

Tobias Wagner, Frédéric Arneton

# **Die Auswirkung der Richtcharakteristik der menschlichen Singstimme im Tonstudio**

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1       | Fragestellung, Zielsetzung.....                            | 1  |
| 2       | Grundlagen der menschliche Stimme.....                     | 2  |
| 2.1     | Das Ansatzrohr.....  | 3  |
| 2.1.1   | Resonanzen und Formanten.....                              | 3  |
| 2.1.1.1 | Vokale.....  | 4  |
| 2.1.1.2 | Sängerformant.....   | 5  |
| 2.1.2   | Konsonanten.....   | 5  |
| 3       | Untersuchung zur Richtcharakteristik.....                  | 6  |
| 3.1     | Versuchsordnung.....                                       | 6  |
| 3.2     | Ermittlung der Richtwirkung der Sänger.....                | 7  |
| 3.2.1   | Raumeinfluss.....  | 7  |
| 3.2.2   | Betrachtete Gesangsaufnahmen, Künstler.....                | 8  |
| 3.3     | Ergebnisse.....  | 10 |
| 3.3.1   | Klassischer Gesang und Belting.....                        | 10 |
| 3.3.2   | Männer- und Frauenstimme in verschiedenen Lautstärken..... | 14 |
| 3.3.3   | Die Richtcharakteristik von Konsonanten.....               | 20 |
| 3.3.4   | Brustregister und Falsettregister.....                     | 32 |
| 3.3.5   | Stimmsitze.....  | 35 |
| 3.3.6   | Obertongesang.....   | 41 |
| 3.4     | Fazit.....   | 43 |
|         | Literatur- und Webhinweise.....                            | 45 |

# 1 Fragestellung, Zielsetzung

Um die akustischen Eigenschaften der menschlichen Singstimme genau beschreiben zu können, verdient der Frequenzgang in Abhängigkeit der Abstrahlrichtung große Aufmerksamkeit. So können z. B. Aufnahmen durch eine geeignete Positionierung von Mikrofonen ganz zu Anfang der Übertragungskette im Sinne des Tonmeisters beeinflusst werden.

Ziel der Versuche war es herauszufinden, wie sich die Richtcharakteristik der Singstimme unter Studiobedingungen und im Nahfeld äußert.

Besonderer Wert wurde auf die Betrachtung verschiedener Stimmtypen gelegt, die sich abseits der in der klassischen Musik verfolgten Stimmideale bewegen. Ebenso wurde untersucht, in wieweit sich Gesangstechniken auf die Schallausbreitung auswirken.

Konsonanten, die bei Gesangsaufnahmen sowohl für Verständlichkeit sorgen, als auch Probleme bereiten können, wurden gesondert betrachtet. Ein Kapitel befasst sich mit der Untersuchung des Obertongesangs.

Da letztlich jedoch der ästhetische Gesichtspunkt als der wichtigste betrachtet werden sollte, wurden Hörbeispiele angefertigt, für Aufnahmen aus verschiedenen Winkeln enthalten.<sup>1</sup>

Es folgt zunächst eine kurze Einführung in die Klangerzeugung der Stimme, bevor dann die Richtwirkung der Stimme genauer untersucht wird.

Es liegt in der Natur der Sache, dass im Folgenden des öfteren von "Sängern" die Rede sein wird. Selbstverständlich bezieht diese generisch maskuline Bezeichnung auch Sängerinnen ausdrücklich mit ein.

---

<sup>1</sup> Einige Ausschnitte der Aufnahmen stehen als Download unter <http://www.myelvis.de> zur Verfügung.



Um die Amplitude der Stimmlippenschwingung zu erhöhen, muss der Atemdruck, sowie der Stimmlippenwiderstand gesteigert werden. Hierdurch verkürzt sich die Verschlussphase der Stimmlippen. Der Luftstrom wird so beim leisen Singen eher sinusförmig moduliert, während bei lauterem Singen mehr Obertöne entstehen.

## **Register**

Es finden sich viele Definitionen von Stimm-Registern, da sowohl klangliche Eindrücke als auch physiologische Beobachtungen einfließen können.

Die Einteilung in Voll-, Mittel- und Randstimme orientiert sich an der oben beschriebenen Stimmlippenschwingung. Des Weiteren existieren, wie erwähnt, Pfeif- bzw. Falsettregister.

In der klassischen Gesangsausbildung wird verfolgt, Registerübergänge unhörbar zu gestalten.

Im Rock- und Pop-Bereich werden Registerübergänge mitunter gezielt vermieden. Die Gesangstechnik, die Sängern durch erhöhten Atemdruck ermöglicht, bis in hohe Lagen in der Vollstimme zu singen, bezeichnet man als Belting.

## **2.1 Das Ansatzrohr**

Das Ansatzrohr reicht von oberhalb der Stimmlippen, bis zu den Schallaustrittsöffnungen an Mund und Nase. Der von den Stimmlippen produzierte Grundklang wird im Ansatzrohr durch individuelle anatomische Gegebenheiten geformt.

Das ursprünglich relativ gleichförmig verteilte Frequenzspektrum wird durch Resonanzen des Ansatzrohres unterschiedlich stark betont. Dabei gibt es vier bis fünf Hauptresonanzen, die Formanten genannt werden. Partialtöne aus dem Grundspektrum der Stimmlippenschwingung werden beim Austritt umso lauter wiedergegeben, je näher sie bei einem der Formanten liegen.

### **2.1.1 Resonanzen und Formanten**

Die effektive Länge des männlichen Ansatzrohres beträgt etwa 17,5 cm, die des weiblichen etwa 14 cm. Hieraus ergeben sich Formantfrequenzen für eine entspannte Haltung des Ansatzrohres.

|             | <b>Männer</b> | <b>Frauen</b> |
|-------------|---------------|---------------|
| 1. Formant: | 491 Hz        | 614 Hz        |
| 2. Formant: | 1474 Hz       | 1843 Hz       |
| 3. Formant: | 2457 Hz       | 3071 Hz       |
| 4. Formant  | 3440 Hz       | 4300 Hz       |
| 5. Formant  | 4423 Hz       | 5529 Hz       |

Abb. 2. Beispielhafte Formantfrequenzen des entspannten Ansatzrohres für Mann (17,5 cm) und Frau (14 cm).

Die Formanten des Ansatzrohres sind nicht nur essentiell für den individuellen Stimmklang (z.B. den Unterschied zwischen Mann und Frau), sondern auch grundlegend für die menschliche Lautbildung.

Die Lage der Formanten ändert sich durch unterschiedlich lange Ansatzräume ebenso wie durch Querschnittsveränderungen der selben. Durch Ausdehnungen und Verengungen an den Orten der Schallschnelleminima können Resonanzen geschwächt und verstärkt werden.

So beeinflussen Kiefer- und Lippenstellung vor allem den ersten Formanten, der Zungenrücken den zweiten, die Zungenspitze den dritten und die Kehlkopfstellung vor allem den vierten.

### 2.1.1.1 Vokale

Vokale sind nichts anderes als Formantbetonungen.

| <b>Vokal</b> | <b>Formantbereich</b>        |
|--------------|------------------------------|
| U            | 200 - 400 Hz                 |
| O            | 400 - 600 Hz                 |
| A            | 800 - 1200 Hz                |
| E            | 400 - 600 und 2200 - 2600 Hz |
| I            | 200 - 400 und 3000 - 3500 Hz |

Abb. 3. Formantbereiche der fünf Vokale.

### **2.1.1.2 Sängerformant**

In der klassischen Musik gilt der Sängerformant als tragendes Merkmal einer Stimme. Im eigentlichen Sinne handelt es sich nicht, wie häufig angenommen, um einen zusätzlichen Formanten, sondern um ein Bündel aus drittem, viertem und fünftem Formanten des Ansatzrohrs. Dieser Frequenzbereich wird vor allem durch Tiefstellung des Kehlkopfes erreicht.

Vor allem männliche Sänger nutzen diesen Frequenzbereich, um ein Orchester teilweise (spektral gesehen) und ohne vermehrten Krafteinsatz zu "übertönen". Während z.B. die Grundschwingung des hohen C (c<sup>2</sup>) eines Tenors (523 Hz) sehr nah beim spektralen Maximum des Orchestergesamtklanges liegt und somit größtenteils verdeckt wird, macht der Sängerformant die Darbietung erst "heraushörbar"<sup>2</sup>.

Mit der Tieferstellung des Kehlkopfes geht jedoch auch ein frequenzbezogenes Absinken der Vokalformanten einher. Dies bezeichnet man bildhaft als verdunkelte Vokale. (Ein "a" verschiebt sich beispielsweise in Richtung "o".)

### **2.1.2 Konsonanten**

Die Artikulation von Konsonanten findet prinzipiell durch das Formen von Hemmstellen für den Luftstrom statt. Neben den Reibelauten (Frikative) zu denen auch das "s" zählt, unterscheidet man Verschlusslaute (Plosive) wie z. B. "p" und "t", Nasale wie z. B. "m" oder "n", Schwinglaute (Vibranten) wie z. B. "r" und Engellaut (Approximanten) wie das "l".

Vokale sind in ihrem Pegel weitaus steigerungsfähiger als Konsonanten. Dies ist sowohl für das Singen als auch für Gesangsaufnahmen relevant.

---

<sup>2</sup> Nach: Sundberg, Johan, *Die Singstimme*, Orpheus-Verlag, Bonn 1997, S.18.

### 3 Untersuchung zur Richtcharakteristik

Für die Richtwirkung des gesamten "Instrumentes" Stimme, also des Sängers, ist zunächst der Übergang von Ansatzrohr zur Umgebung entscheidend, da an dieser Stelle ein Teil des Schalls reflektiert wird, wie in Kapitel 2.1.1 (Resonanzen und Formanten) bereits beschrieben wurde. Des weiteren kann man davon ausgehen, dass die Mundform und die spezielle Geometrie von Kopf und Oberkörper die Abstrahlung des Gesangs entscheidend beeinflussen.

#### 3.1 Versuchsanordnung

Elf Mikrofone mit Nierencharakteristik (Typ Schoeps MK4g mit Verstärkern CMC 6U) waren in einem Abstand von jeweils 50 cm auf den Mund des Sängers ausgerichtet. Fünf der Mikrofone waren in je einer von folgenden drei räumlichen Ebenen angeordnet (vgl. Abb. 4):

- auf der horizontal liegenden Ebene ( $E_H$ ) auf Höhe des Mundes (der sog. Horizontalebene),
- auf der vertikalen Ebene ( $E_V$ ) durch die Kopfmittle, die sich in Blickrichtung der Sänger erstreckt (der sog. Medianebene),
- auf einer diagonalen Ebene ( $E_D$ ), die gegenüber der zuvor genannten um  $45^\circ$  seitlich (um die Achse in Singrichtung) gekippt war.

Dabei betrug der Winkel zwischen zwei benachbarten Mikrofonen auf der selben Ebene  $30^\circ$ .

