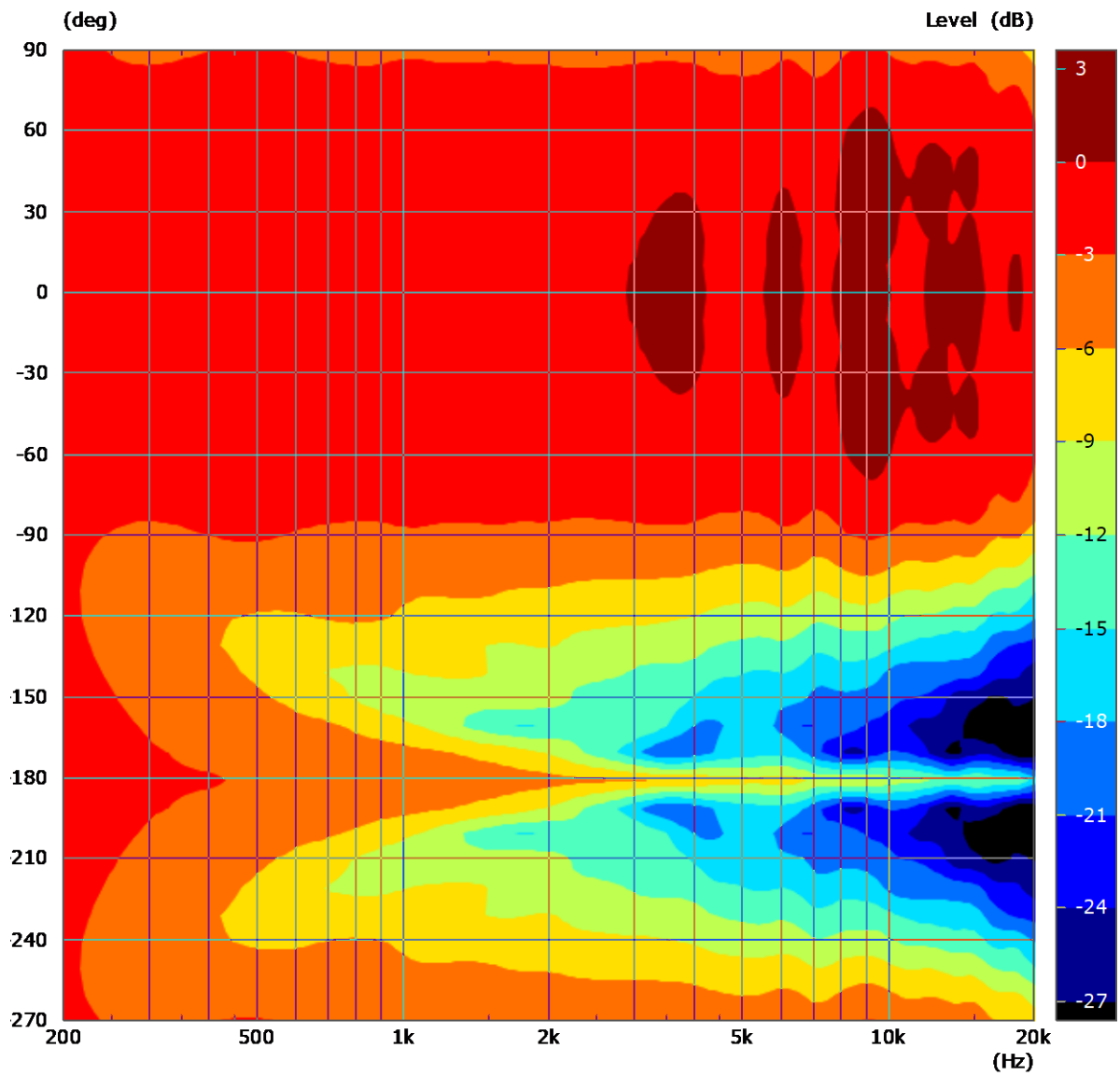


Abbildung 26: Rückwärtige Abschattung durch ein Kugelgehäuse mit 40 cm Durchmesser

## Kantendiffraktionen

Weiterhin entstehen durch harte Kanten an der Schallwand Sekundärschallquellen, die mit dem Direktschall interferieren. Diese Kantendiffraktionen erzeugen eine zusätzliche Verengung der Richtwirkung in dem Bereich der halben Wellenlänge, die dem Abstand zwischen Treiber und Kante entspricht. Bei der ganzen Wellenlänge kommt es zu einer Aufweitung. Auch hierbei kann zwischen horizontal und vertikal unterschieden werden, wenn sich Höhe und Breite der Schallwand unterscheiden.

Im Folgenden wurde ein Zylindergehäuse mit harten Kanten simuliert. Die kreisrunde Schallwand in Kombination mit dem mittig platzierten Treiber erzeugt rotationssymmetrisch dieselben Kantendiffraktionen.

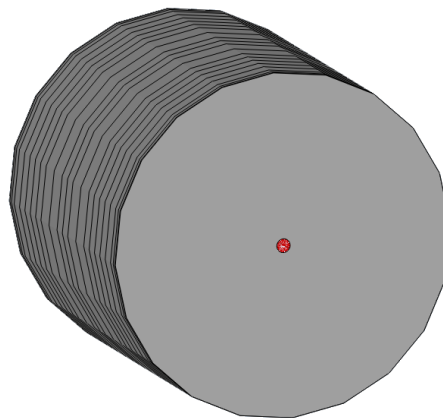


Abbildung 27: Zylindergehäuse

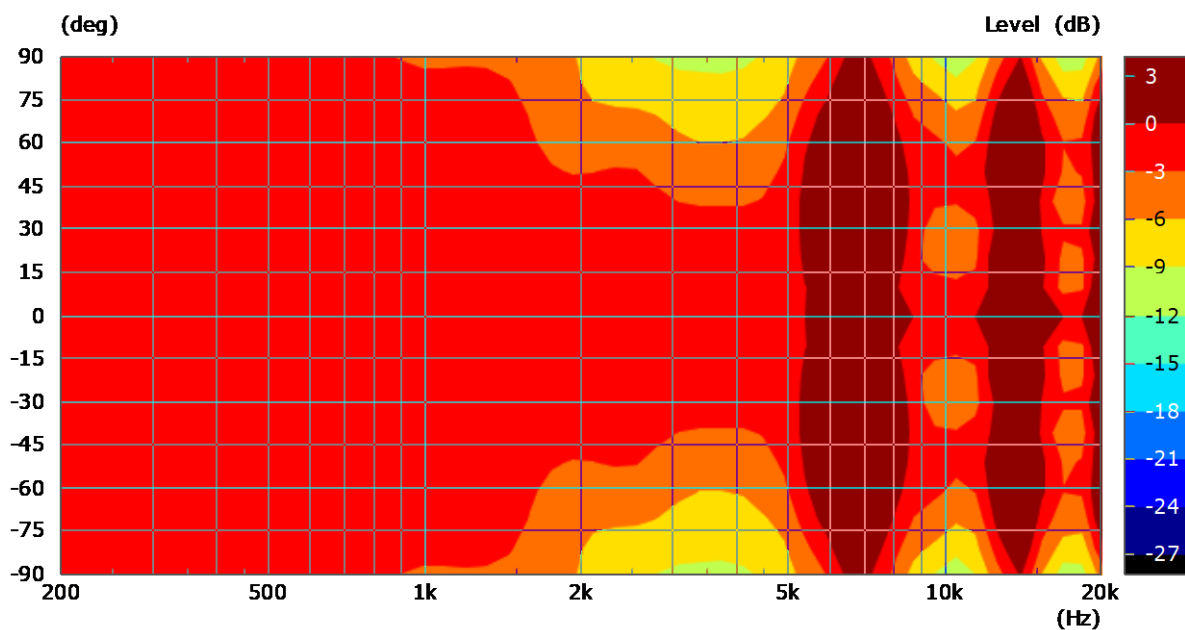


Abbildung 28: Abstrahlverhalten einer kreisrunden Schallwand mit 10 cm Durchmesser

Eine Verdopplung des Durchmessers der Schallwand schiebt das Interferenzmuster im Frequenzbereich um Faktor zwei nach unten.