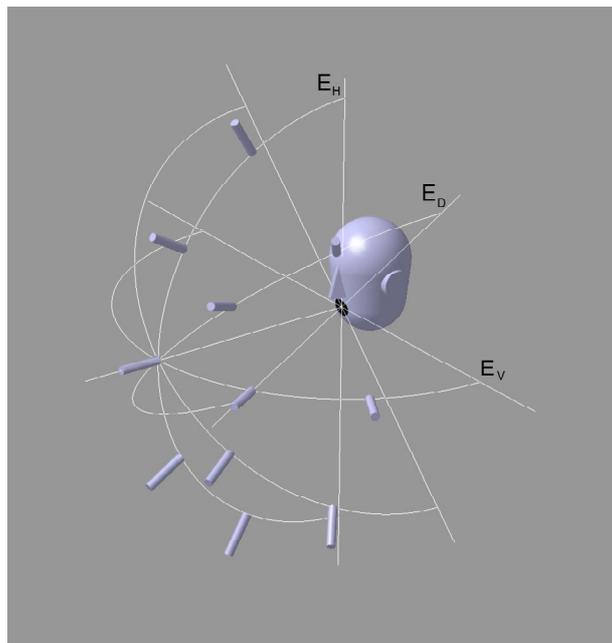


Abb. 4. Schematische Darstellung der Mikrofonanordnung zur Ermittlung der Richtcharakteristik

## 3.2 Ermittlung der Richtwirkung der Sänger

Um die Richtwirkungsdiagramme zu ermitteln, wurden Spektralanalysen<sup>3</sup> durchgeführt. So konnte die Energie eines bestimmten Frequenzbandes in einer bestimmten Abstrahlrichtung (am Platz eines der Mikrofone) gemessen werden. Analysiert wurden die Oktavbänder mit den Mittenfrequenzen 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz und 8 kHz. Die jeweils ermittelten Werte wurden zum Mikrofon auf der 0°-Achse in Relation gesetzt und ggf. über verschiedenen Laute und Tonhöhen eines Sängers gemittelt.

### 3.2.1 Raumeinfluss

Im Gegensatz zu akustischen Untersuchungen in reflexionsarmen Räumen, wurde die vorliegende Untersuchung unter Einfluss einer Tonstudiumgebung durchgeführt (Tonstudio der Hochschule der Medien (Stuttgart))

Der benutzte Aufnahmeraum besitzt eine recht kurze Nachhallzeit von etwa 0,37 s (vgl.

Abb. 5) und weist keine planparallelen Flächen im Inneren auf.

Die gesamte Messanordnung wurde mittig im Raum platziert. Auf dem Fußboden unter der Mikrofonanordnung und den Sängern befand sich Teppichboden.

---

<sup>3</sup> Die pro Oktavband ermittelten Werte entsprechen im jeweiligen Oktavband des Signals enthaltenen elektrischen Energie (bzw. dem RMS-Wert). Der RMS-Wert von Sinusschwingungen entspricht dem Spitzenwert, multipliziert mit dem Faktor  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ .

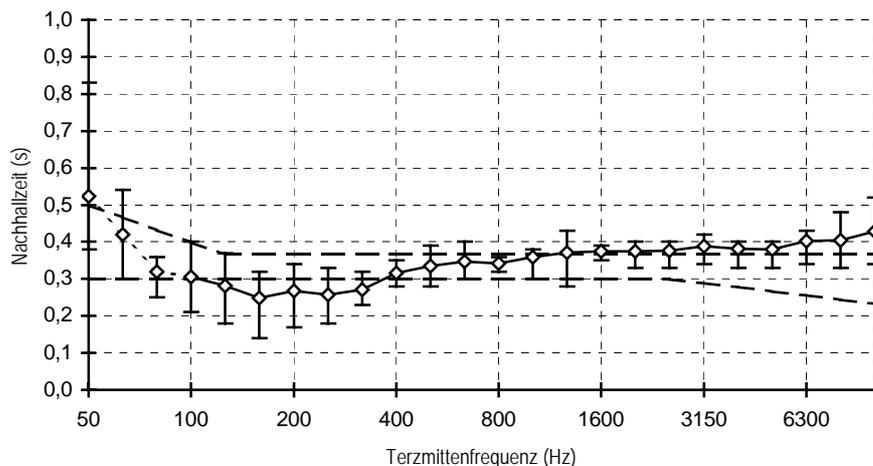


Abb. 5. Nachhallzeit des großen Aufnahmerraums des Hochschulstudios über die Frequenz<sup>4</sup>

Die Mikrofone befanden sich deutlich innerhalb des Hallabstandes.<sup>5</sup> An der Position der Mikrofone liegt der Pegel des Direktschalls rund 12 dB über dem des Diffusschalls.

Es sei angemerkt, dass der – wenn auch geringe – Einfluss des Raumes durchaus als gewünscht zu betrachten ist, da sich die Untersuchungen gezielt auf Aufnahmen im Tonstudio beziehen.

### 3.2.2 Betrachtete Gesangsaufnahmen, Künstler

In die vorliegenden Ergebnisse flossen die Aufnahmen von sechs Sängern aus verschiedenen musikalischen Bereichen, mit teils verschiedenen Stimmgattungen ein. Das aufgezeichnete Material bestand aus den deutschen Hochvokalen "a", "e", "i", "o" und "u". Diese wurden in meist zwei Dynamikstufen (piano und forte) und über den gesamten Stimmumfang der Sänger (meist in kleinen Terzen aufsteigend) aufgenommen. Des Weiteren wurden Lieder aufgezeichnet, die den Neigungen und Stimmlagen der jeweiligen Sänger entsprachen. Ausschnitte der Aufnahmen aus verschiedenen Winkeln stehen als Download unter <http://www.myelvis.de> zur Verfügung. Von einigen Sängern wurden zusätzlich Konsonanten aufgenommen.

<sup>4</sup> Die Grafik wurde freundlicherweise von der Fa. Audio Consulting München (ACM) zur Verfügung gestellt.

<sup>5</sup> Der minimale Hallabstand im benutzten Raum beträgt 1,9 m für eine ungerichtete Schallquelle bei Verwendung von Nierenmikrofonen und einer Nachhallzeit von max. 0,5 s.

Anm.: Die maximale Verstärkung bzw. Absenkung einzelner Spektralbereiche durch Interferenzen mit am Boden reflektiertem Schall (Kammfiltereffekte) beträgt im betrachteten Fall 0,47 dB. Dies ist für ungedämpft reflektierten Schall gültig und hat sehr geringen Einfluss auf die Analyse in Oktavbändern, bedenkt man, dass innerhalb eines Oktavbandes annähernd gleich viele Frequenzen maximaler Verstärkung wie Absenkung existieren.

Für die Untersuchung der Vokale wurden "u", "a" und "i" ausgewählt, da bei "u" und "i" die gegensätzlichen Extreme in der Mundstellung zu finden sind, das "a" hingegen mit entspanntem Ansatzrohr gesungen wird. Ausserdem hat "u" im Vergleich den tiefsten, "a" einen mittleren und "i" den höchsten Formantbereich (vergl. Abb. 3).

Von einzelnen Sängern wurden zudem verschiedene Gesangstechniken, verschiedene Stimmstärken oder Vokale in mittlerer Lautstärke (mezzoforte) aufgenommen.

Die jeweils ausgewerteten Laute werden im Zusammenhang mit den Ergebnissen genannt.

Die untersuchten Sänger setzten sich wie folgt zusammen:

- Frau, 25 Jahre, abgeschlossenes klassisches Gesangsstudium, insgesamt elf Jahre Gesangsunterricht, Stimmgattung: Sopran. (Bezeichnung: "klassisch ausgebildete Sopranistin").
- Mann, 50 Jahre, wenige Jahre klassischer Gesangsunterricht, Autodidakt, langjährige Erfahrung als Sänger, Stimmbildungs-Lehrer, Stimmgattung: Bariton (Bezeichnung: "Obertonsänger").
- Mann, 43 Jahre, Gesangsausbildung im Musikstudium und privat, Stimmgattung: Bariton. (Bezeichnung: "Amateurbariton")
- Frau, 31 Jahre, einige Jahre klassische Gesangsausbildung, Musiklehrerin, Stimmlage entspricht ungefähr der einer Mezzosopranistin. (Bezeichnung: "finnische Sängerin")
- Frau, 46 Jahre, professionelle Sängerin, sieben Jahre Gesangsunterricht, davon ein Jahr klassische Lehre, Stimmlage entspricht ungefähr der einer Altistin. (Bezeichnung: "Soulsängerin")
- Mann, 26 Jahre, zwei Jahre Gesangsunterricht, Stimmlage entspricht ungefähr der eines Baritons (Bezeichnung: "Rocksänger")

### 3.3 Ergebnisse

#### 3.3.1 Klassischer Gesang und Belting

Auf den nachfolgenden Seiten sind die Richtdiagramme zweier professioneller Sängerinnen aufgeführt. Zum einen die, der klassisch ausgebildeten Sopranistin, zum anderen die, der Sängerin, deren hauptsächliches Betätigungsfeld die Soul- und Gospelmusik ist. Belting bezeichnet eine Gesangstechnik, bei der selbst in hohen Lagen im Brustregister gesungen wird. Der klassische Gesang wurde mit und ohne Vibrato untersucht.

Da die Diagramme aus Platzgründen recht klein abgebildet sind, wird eines in Abb. 6 exemplarisch groß dargestellt.

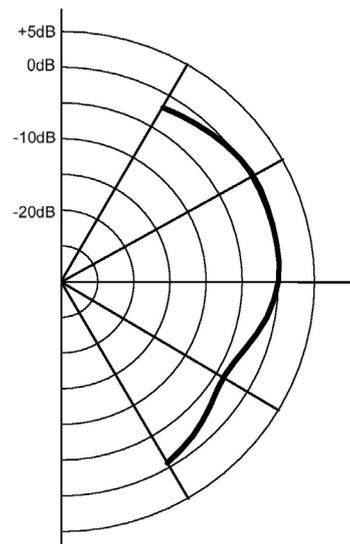
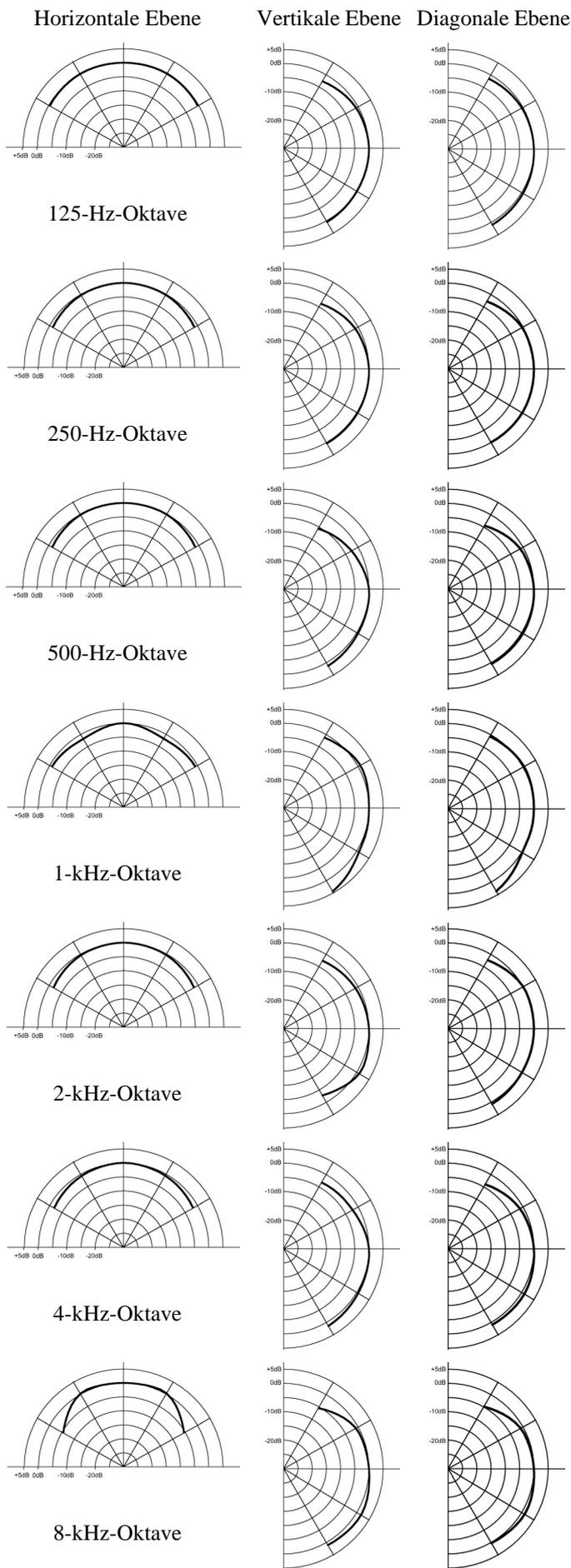


Abb. 6. Beispiel eines Richtdiagramm eines Oktavbandes in einer räumlichen Ebene

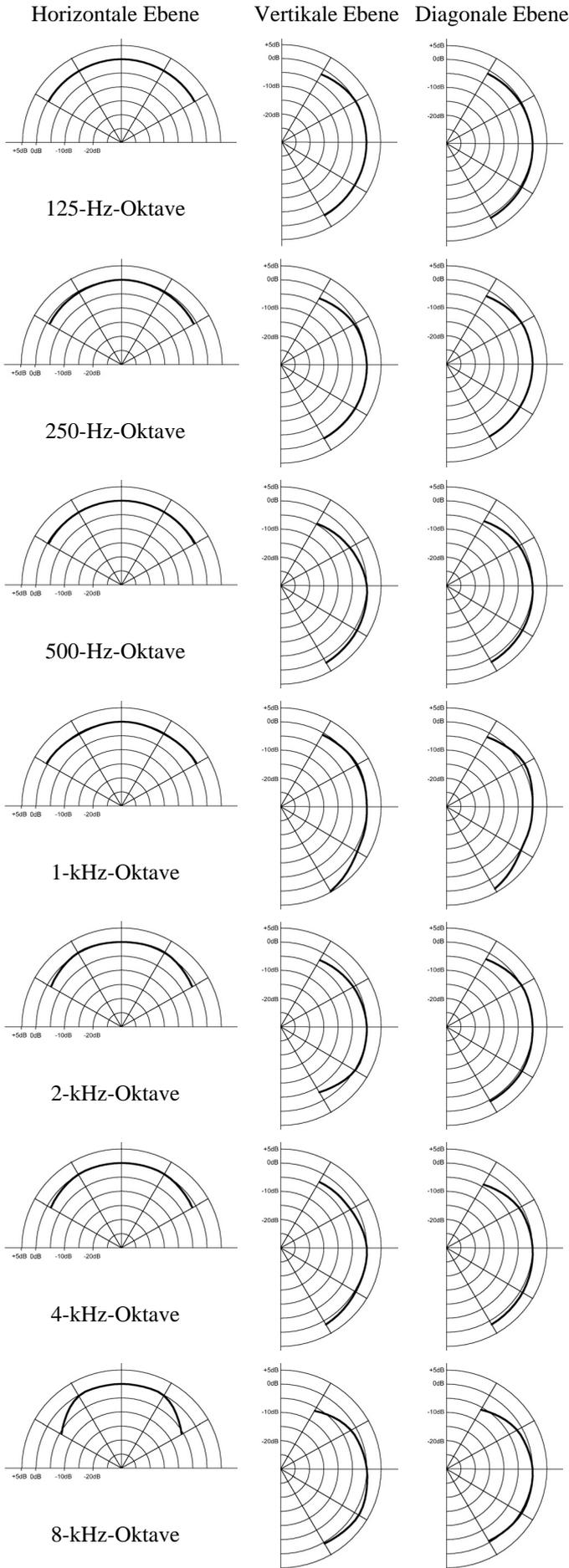


## Richtcharakteristik der klassisch ausgebildeten Sopranistin, ohne Vibrato

Grundlage für die Auswertung bildeten die Vokale "a", "i" und "u", gesungen auf den Tönen  $c'$ ,  $fis'$  und  $c''$  im Forte. Zwischen den Tönen liegt je der Abstand eines Tritonus (sechs Halb-töne). Die Töne liegen verteilt über den Stimmumfang, in dem die Sängerin ohne Mühe singen kann. Sie ist dem Stimmfach des lyrischen Soprans zuzuordnen.

Alle untersuchten Oktavbänder zeigen einen starken Abfall nach oben. Ausnahme bildet das 1-kHz-Oktavband, das nach  $30^\circ$  oben ein leichtes Maximum aufweist. Diese Oktave besitzt ihr deutliches Maximum im untersuchten Bereich nach  $60^\circ$  unten und ihr Minimum nach  $30^\circ$  seitlich. Die Oktave um 2 kHz weist nach schräg unten ein leichtes Maximum auf. Die Oktave um 8 kHz ist zu den Seiten und nach oben hin auffallend stark gedämpft und hat die Hauptabstrahlrichtung nach schräg unten.

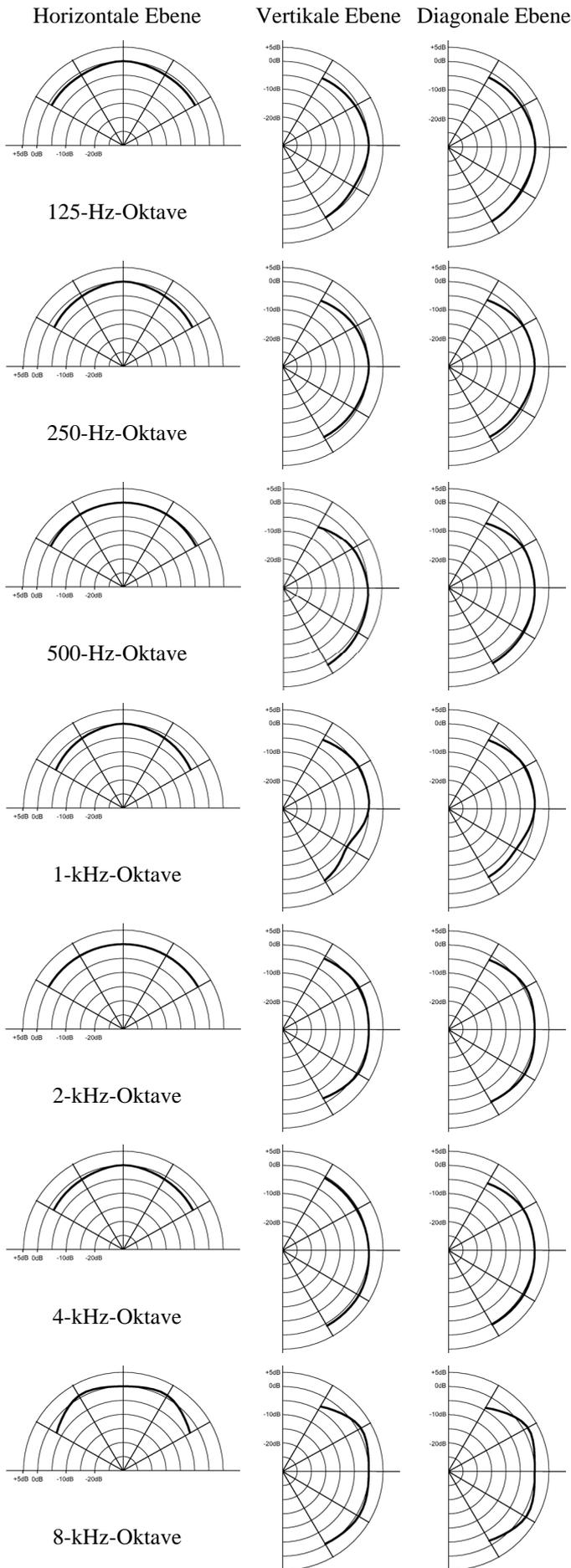
**Richtcharakteristik der klassisch  
ausgebildeten Sopranistin, mit  
Vibrato**



Grundlage für die Auswertung bildeten ebenfalls die Vokale "a", "i" und "u", gesungen auf den Tönen c', fis' und c'' im Forte.

Die Unterschiede zur Darbietung ohne Vibrato sind äußerst gering.

Das Minimum der 1-kHz-Oktave zur Seite hin ist nicht mehr vorzufinden, ebenso wenig das leichte Maximum der 2-kHz-Oktave nach 30° unten.



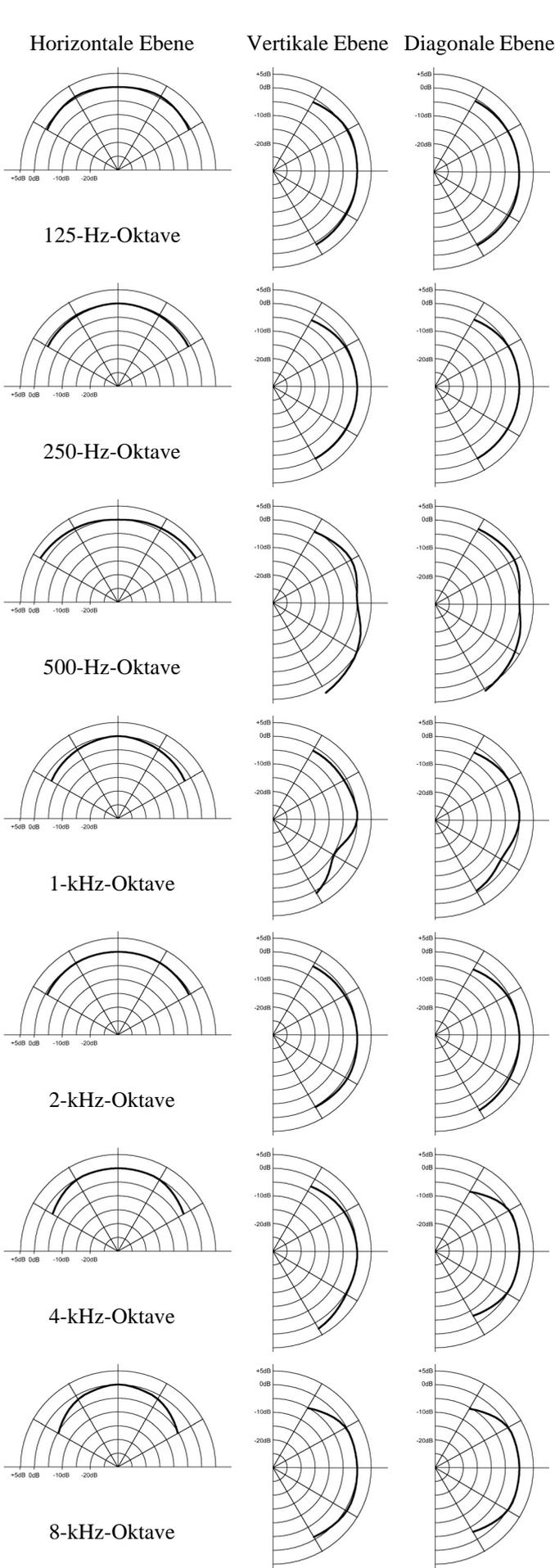
## Richtcharakteristik der "Soul-Sängerin" im Forte.

Es wurden die gleich Ton-höhen und Vokale wie bei der Untersuchung der klassischen Sopranistin verwendet. Die Sängerin musste zum Erreichen der höchsten Tonstufe hörbar mehr Kraft einsetzen. Dies liegt zum einen an der Gesangstechnik (Belting) zum anderen an der tiefen Stimmlage der Sängerin. Die Richtdiagramme ähneln denen der klassischen Sängerin sehr, vor allem die Oktavbänder um 125, 250 und 500 Hz. In der 1-kHz-Oktave ist hingegen ein Abschwächung in 30°-Richtung nach unten messbar, die bei der Sopranistin nicht auftritt. Ebenso ist bei der Soulsängerin die leichte Verstärkung in den Extrempositionen der Horizontalen nicht messbar.

Die Richtdiagramme für 2-kHz und 4-kHz-Oktaven ähneln denen der Sopranistin. In der Vertikalen und Diagonalen des 8-kHz-Oktavbands tritt ein Maximum in 30°-Richtung nach oben auf, das bei der klassischen Sängerin nicht zu sehen ist. Die 30°-seitlichen, und nach 30°-nach unten gerichteten Maxima treten bei der "Soulsängerin" ebenfalls etwas deutlicher hervor.

### **3.3.2 Männer- und Frauenstimme in verschiedenen Lautstärken**

Im folgenden finden sich Ergebnisse zur Richtcharakteristik eines Sängers und einer Sängerin in verschiedenen Dynamikstufen. Beide Sänger verfolgen nicht das klassische Stimmideal.