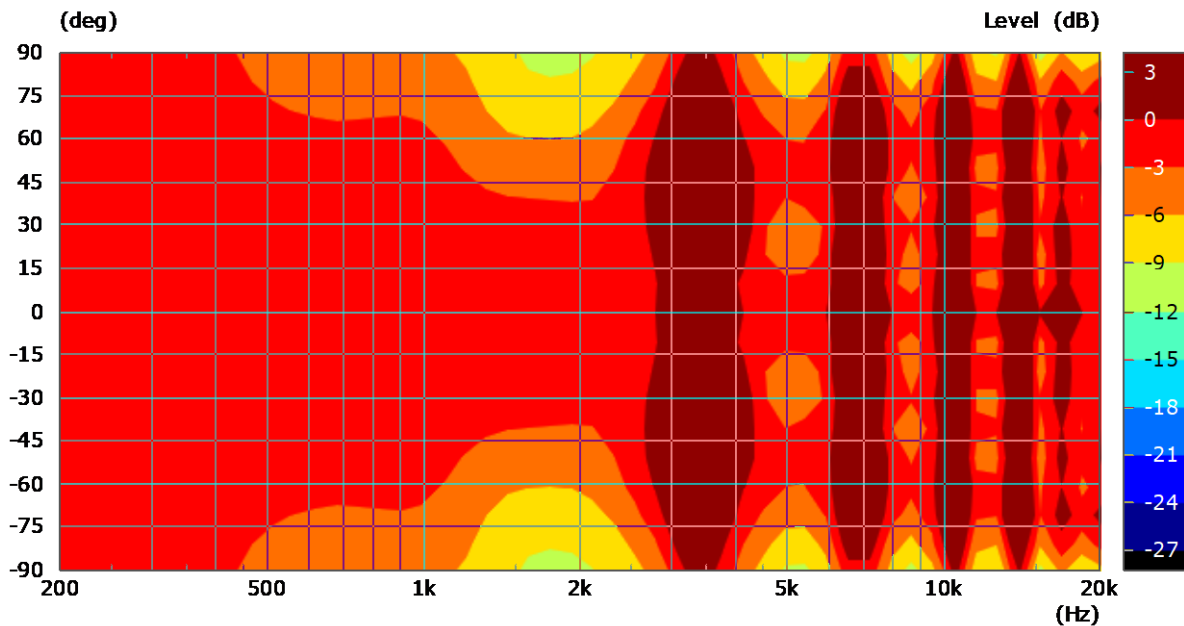


Abbildung 29: Abstrahlverhalten einer kreisrunden Schallwand mit 20 cm Durchmesser

Die Kantendiffraktionen sorgen dafür, dass der Amplitudengang unter  $0^\circ$  von Interferenzmustern geprägt ist. Es ergeben sich Einbrüche und Überhöhungen mit maximal  $\pm 3$  dB. In der Praxis wird daher häufig angestrebt, alle Kantendiffraktionen durch eine geschickte Gestaltung der Schallwandform und Treiberplatzierung möglichst auf verschiedene Frequenzbereiche zu verteilen.

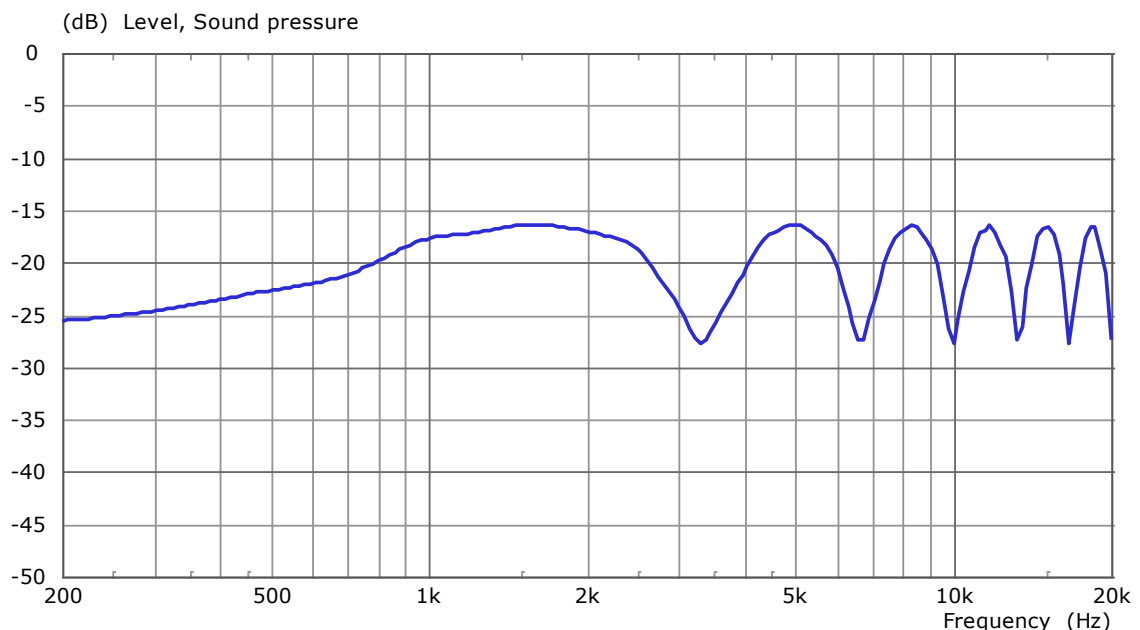


Abbildung 30: Interferenzmuster unter  $0^\circ$  durch Kantendiffraktionen

Die Kantendiffraktionen können nur eine Richtwirkung entfalten, wenn das Gehäuse freisteht. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass ein Wandeinbau diese Richtwirkung komplett aufhebt.

Weiterhin ist die Stärke der Richtwirkung auf einen minimalen Abstrahlwinkel von ca.  $120^\circ$  ( $-6$  dB) begrenzt. Es ist nicht möglich, das Abstrahlverhalten mit diesem Wirkprinzip beliebig eng zu gestalten.

## Hörner / Waveguides

### Allgemein

Hörner erzeugen eine Richtwirkung, indem sie den Schall welle durch einen sich stetig öffnende Schallführung leiten. Dies erzeugt eine echte *Bündelung*, da der Schalldruckpegel unter 0° gegenüber dem nackten Treiber angehoben wird. Der Schall, der sonst zur Seite abgestrahlt werden würde, wird somit nach vorne gerichtet. Allerdings kann ein Horn die Richtwirkung bei hohen Frequenzen auch verbreitern, was dann den Schalldruckpegel unter 0° verringert.

Im Folgenden ist beispielhaft die Verstärkung bzw. Abschwächung des Schalldrucks unter 0° zu sehen, der durch einen Waveguide mit dem Abstrahlwinkel (-6 dB) von ca. 100° erzeugt wird. Bis ca. 12 kHz tritt eine Verstärkung ein, darüber eine Abschwächung. Das heißt, dass der Waveguide über 12 kHz nicht mehr bündelt, sondern *aufweitet*. So lässt sich ein nahezu konstantes Abstrahlverhalten über einen sehr großen Frequenzbereich realisieren.

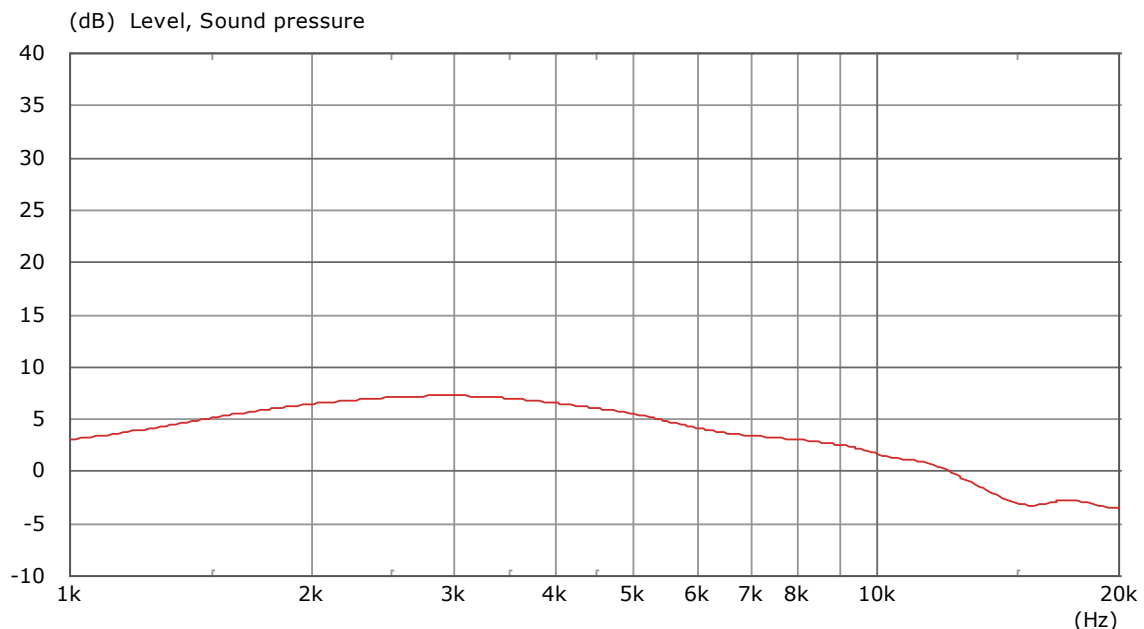


Abbildung 31: Verstärkung/Abschwächung des Schalldruckpegels unter 0° durch einen Waveguide (normiert)

Um ausschließlich die Richtwirkung des Horns zu beurteilen, muss es in eine unendliche Schallwand eingebaut werden. Andernfalls würde sich die Richtwirkung durch die Beugung am Hornkorpus mit der der Schallführung vermischen. Leider werden Messungen von realen Hörnern praktisch immer ohne Schallwand durchgeführt, so dass die Richtwirkung der Schallführung in der Praxis kaum isoliert beurteilt werden kann.

Die Kontur bestimmt die frequenzabhängige Richtwirkung. Im groben gilt die Regel: je steiler der Verlauf der Schallführung, desto stärker die Richtwirkung. Das folgende Beispiel zeigt ein kleines Horn mit dem Abstrahlwinkel (-6 dB) von ca. 60°. Simuliert wurde ein idealisierter 1“-Kolbenstrahler, der in der Praxis meist durch einen Kompressionstreiber ersetzt wird.

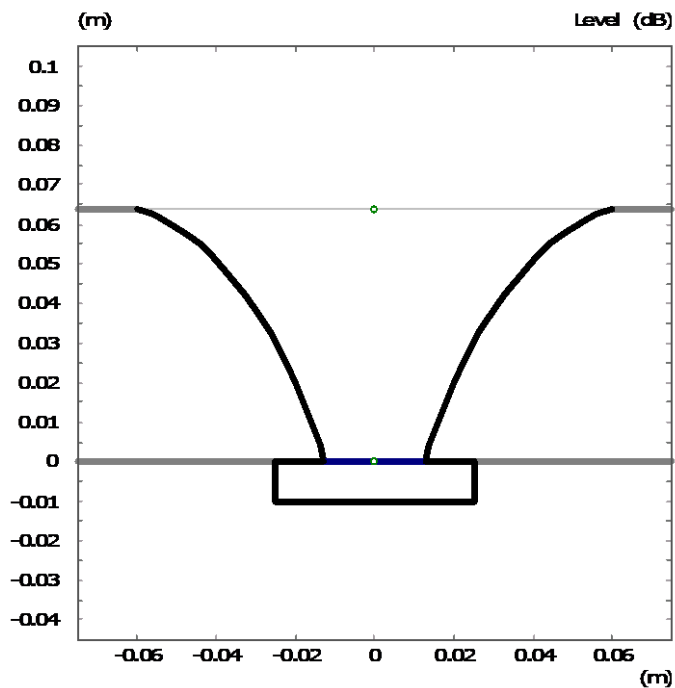


Abbildung 32: Hornkontur

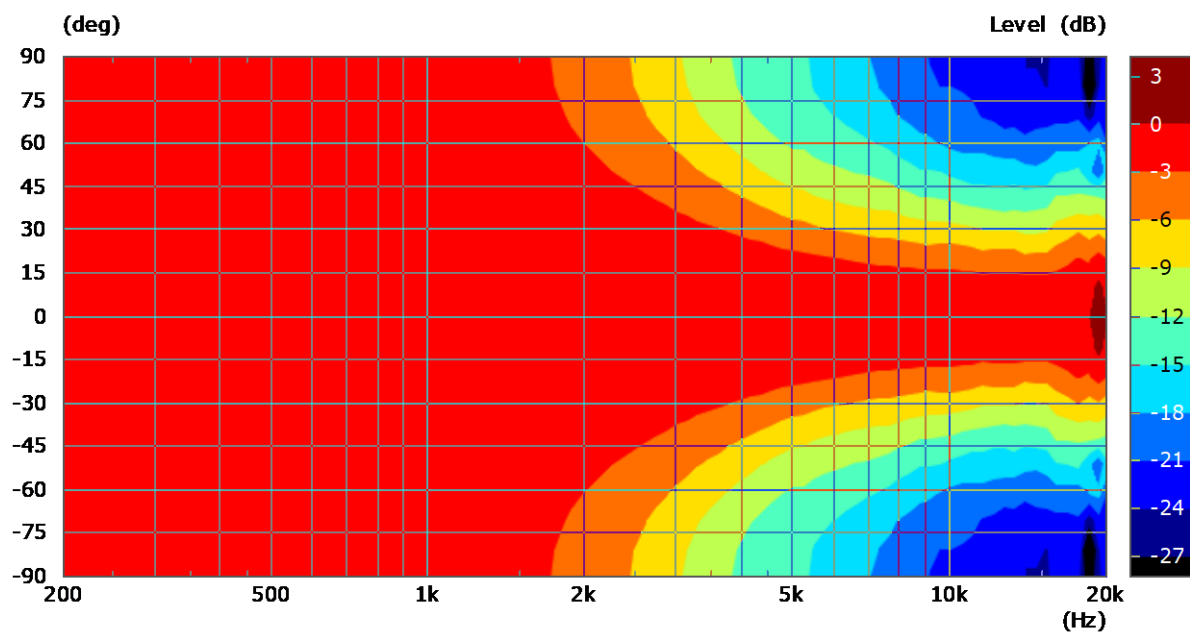


Abbildung 33: Abstrahlverhalten eines rotationssymmetrischen Horns in unendlicher Schallwand

### Einfluss der Horntiefe

Die Tiefe des Horns bestimmt maßgeblich die Steigung des Verlaufs. Das bedeutet, dass eine Verringerung der Tiefe eine Verbreiterung der Richtwirkung nach sich zieht und umgekehrt. Im Folgenden wurde die Tiefe auf die Hälfte der Tiefe des vorherigen Beispiels reduziert.