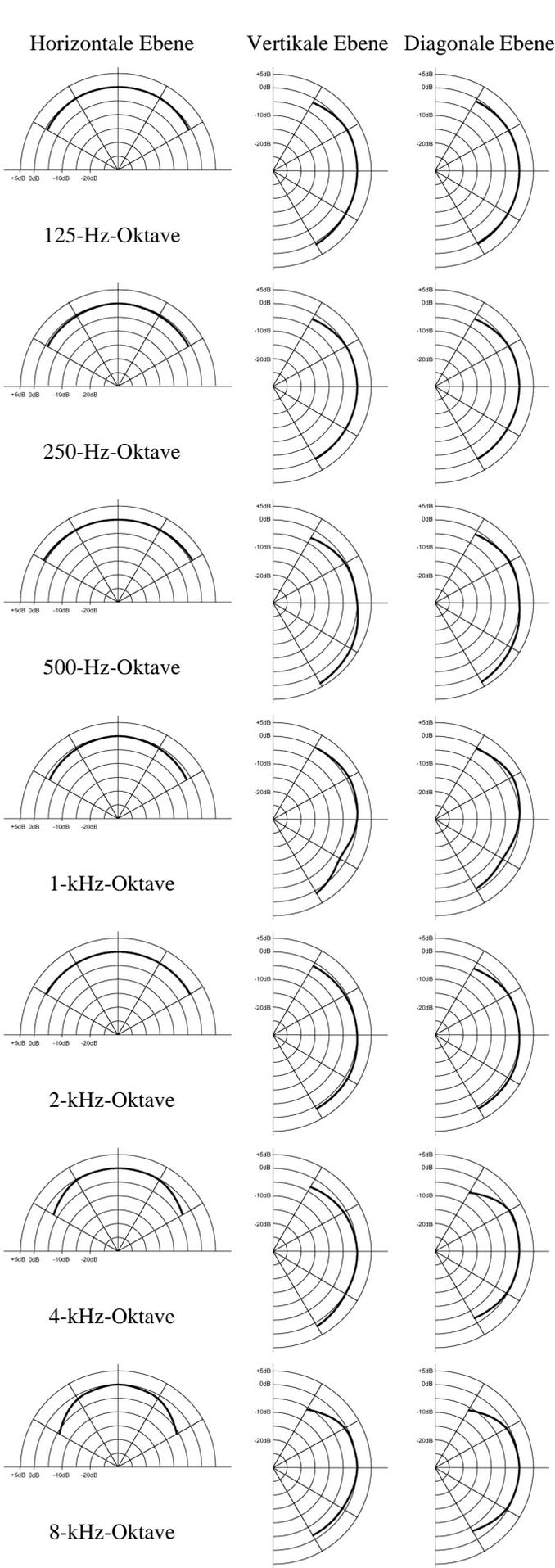
## Richtcharakteristik des "Rocksängers" im Forte

Ausgewertet wurden die Vokale "a", "i" und "u" auf vier Tonstufen, die gleichmäßig verteilt innerhalb des Stimmumfangs des Sängers liegen.

Besonders ins Auge fällt ein deutliches Maximum des 500-Hz-Oktavbands in der Vertikalen und Diagonalen, 60° nach unten gerichtet. Nach oben hin, wie auch seitlich, wird dieses Frequenzband ebenfalls leicht verstärkt abgestrahlt.

In der 1-kHz-Oktave zeigt sich eine Abschwächung im Pegel vor allem in der Vertikalen, 30° nach unten gerichtet.

Die beiden tiefsten Oktav-bänder werden weitgehend ungerichtet abgestrahlt (nach oben zeigt sich eine minimale Dämpfung), während die beiden hohen Oktavbänder eher eine Richtwirkung in der Horizontalen zeigen.

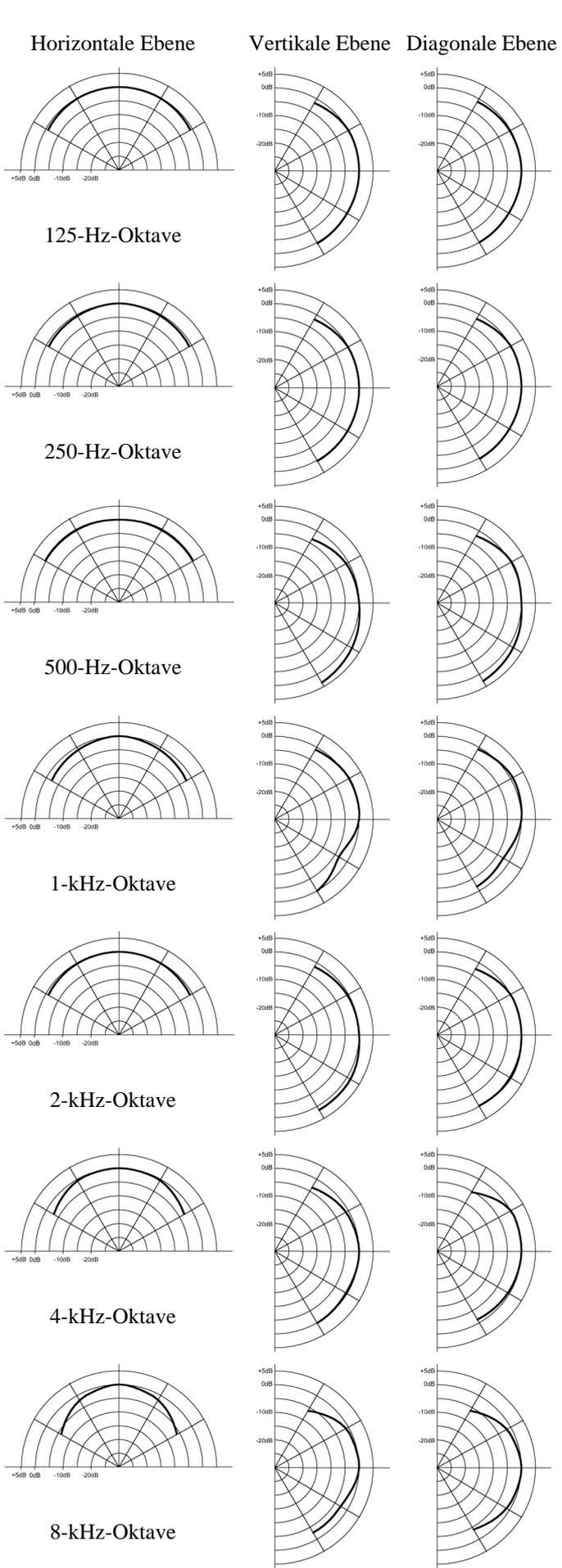


### Richtcharakteristik des "Rocksängers" im Mezzoforte

In der 500-Hz-Oktave gehen die deutlichen Richteffekte sichtbar zurück. Dies betrifft sowohl die nach unten gerichteten Maxima in der Vertikalen und Diagonalen, als auch die leichten Verstärkungen die sich zuvor nach 30° oben zeigten. Ebenso verschwindet die Verstärkung 30° zur Seite gerichtet weitgehend.

Die Dämpfung des 1-kHz-Bandes in 30° Richtung nach unten erscheint deutlich abgemildert.

Die beiden tiefen, wie auch die hohen Oktaven zeigen unverändert, wobei anzumerken ist, dass die höchste Tonstufe so laut wie im Forte dargeboten wurde (vgl. S. 2).

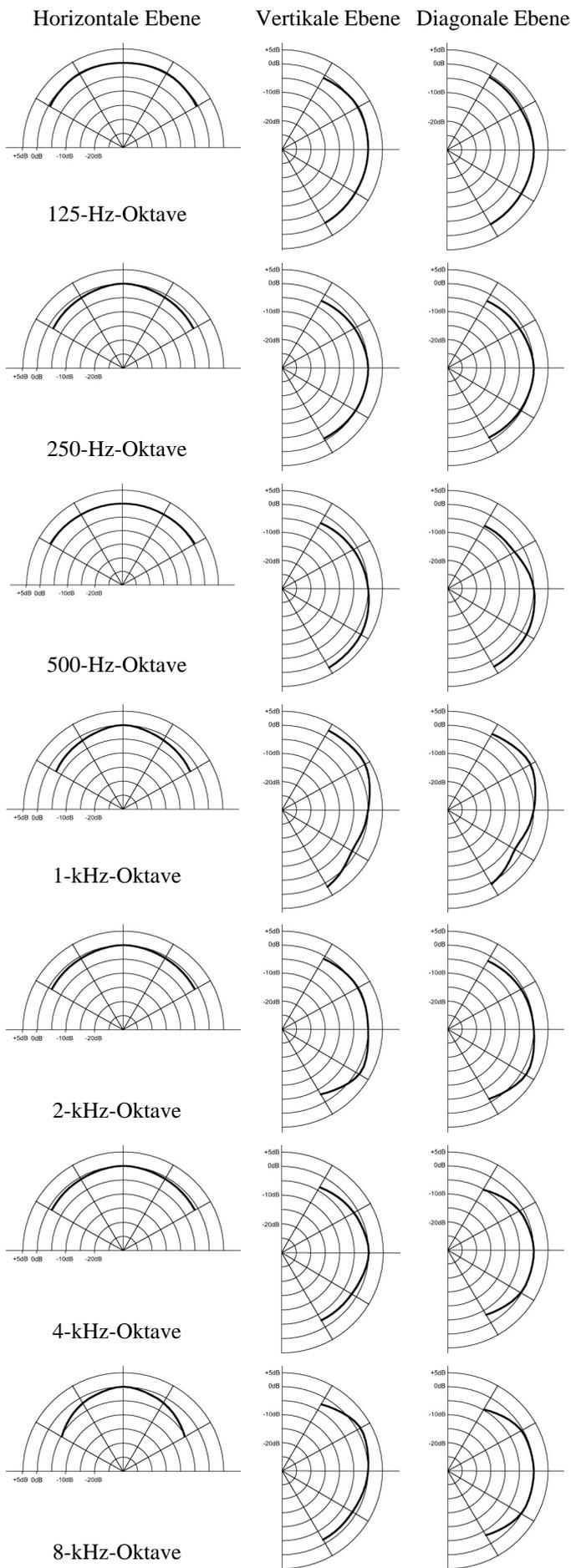


**Richtcharakteristik des  
"Rocksängers"  
im Piano**

Die Dämpfung der 1-kHz-Oktave in 30°-Richtung nach unten nimmt leicht zu, während eine zuvor kaum sichtbare Verstärkung des 2-kHz-Oktavbandes etwas deutlicher hervortritt.

Bei den hohen untersuchten Oktavbändern fällt das Verschwinden der leichten Verstärkung in 30°-Richtung nach unten auf.

Gleichermaßen tritt eine nach unten gerichtete Dämpfung im 8-kHz-Band zu Tage, die bei 60° in der Diagonalen ebenso auffallend ist. (Im Piano wurde die höchste Tonstufe im übrigen im Falsett gesungen.)