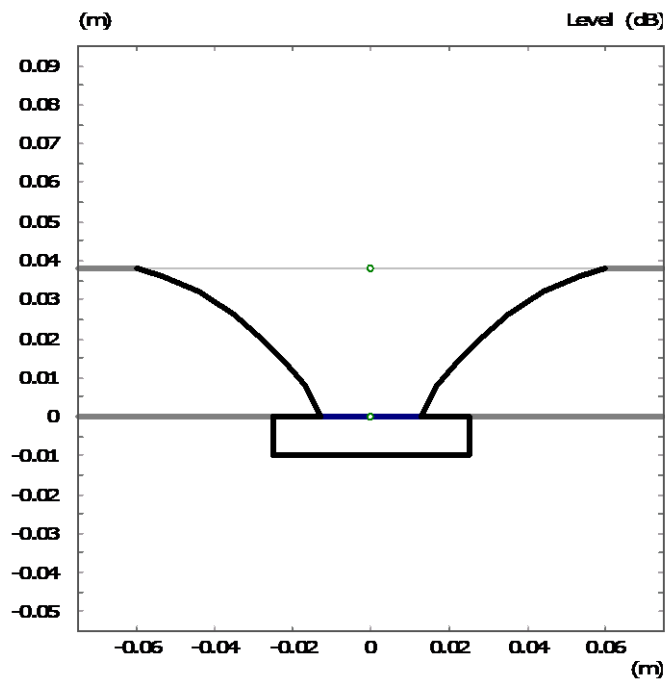


Abbildung 34: Horn mit halbierter Tiefe

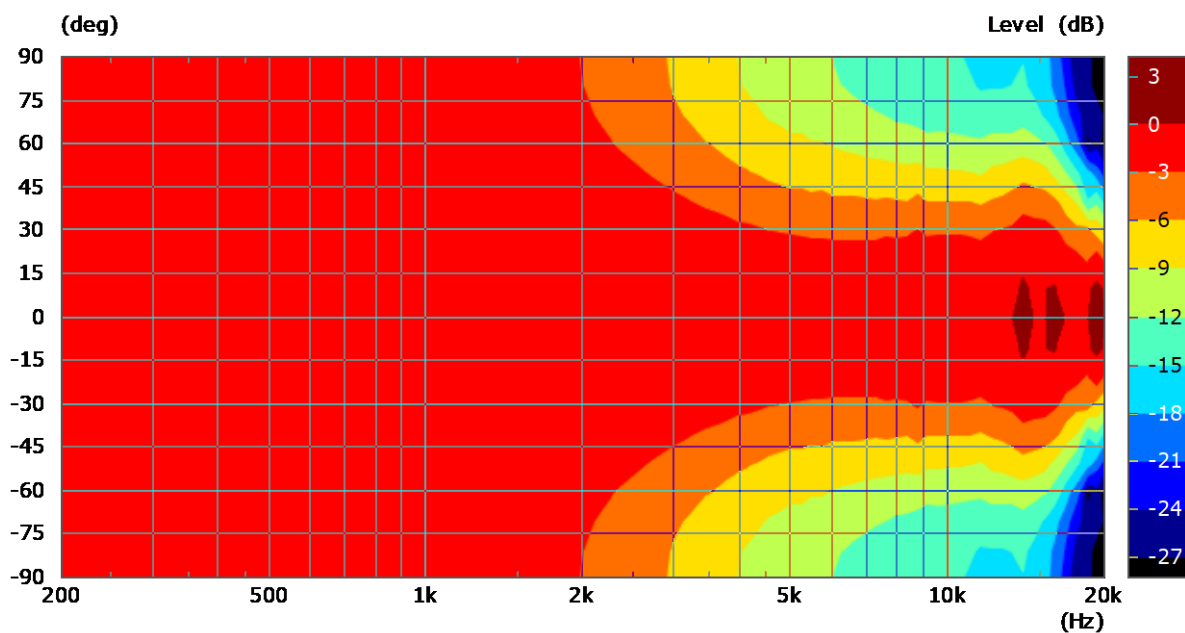


Abbildung 35: Abstrahlverhalten des Horns mit halbierter Tiefe

### Einfluss des Munddurchmessers

Als *Mund* wird die große Öffnung bezeichnet, an der sich nicht der Treiber befindet. Der Durchmesser des Mundes ist maßgeblich für die untere Grenzfrequenz der Richtwirkung verantwortlich. Je größer der Durchmesser in einer Dimension, desto früher beginnt dort die Richtwirkung.

Das folgende Beispiel zeigt eine Verdopplung des Munddurchmessers im Vergleich zu dem ersten Beispiel. Da dies gleichzeitig eine Verringerung der Steilheit bewirkt, verbreitert sich die Richtwirkung analog zur Halbierung der Tiefe. Zusätzlich sinkt die untere Grenzfrequenz.



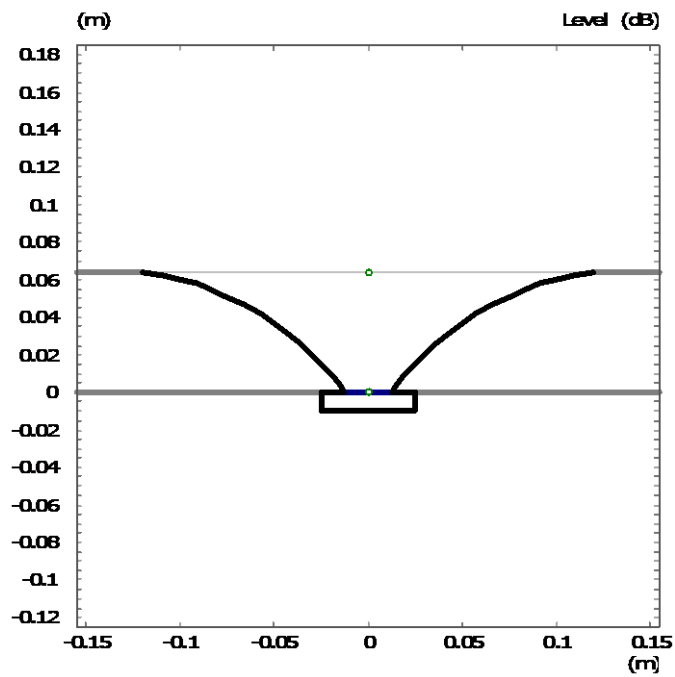


Abbildung 36: Horn mit verdoppeltem Munddurchmesser

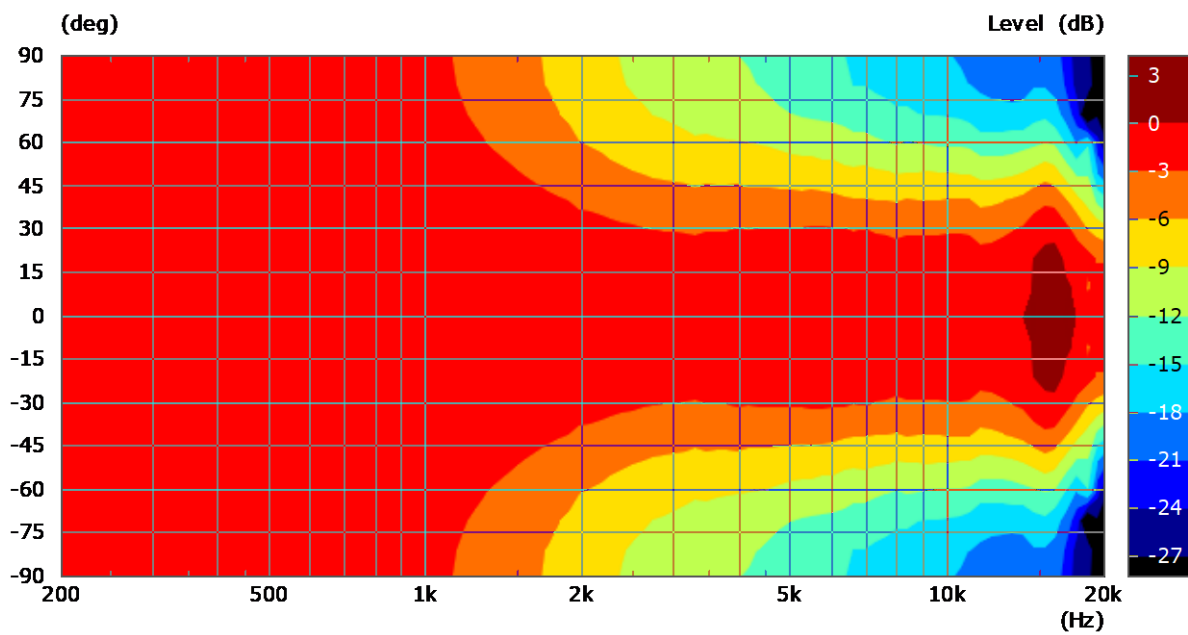


Abbildung 37: Abstrahlverhalten des Horns mit verdoppeltem Munddurchmesser

## Zusammenfassung

Folgende Tabelle stellt die grundlegenden Eigenschaften der verschiedenen Wirkprinzipien gegenüber. In der Spalte *Schalldruck unter 0°* wird die Wirkung jeweils mit einem idealen Kugelstrahler verglichen.

	<b>Richtwirkung</b>	<b>Frequenzabhängigkeit</b>	<b>Schalldruck (0°)</b>
<b>Membrangröße</b>	stark, mittel (realer Konus)	stetig ansteigend	-
<b>Kammer mit Schlitz</b>	sehr stark	stetig ansteigend, schwache Nebenkeulen und Resonanzen	durch Resonanzen sehr unstetig
<b>Kohärente Schallquellen</b>	sehr stark	stetig ansteigend, Nebenkeulen, konstant über Mehrweger möglich	Addition aller Einzelquellen
<b>Inkohärente Schallquellen</b>	beliebig	beliebig (konstant möglich)	variabel
<b>Abschattung durch Gehäuse</b>	begrenzt auf vordere Hemisphäre	gering (Baffle Step)	Verstärkung (3 dB)
<b>Kantendiffraktionen</b>	gering	stark	Verstärkung / Abschwächung
<b>Horn / Waveguide</b>	beliebig	beliebig (konstant möglich)	Verstärkung / Abschwächung

## Kombinationen anhand praktischer Beispiele

Die verschiedenen Arten, Richtwirkung zu erzeugen, lassen sich beinahe beliebig kombinieren. Hier sind einige praktische Beispiele.

### Freistehendes Horn

Im Folgenden wird gezeigt, wie sich das Richtverhalten durch die Beugung am Gehäuse und das der Schallführung überlagern. In unendlicher Schallwand bündelt die Schallführung erst ab ca. 2 kHz. Die Beugung am Hornkorpus erzeugt eine (schwächere) Richtwirkung ab ca. 1 kHz.

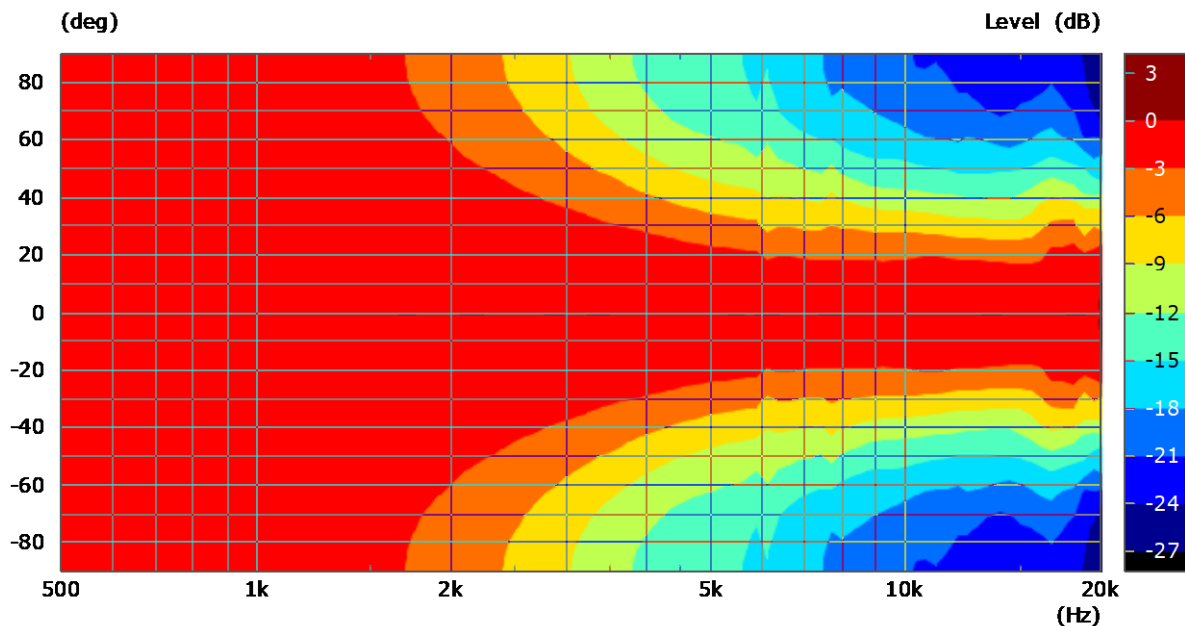


Abbildung 38: Horn in unendlicher Schallwand mit der Mundfläche von 12 x 12 cm

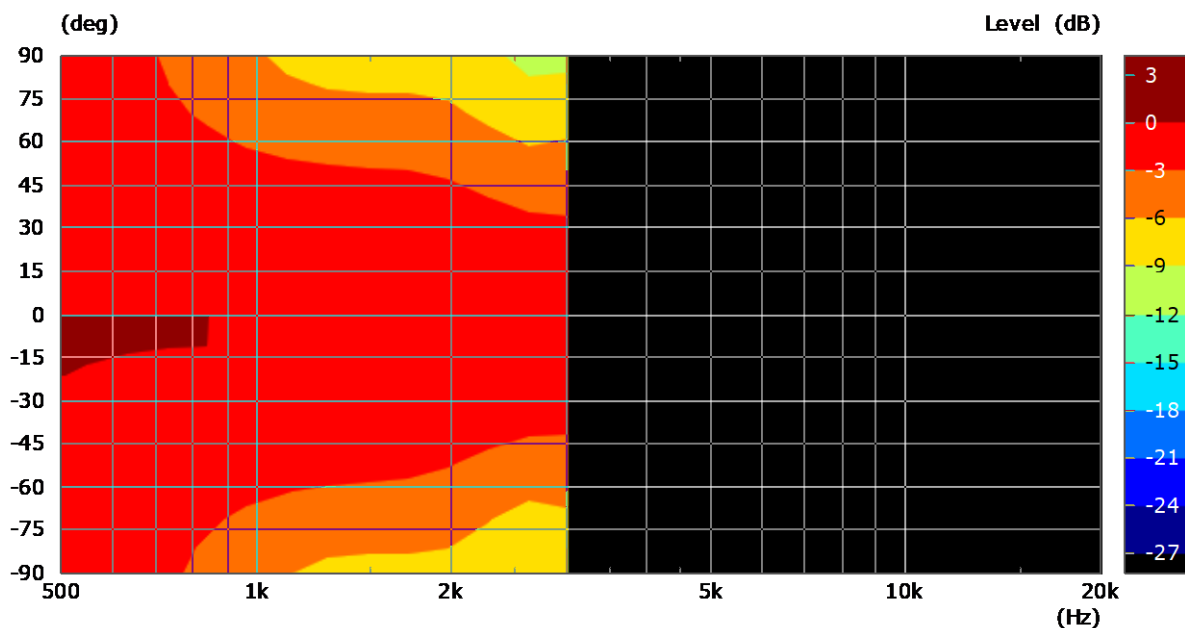


Abbildung 39: Abstrahlverhalten eines 3 cm tiefen Gehäuses mit den Schallwandmaßen 12 x 12 cm

Die folgende Messung wurde an einem realen Horn erzeugt, das mittels eines 3D-Druckers erstellt wurde. Es ist gut zu erkennen, dass die Beugung am Horngehäuse die Richtwirkung im Frequenzbereich nach unten hin erweitert. Beide Wirkprinzipien überlagern sich.



Abbildung 40: 3D-Druck des simulierten Horns

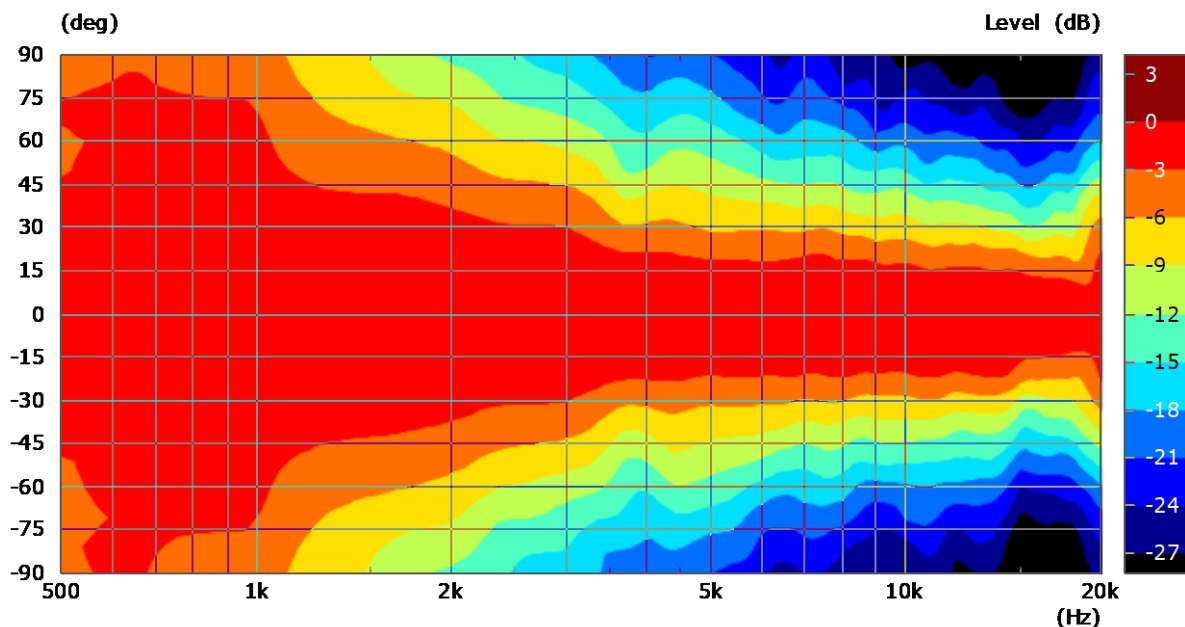


Abbildung 41: Messung des freistehenden Horns

## Großer Flächenstrahler

Große Flächenstrahler nutzen vor allem zwei Wirkprinzipien, um eine Richtwirkung zu erzeugen. Zum einen ist es die große Fläche und zum anderen die Dipolcharakteristik durch die offene Rückseite des Lautsprechers. Die Simulation wurde nur bis 6 kHz durchgeführt, da die Rechenzeit sonst zu lang gewesen wäre.