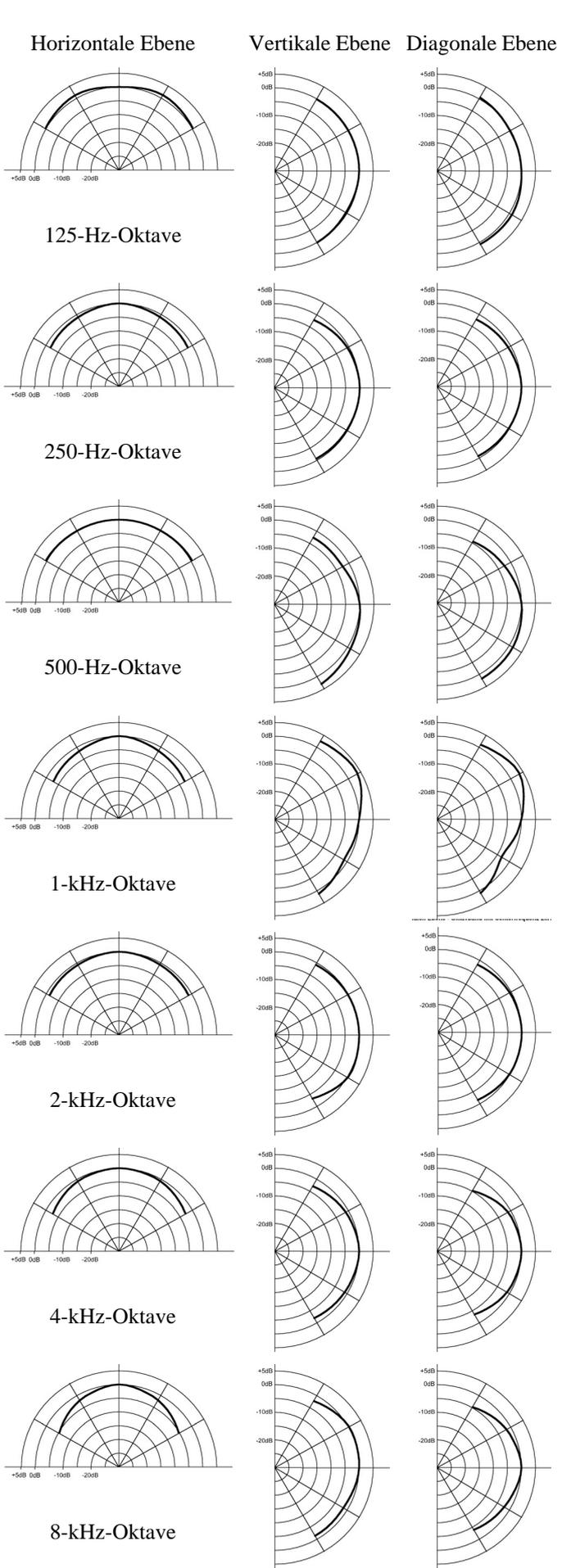


## Richtcharakteristik der "finnischen Sängerin" im Forte

Grundlage für die Auswertung bildeten die Vokale "a", "i" und "u", gesungen auf den Tönen d', as" und d". Zwischen den Tönen liegt je der Abstand eines Tritonus (sechs Halbtöne). Die Töne liegen verteilt über den Stimmumfang, in dem die Sängerin ohne Mühe singen kann.

Besonders auffallend ist die Dämpfung des 500-Hz-Bandes nach oben. Die Oktave besitzt ihr Maximum 60° unten. Entgegen allen weiteren unter-suchten Frequenzbändern ist die 500-Hz-Oktave vor der Sängerin in der horizontalen Ebene nicht gerichtet.

Die 1-kHz-Oktave hingegen zeigt ein Maximum nach oben und erfährt die größte Dämpfung nach 30° seitlich/unten. Dort besitzt die Oktave um 2 kHz ein leichtes Maximum. Die 8-kHz-Oktave wird bevorzugt nach 30° oben abgestrahlt, zudem ist sie in der horizontalen Ebene am stärksten nach vorn gerichtet.



### Richtcharakteristik der finnischen Sängerin im Piano

Die Richtcharakteristik wurde anhand der selben Töne errechnet wie im Forte.

Nach wie vor erfährt dass 500-Hz-Band nach oben eine Dämpfung gegenüber der Horizontalen und nach unten eine Verstärkung.

Die 1-kHz-Oktave zeigt, wie im Forte, ein Maximum nach oben, das ebenso wie das Minimum 30° seitlich/unten, noch deutlicher ausgeprägt ist als bei lautem Singen.

Das Maximum der 2-kHz-Oktave nach schräg unten ist bei leiser Darbietung nicht zu messen, ebenso wenig wie das Maximum der 8-kHz-Oktave nach 30° oben.

### 3.3.3 Die Richtcharakteristik von Konsonanten

Grundlage für die Untersuchungen bildeten die Aufnahmen der finnischen Sängerin. Sie artikulierte die Konsonanten sehr deutlich.

Untersucht wurden die Verschlusslaute (Plosive) "p" und "t", der Nasallaut "m", der Schwinglaut (Vibrant) rollendes bzw. Zungen-"r", sowie die Reibelaute (Frikative) "s" und "sch". Sie wurden jeweils als Anlaut mit nachfolgendem Vokal gesungen.

#### Plosivlaute "p" und "t"

Plosivlaute können bei Gesangsaufnahmen zu tieffrequentem Ploppen (sog. Popgeräuschen) führen. Dies liegt am Luftstoß, der beim Öffnen der Lippen bzw. Lösen der Zunge vom Gaumen entsteht. Um diesen Einfluss zu minimieren wurde ein Poppschutz verwendet. Zudem verliert der Luftstrom mit zunehmendem Abstand stark an Energie. Bei einem Mikrofonabstand von 50 cm wurden somit keine Luftbewegungen beurteilt, sondern lediglich der nutzbare Schall.

Abb. 7 zeigt das Spektrum des analysierten Konsonanten "p". Auf eine Ermittlung der Richtcharakteristik unterhalb des Oktavbandes um 1 kHz wurde verzichtet. Die tiefste betrachtete Frequenz ist somit 707 Hz.

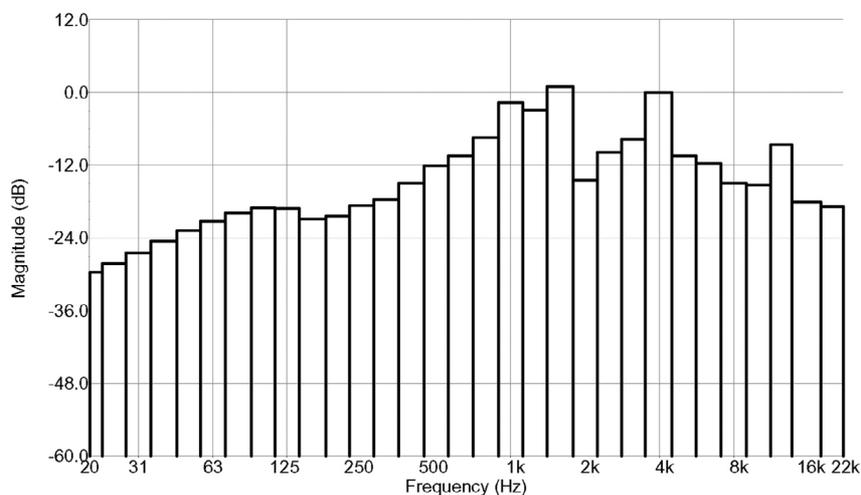
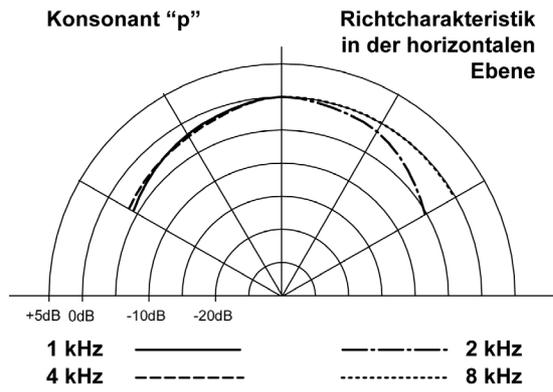
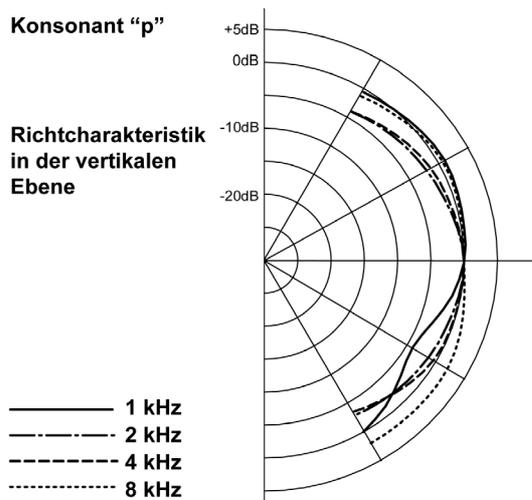


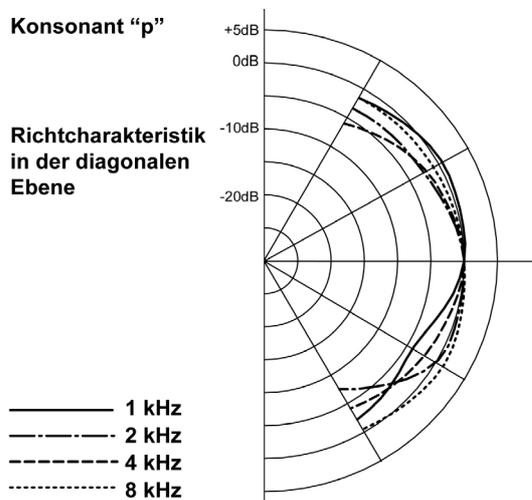
Abb. 7. Spektralverteilung des analysierten Kons. "p", gemessen in Terzbändern am Mikrofon auf der 0°-Achse.



Die 1-kHz-Oktave ist im Klangspektrum am stärksten vertreten. Sie wird nach 30° unten deutlich geschwächt abgestrahlt und besitzt ein Maximum nach 30° oben. Die Oktave um 8 kHz zeigt ein annähernd identisches Verhalten nach allen untersuchten Richtungen und besitzt ihr Maximum nach 30° unten in der vertikalen Ebene. Dort und in Blickrichtung der Sängerin befindet sich auch die Hauptabstrahlrichtung der 2-kHz-Oktave.



Die Oktave um 4 kHz ist auf der 0°-Achse am lautesten und fällt sowohl zu den Seiten, wie auch nach unten und oben deutlich ab.



Auch beim Konsonanten "t" konnte auf eine Analyse unterhalb der 1-kHz-Oktavbandes verzichtet werden, da die wesentlichen Signalanteile oberhalb 707 Hz zu finden sind (vgl. Abb. 8).

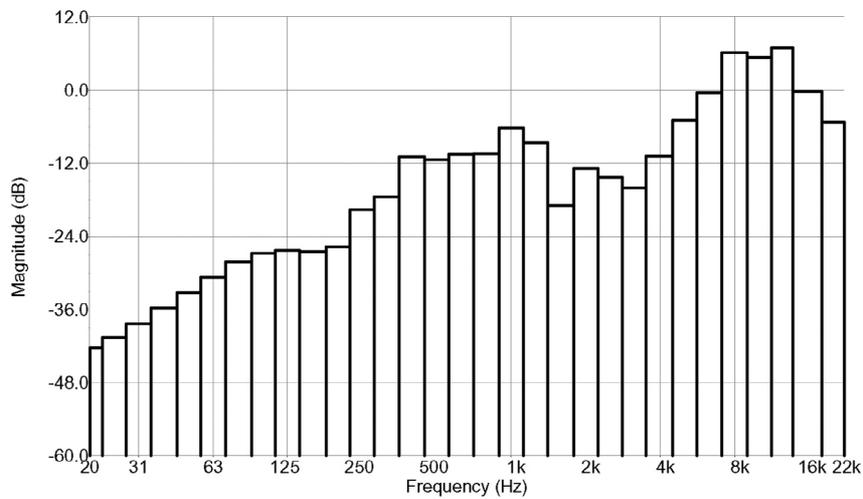
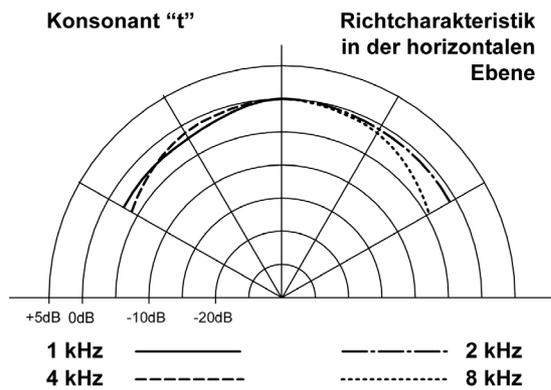
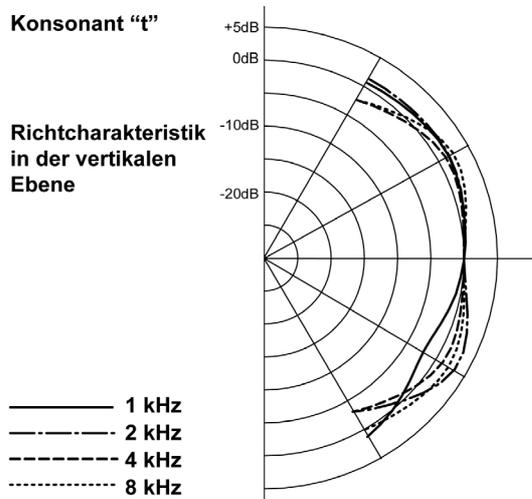