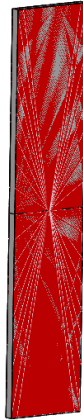


Abbildung 42: Großer Flächenstrahler als Dipol (140 x 30 cm)

Hier zunächst das horizontale Abstrahlverhalten ohne die Rückseite. Es überlagern sich die Beugung durch das Gehäuse und die Richtwirkung der 30 cm breiten Membran.

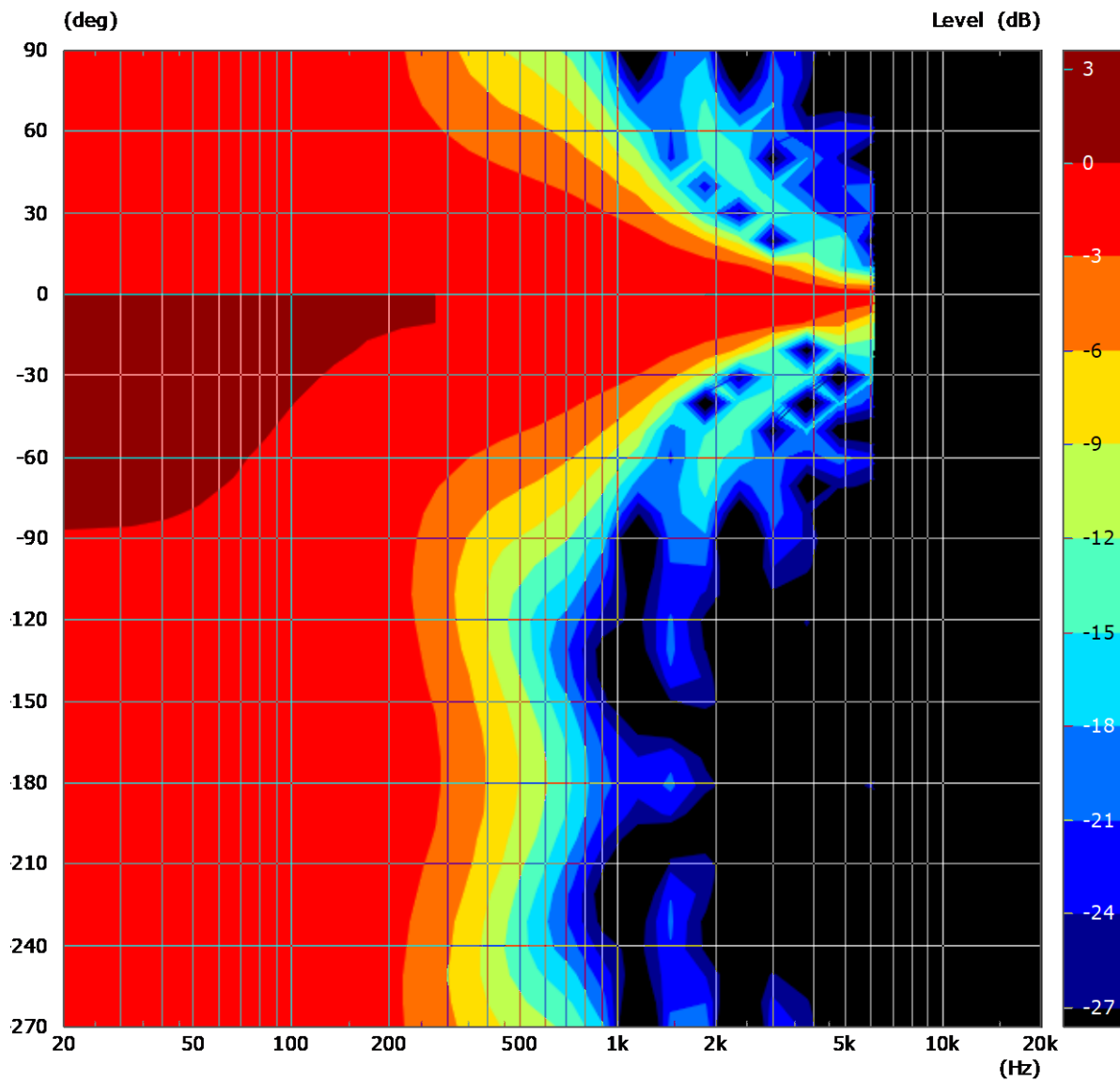


Abbildung 43: Horizontales Abstrahlverhalten als Monopol

Wird die Rückseite invertiert abstrahlend hinzugefügt, so stellt sich die Dipolcharakteristik ein. Weiterhin wird der durch die Membrangröße richtende Frequenzbereich zusätzlich invertiert nach hinten abgestrahlt.

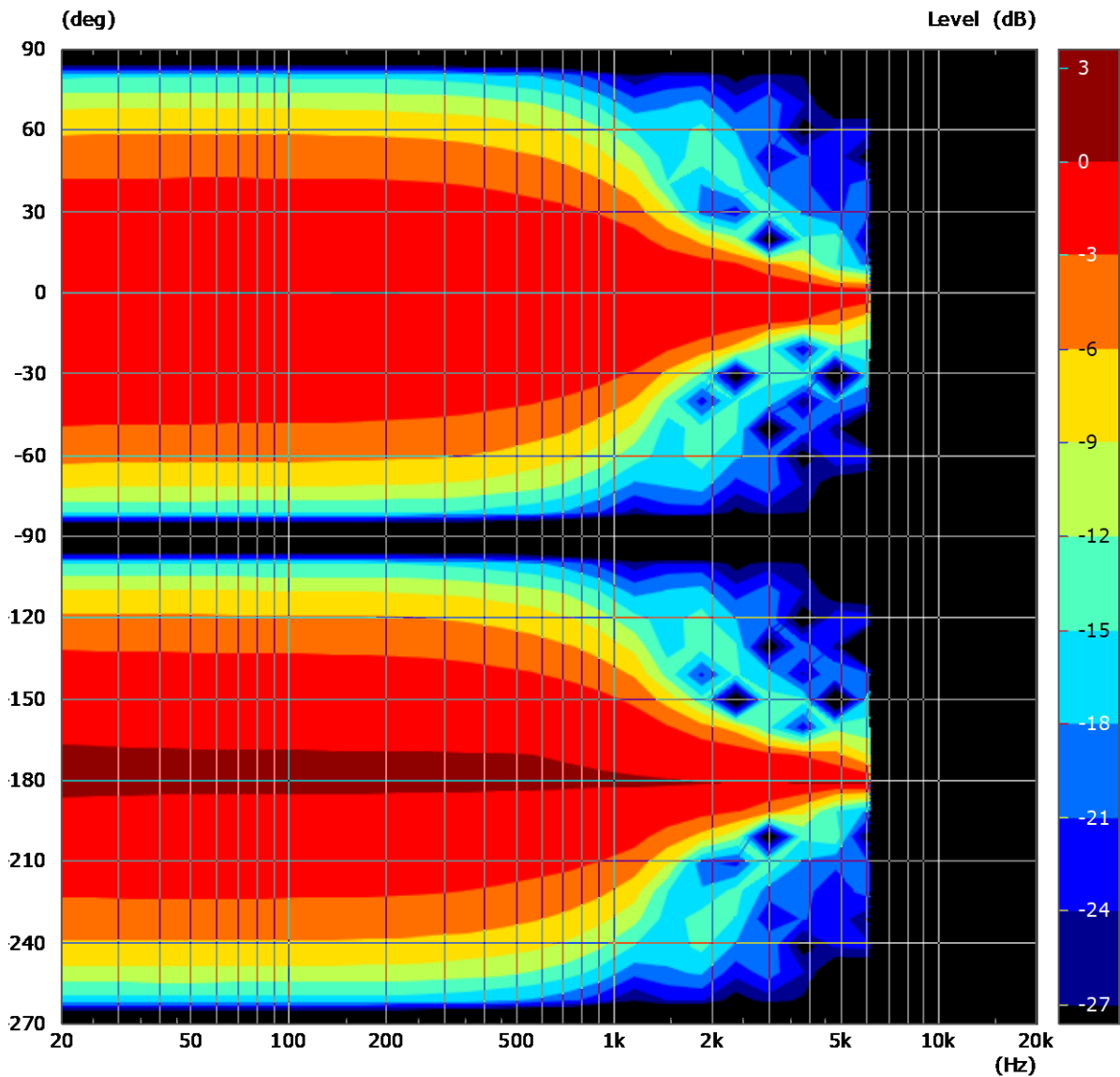


Abbildung 44: Horizontales Abstrahlverhalten als Dipol

## Kardioider Subwoofer

Das folgende Beispiel zeigt einen Subwoofer mit einer 30-cm-Membran, der ein kardioides Abstrahlverhalten durch einen zweiten Treiber auf der Rückseite erzeugt. Dieser Treiber wird mit einem verzögerten und invertierten Signal angesteuert.

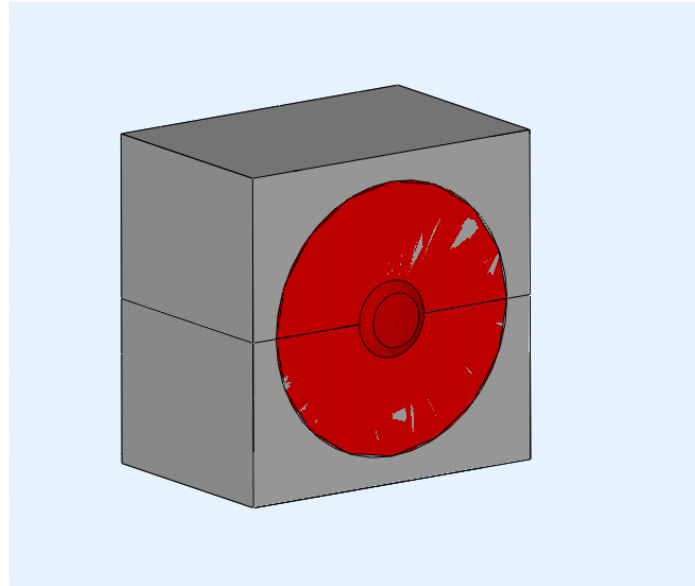


Abbildung 45: Kardioider Subwoofer mit zwei Treibern

Das kardioides Abstrahlverhalten kann ab einer bestimmten Wellenlänge nicht mehr aufrechterhalten werden und geht in das eines Dipols über. Das liegt zum einen an der Bündelung durch die Membrangröße und zum anderen an der nachlassenden Beugung um das Gehäuse.

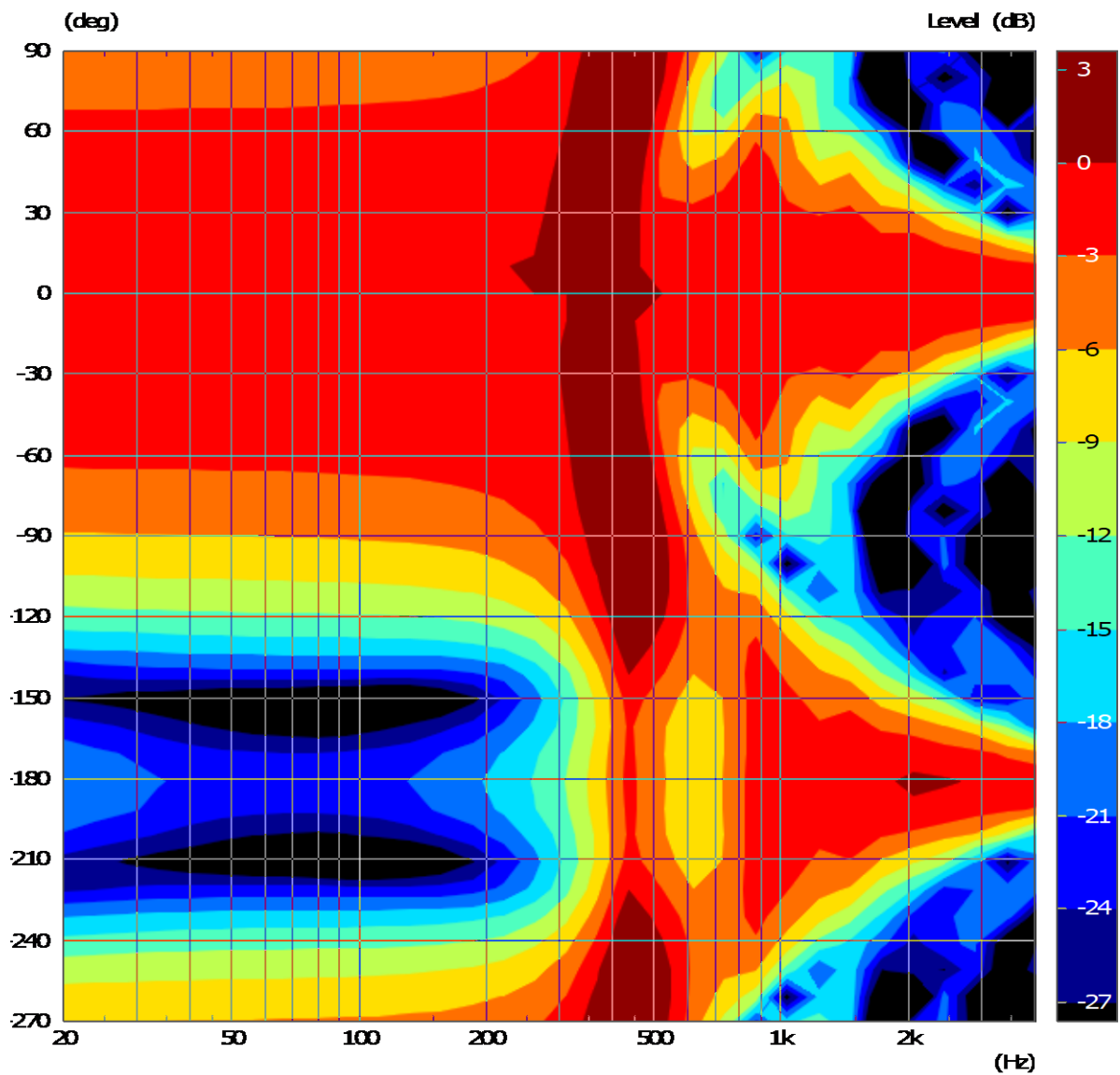


Abbildung 46: Abstrahlverhalten eines realen Kardioiden

Der Übergang zum Dipolverhalten lässt sich verhindern, indem der hintere Treiber einen Tiefpass erhält. Dieser sollte idealerweise linearphasig sein, um Phasenprobleme mit dem vorderen Treiber zu vermeiden.