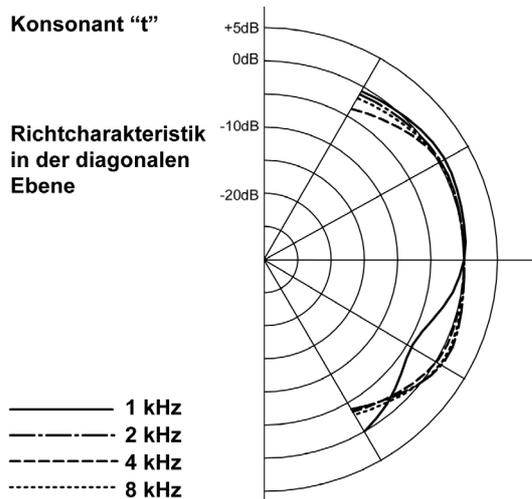
Abb. 8. Spektralverteilung des analysierten Konsonanten "t", gemessen in Terzbändern am Mikrofon auf der 0°-Achse.



In der vertikalen Ebene ist auffällig, dass die Oktavbänder um 2, 4 und 8 kHz des Konsonanten "t" nach 30° oben und unten etwa 2 bis 3 dB lauter abgestrahlt werden als in horizontaler Richtung. Die 1-kHz-Oktave ist ebenfalls nach oben gerichtet, besitzt aber 30° unten ein deutliches Minimum. In der horizontalen Ebene sind alle untersuchten Frequenzbänder auf der 0°-Achse am lautesten, jedoch verschieden stark gerichtet.



In der diagonalen Ebene ist der Kurvenverlauf im Bereich 30° oben/seitlich bis 30° unten/seitlich annähernd kreisförmig. Die Ausnahme hierbei bildet die 1-kHz-Oktave, die ihr ausgeprägtes Minimum bei 30° unten/seitlich besitzt. Die 8-kHz-Oktave beinhaltet die wesentlichen Signalanteile. Sie zeigt zwei Maxima: auf der vertikalen Ebene 30° oben, sowie 30° unten.



## Nasallaut "m"

Nasallaute stellen eine Besonderheit dar, werden sie doch mit geschlossenem Mund geformt und sind grundsätzlich stimmhaft. Der untersuchte Laut "m" wurde auf der Tonhöhe des eingestrichenen Cis (273 Hz) dargeboten. Es wurden lediglich die Oktavbänder um 250, 500 und 1000 Hz untersucht. Die Grenzen des analysierten Spektralbereiches sind somit 177 und 1414 Hz. In diesem Bereich sind die spektralen Hauptanteile des Lautes enthalten (vgl. Abb. 9).

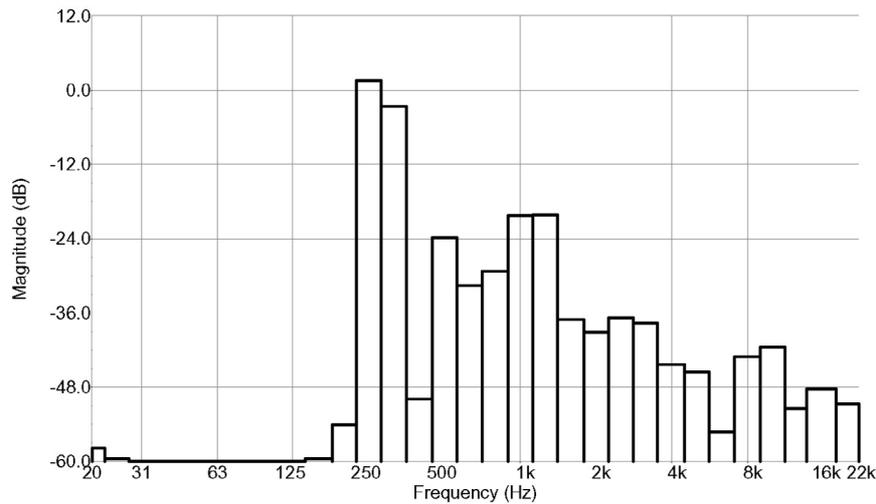
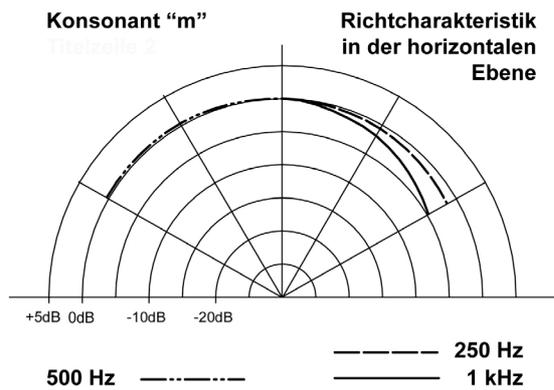
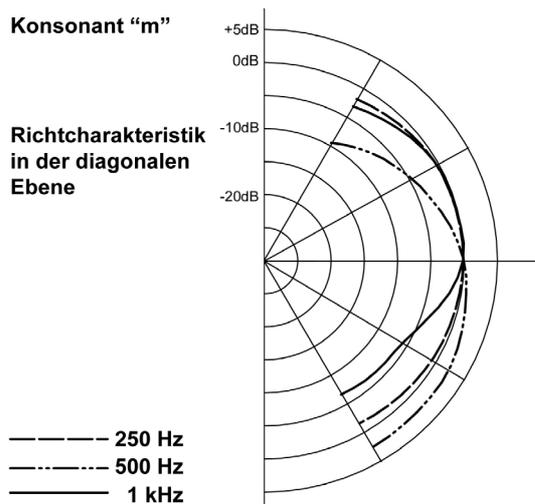
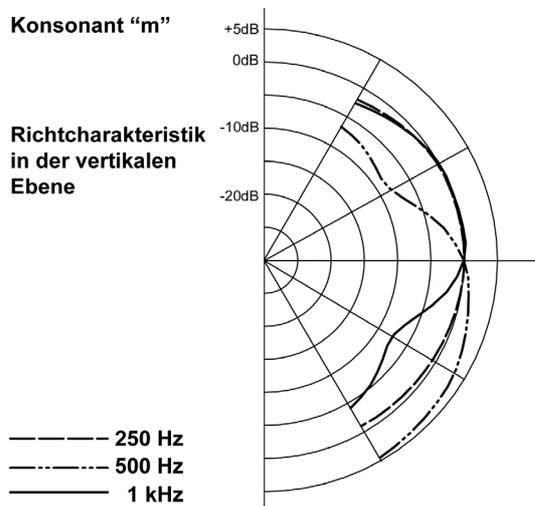


Abb. 9. Spektralverteilung des analysierten Konsonanten "m", gemessen in Terzbändern am Mikrofon auf der 0°-Achse.



Die den Grundton enthaltende 250-Hz-Oktave wird in allen Ebenen für kleine Winkel annähernd radial abgestrahlt. Die 500-Hz-Oktave zeigt ihr deutliches Maximum im untersuchten Bereich nach 60° unten. In dieser Richtung erfährt sie eine signifikante Verstärkung von knapp 5 dB gegenüber der Waagerechten. Die Oktave um 1 kHz hingegen wird nach unten deutlich geschwächt abgestrahlt.



## Vibrant "r"

Das Zungen-"r" bzw. gerollte "r" kommt vor allem in der klassischen Gesangkunst zum Einsatz. Es besteht aus einer Aneinanderreihung von Zungenschlägen gegen den Gaumen. Das untersuchte "r" wurde stimmlos dargeboten, also ohne gleichzeitige Tonbildung der Stimmlippen. Abb. 10 zeigt die spektrale Zusammensetzung des Konsonanten. Es wurden die Oktaven um 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz untersucht.

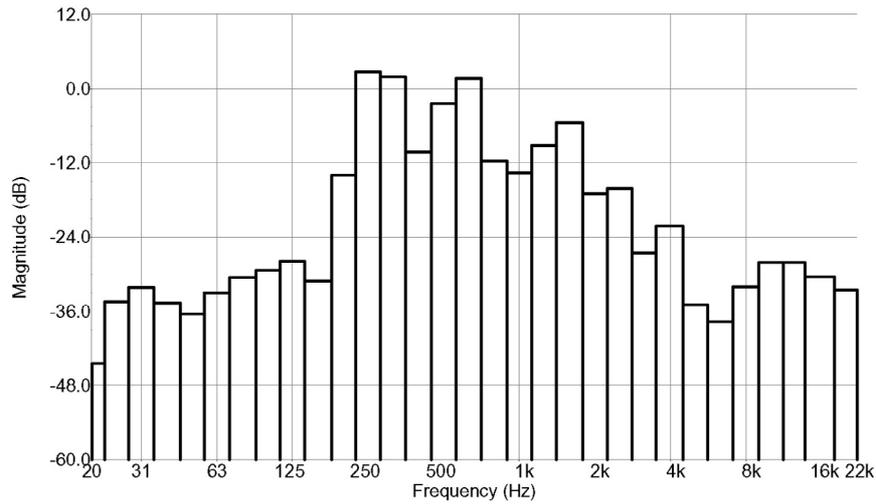
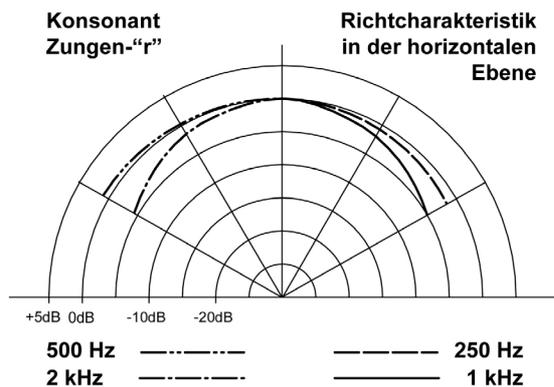
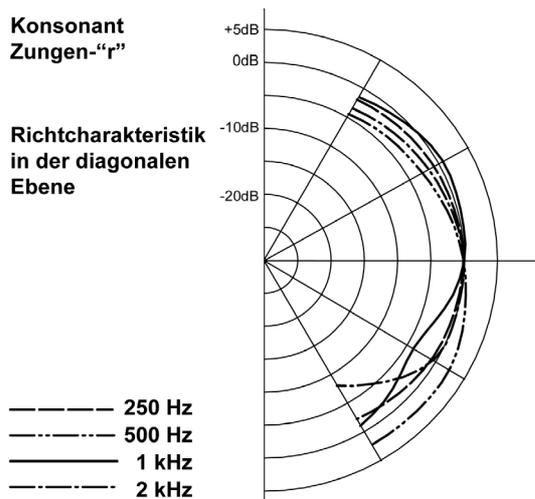
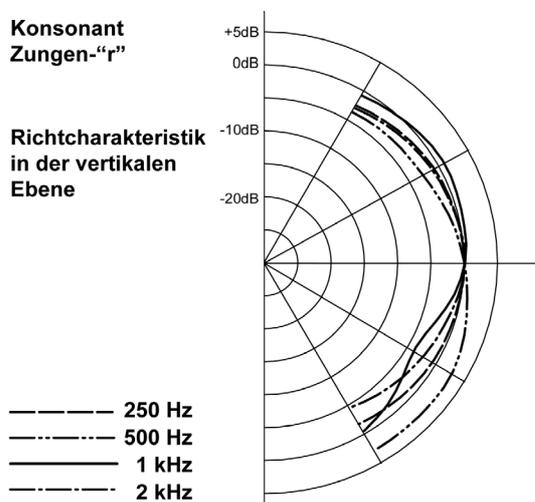


Abb. 10. Spektralverteilung des analysierten Zungen-"r", gemessen in Terzbändern am Mikrofon auf der 0°-Achse.