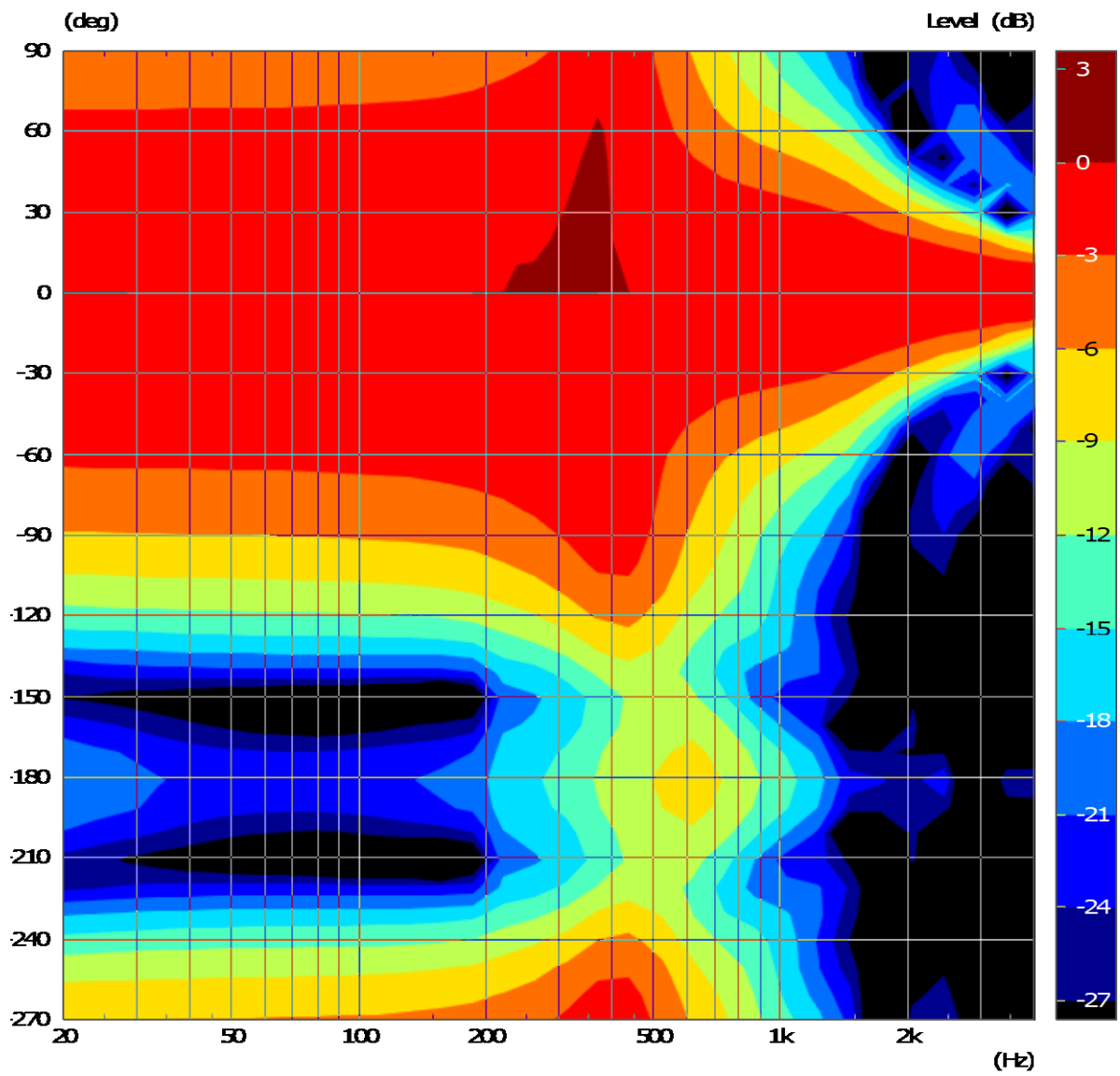


Abbildung 47: Kardioider Subwoofer mit Tiefpass vor dem hinteren Treiber

## 2-Wege PA-Top

Ein typischer PA-Lautsprecher mit Horn nutzt neben der Richtwirkung der Schallführung und des Gehäuses noch ein drittes Wirkprinzip, nämlich die Interferenz der beiden Wege im Übernahmebereich. Folgendes Beispiel zeigt einen Lautsprecher mit 12“-Tiefmitteltöner und einen 1“-Treiber an einem Horn mit dem vertikalen Abstrahlwinkel von ca. 40°.



Abbildung 48: 2-Wege Lautsprecher mit Horn

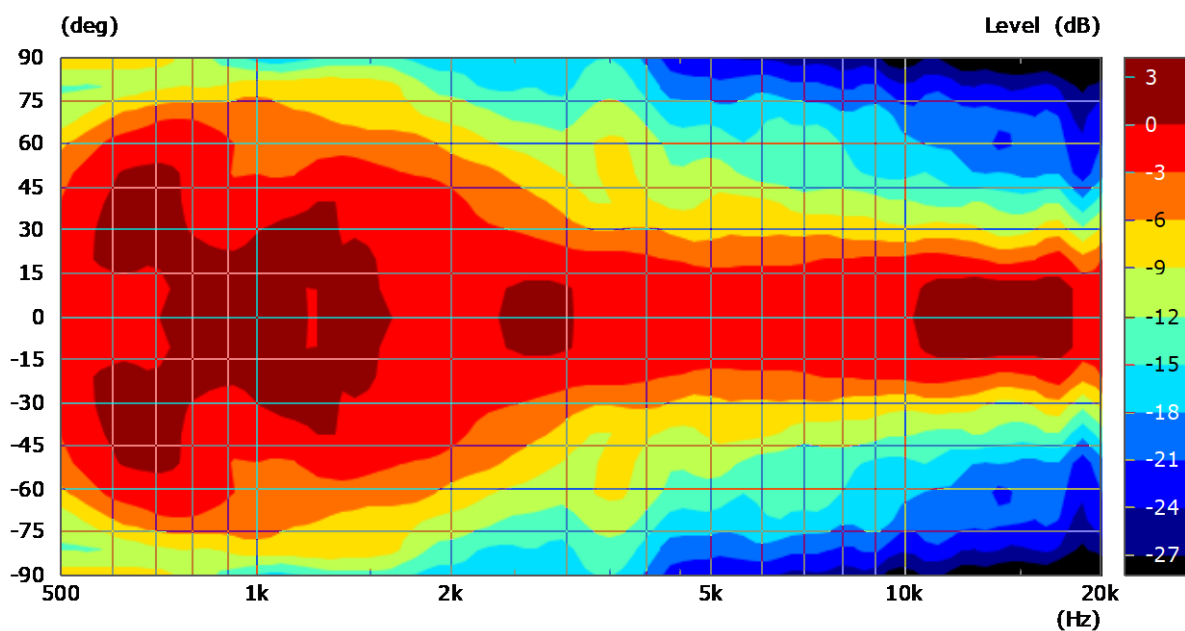


Abbildung 49: Vertikales Abstrahlverhalten des Horns im Gehäuse

Mit einer Trennfrequenz von 1,2 kHz stellt sich eine Richtwirkung in dem Frequenzbereich ein, in dem sich beide Treiber überlappen. Die Richtwirkung wird somit nach unten hin erweitert.

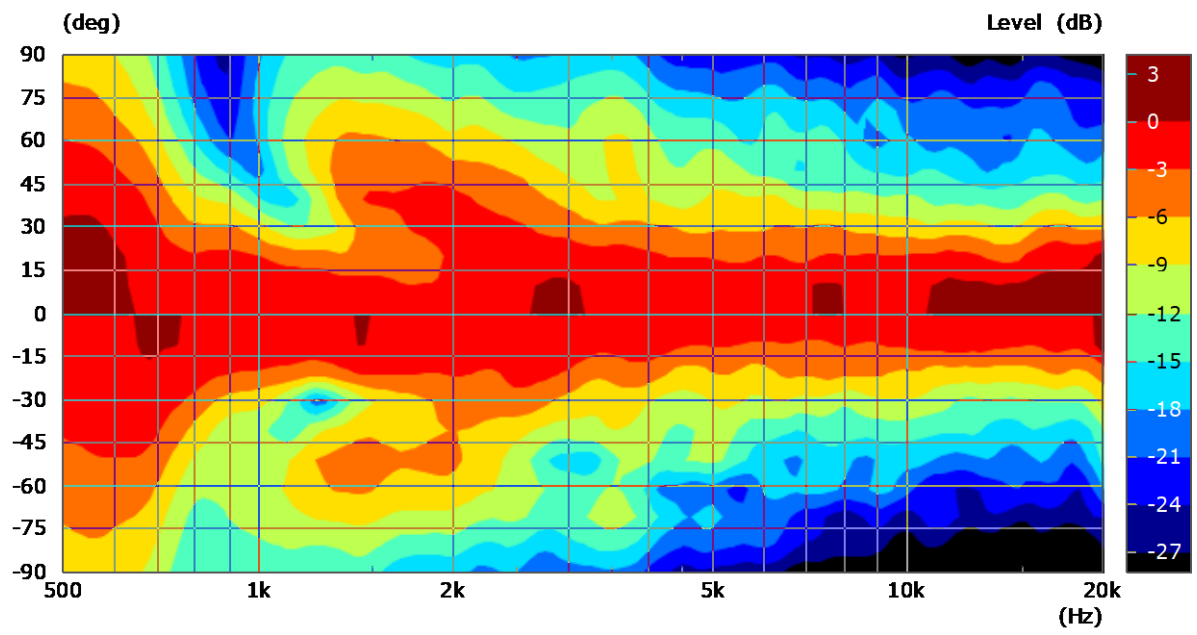


Abbildung 50: Vertikales Abstrahlverhalten des Gesamtlautsprechers mit Trennung bei 1,2 kHz

## Referenzen

1. Ulrich Horbach and D.B. Keele, Application of Linear-Phase Digital Crossover Filters to Pair-Wise Symmetric Multi-Way Loudspeakers [Part 1](#), [Part 2](#)
2. [D.B. Keele, Jr. \*Implementation of Straight-Line and Flat-Panel Constant Beamwidth Transducer \(CBT\) Loudspeaker Arrays Using Signal Delays\*](#)
3. [James R. Griffin, \*Design Guidelines for Practical Near Field Line Arrays\*](#)