Die höherfrequenten Anteile des Lautes in der 2-kHz-Oktave werden am stärksten gerichtet abgestrahlt. Das Maximum der Oktave liegt auf der 0°-Achse. Wieder zeigt sich das Bild der nach 30° unten stark geschwächt abgestrahlten 1-kHz-Oktave. Sie zeigt sich in der Horizontalen Ebene zu den Seiten stark gedämpft und besitzt ihr Maximum bei 30° oben. Die Oktave um 500 Hz hat ihr Maximum seitlich/unten und erfährt nach seitlich/oben die größte relative Dämpfung.



## Frikative "s" und "sch"

Die Laute "s" und "sch" können bei Tonaufnahmen ästhetisch störend in Erscheinung treten, oder gar zu ungewünschten Übersteuerungen führen. Hierfür ist der hohe Gehalt an hohen Frequenzen verantwortlich (vgl. Abb. 11 und Abb. 12).

Das "s" ist in der Regel der höhenreichste Laut, der im menschlichen Gesang vorzufinden ist. Das "s" kann stimmhaft, sowie stimmlos gesprochen und gesungen werden. Die Ermittlung der Richtcharakteristik erfolgte für ein stimm- und dadurch tonloses "s" für die Oktavbänder um 2 kHz, 4 kHz und 8 kHz.

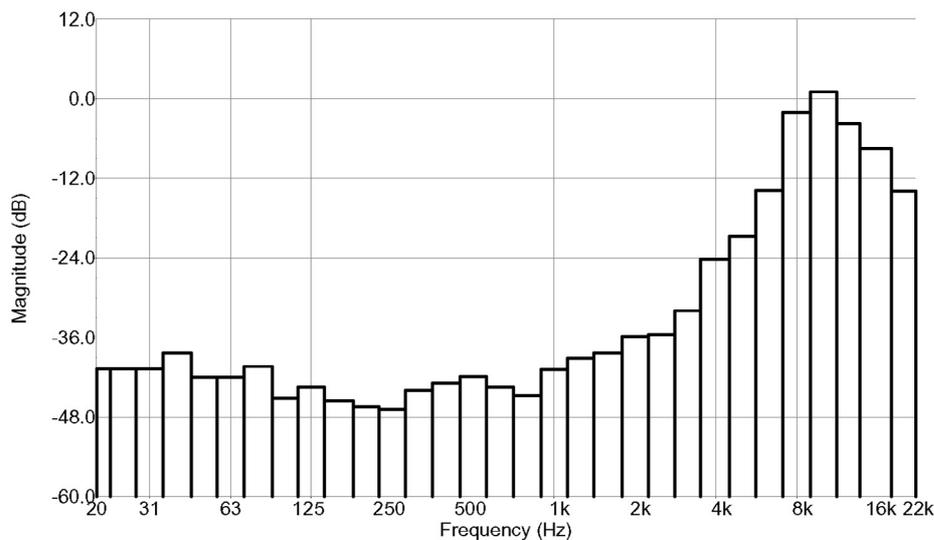
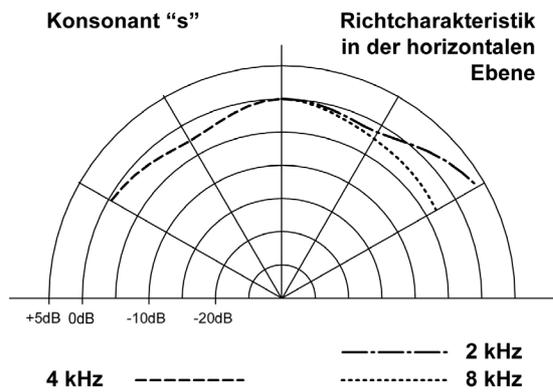
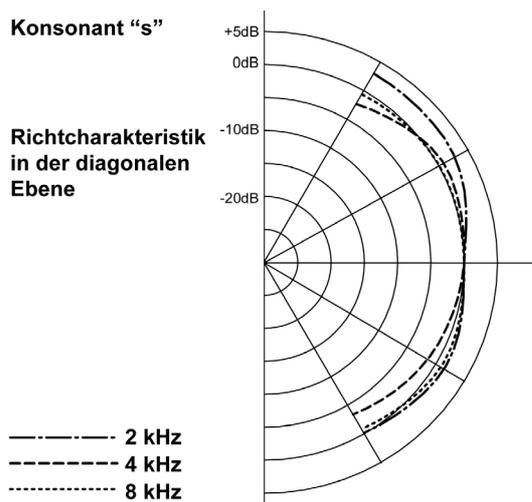
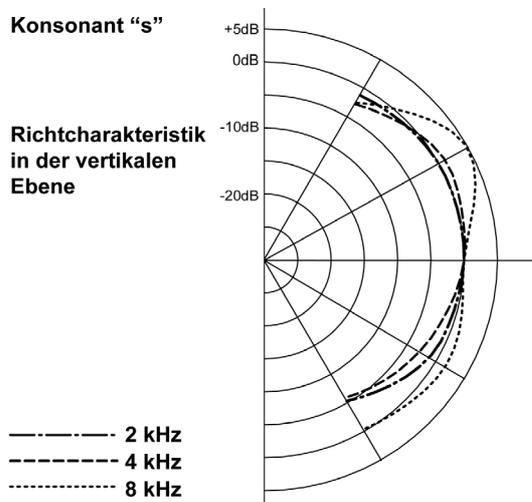


Abb. 11. Spektralverteilung des analysierten Konsonanten "s", gemessen in Terzbändern am Mikrofon auf der 0°-Achse.



Das Hauptmaximum der 8-kHz-Oktave (+5 dB gegenüber der Waagerechten) liegt in Richtung 30° oben, wobei ein weiteres Nebenmaximum nach schräg unten vorzufinden ist. Diese Oktave beinhaltet den wesentlichen Energieanteil des Lautes und wird in der horizontalen Ebene stark gebündelt nach vorn abgestrahlt. So tritt das obere Maximum bei 8 kHz in der um 45° geneigten diagonalen Ebene nicht mehr auf.



Die Untersuchung des stimmlosen Lauts "sch" erfolgte ebenso für die Oktaven mit Mittenfrequenzen von 2 kHz, 4 kHz und 8 kHz.

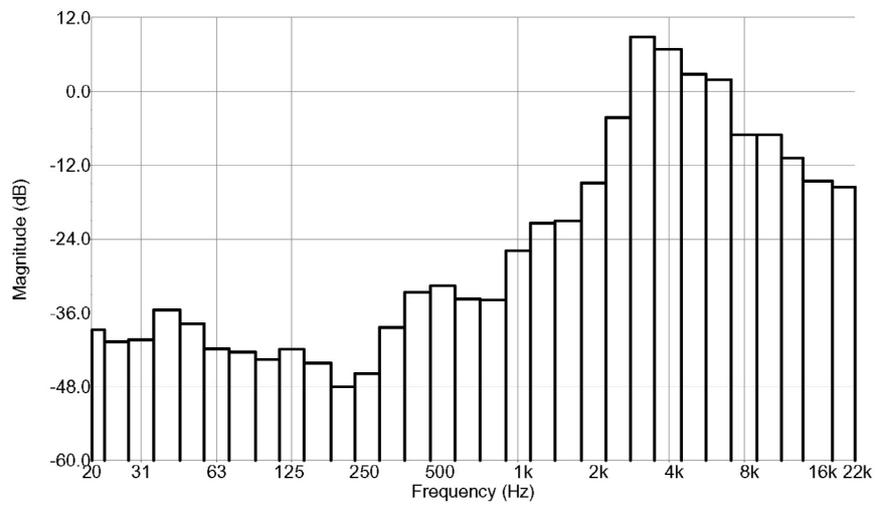
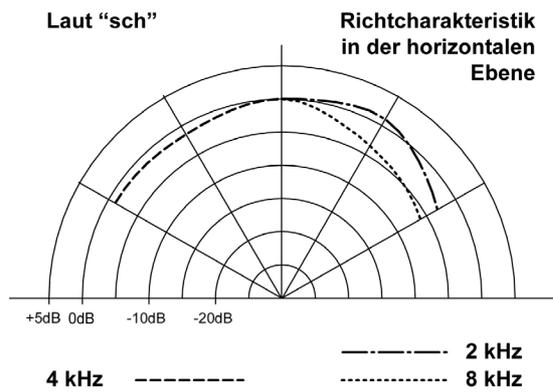
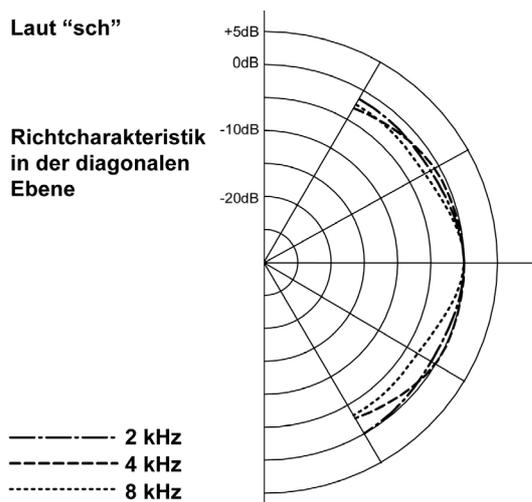
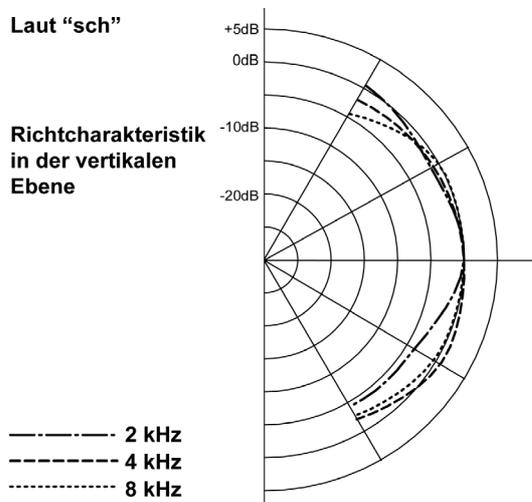


Abb. 12. Spektralverteilung des analysierten Reibelauts "sch", gemessen in Terzbändern am Mikrofon auf der 0°-Achse.

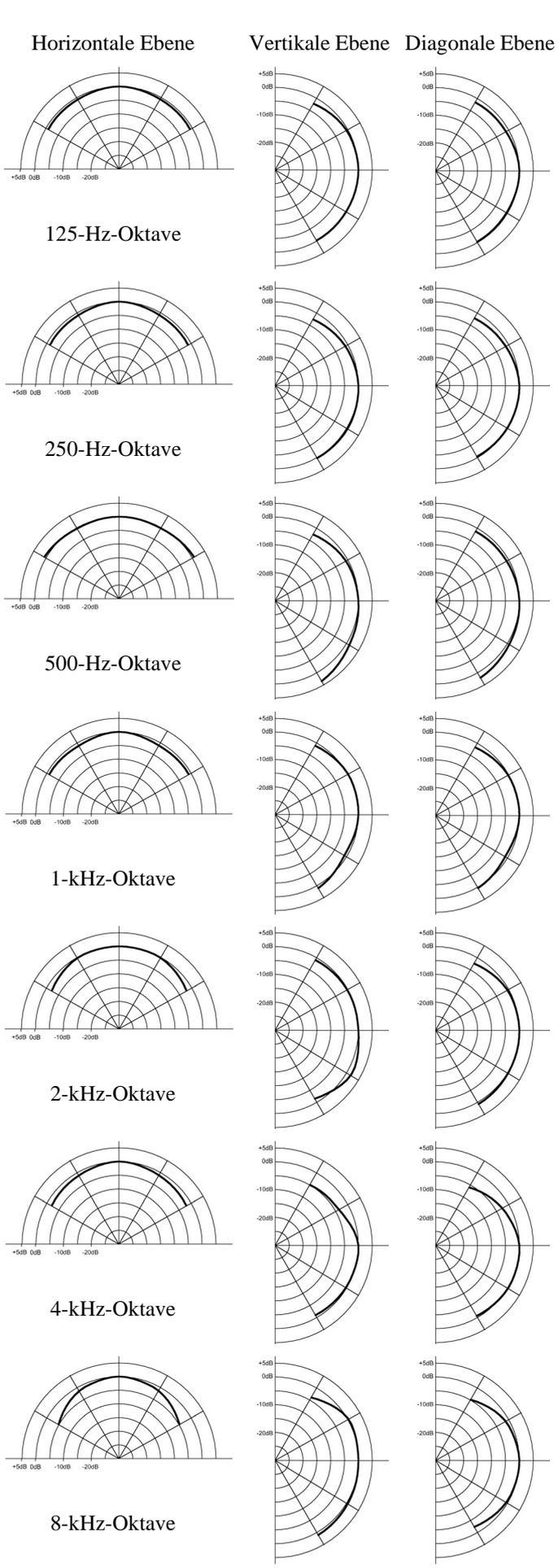


Weit weniger auffällig als beim "s" verhält sich die Richtwirkung des "sch". Die 4-kHz-Oktave beinhaltet die meiste Schallenergie und hat ihr Maximum in der vertikalen Ebene, leicht nach unten gerichtet. Die hohen Anteile im Oktavband um 8 kHz sind in jeder räumlichen Ebene deutlich gerichtet. Die Hauptabstrahlrichtung liegt auf der 0°-Achse.



### **3.3.4 Brustregister und Falsettregister**

Auf den folgenden Seiten sind Richtdiagramme jeweils desselben Sängers im Brust- und Falsettregister abgebildet. Die Tonerzeugung im Brustregister geschieht auf gewöhnlichem Weg mit den Stimmlippen, wohingegen im Falsettregister die Klangbildung durch Luftverwirbelungen (ähnlich wie beim Pfeifen) zustande kommt (vgl. Kapitel 2, Grundlagen der menschliche Stimme).



## Richtcharakteristik des "Amateurbaritons", Brustregister

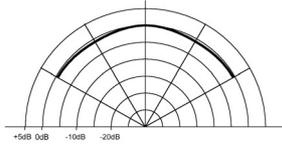
Grundlage für die Auswertung bildeten die Vokale "a", "e", "i", "o" und "u", gesungen auf den Tönen F, Gis, H, d, fis, a, c' und e' im Forte. Die Töne liegen verteilt über den Stimmumfang des Sängers.

Auffallend ist das Maximum der 500-Hz-Oktave nach unten. Die Oktave um 2 kHz beinhaltet den Sängersformanten und wird nach 30° unten bevorzugt abgestrahlt.

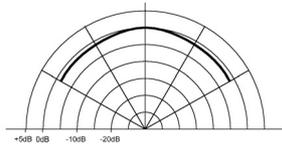
Die 1-kHz-Oktave besitzt in dieser Richtung ein leichtes Minimum und zeigt ihr Maximum im untersuchten Bereich jedoch 60° unten.

Die 4-kHz-Oktave ist nach oben hin stark gedämpft, ebenso die Oktave um 8 kHz, die in der Horizontalebene am stärksten gerichtet ist und ihr Maximum nach 60° unten zeigt.

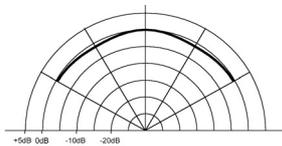
Horizontale Ebene



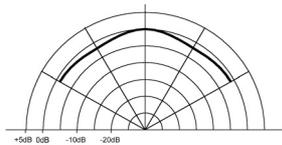
125-Hz-Oktave



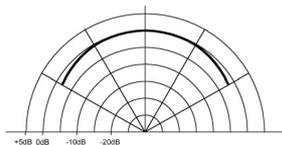
250-Hz-Oktave



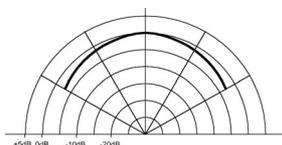
500-Hz-Oktave



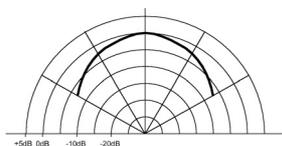
1-kHz-Oktave



2-kHz-Oktave

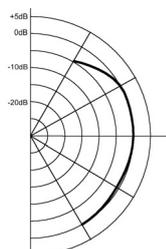
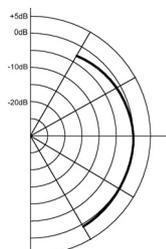
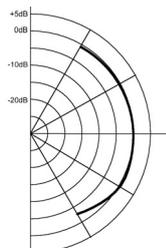
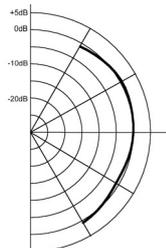
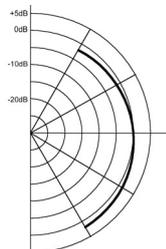
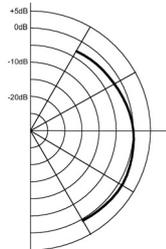
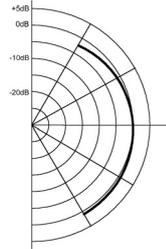


4-kHz-Oktave

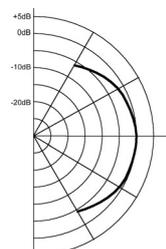
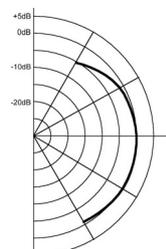
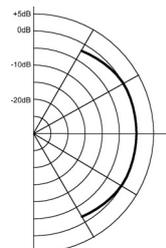
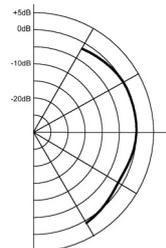
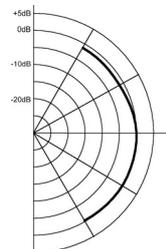
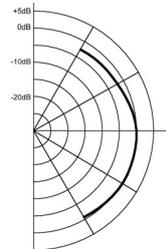
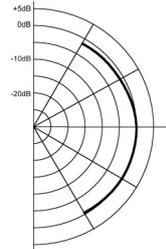


8-kHz-Oktave

Vertikale Ebene



Diagonale Ebene



## Richtcharakteristik des

### "Amateurbaritons", Falsettregister

Grundlage für die Auswertung bildeten dieselben Laute und Tonhöhen wie für die Richtcharakteristik im Brustregister.

Im Gegensatz zur Bruststimme zeigt die Oktave um 250 Hz ihr Maximum nach 30° unten.

Das Maximum der 500-Hz-Oktave nach unten ist gegenüber dem des Brustregisters deutlich schwächer.

Die 1-kHz-Oktave ist, ebenso wie die 500-Hz-, 4-kHz- und 8-kHz-Oktave in der horizontalen Ebene stärker nach vorn gerichtet als beim Gesang im Brustregister. Der Abfall der Oktave um 4 kHz nach oben ist im Falsett-Register deutlich schwächer ausgeprägt.

### 3.3.5 Stimmsitze

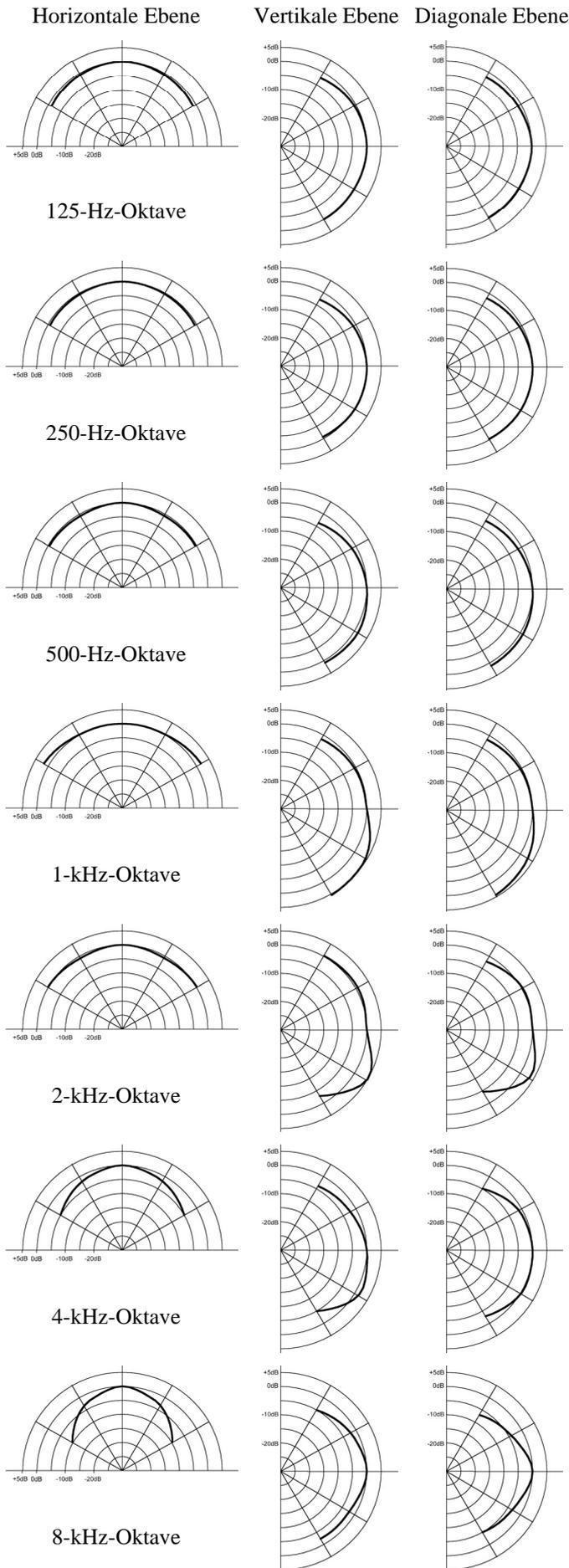
Bei Stimmsitzen handelt es sich um Vibrationsempfindungen des Sängers in verschiedenen Bereichen des Körpers. Diese körperlichen Empfindungen können Sängern eine Feedback bezüglich der Phonation liefern.

So besteht die Möglichkeit bestimmte Einstellungen des Stimmapparates aufgrund dieser Vibrationsrückmeldung zu reproduzieren. Gesangspädagogisch wird tatsächlich zwischen gutem und schlechtem Stimmsitz unterschieden.<sup>6</sup> Ein gut nachvollziehbares Beispiel für das Konzept bieten Nasallaute (z.B. "m"). Beim Summen eines Nasals entstehen deutlich spürbare Vibrationen, zum Beispiel im Nasen-Rachenraum.

Bei den folgenden Beispielen handelt es sich nicht um Obertongesang, wie die Bezeichnung des Sängers vermuten lassen könnte. Eine kurze Untersuchung zum von ihm dargebotenen Obertongesang befindet sich im nächsten Unterkapitel.

---

<sup>6</sup> Vgl.: Seidner, W., u. Wendler, J. , Die Sängerstimme, Henschel Verlag, Berlin 1997, S. 119 f.



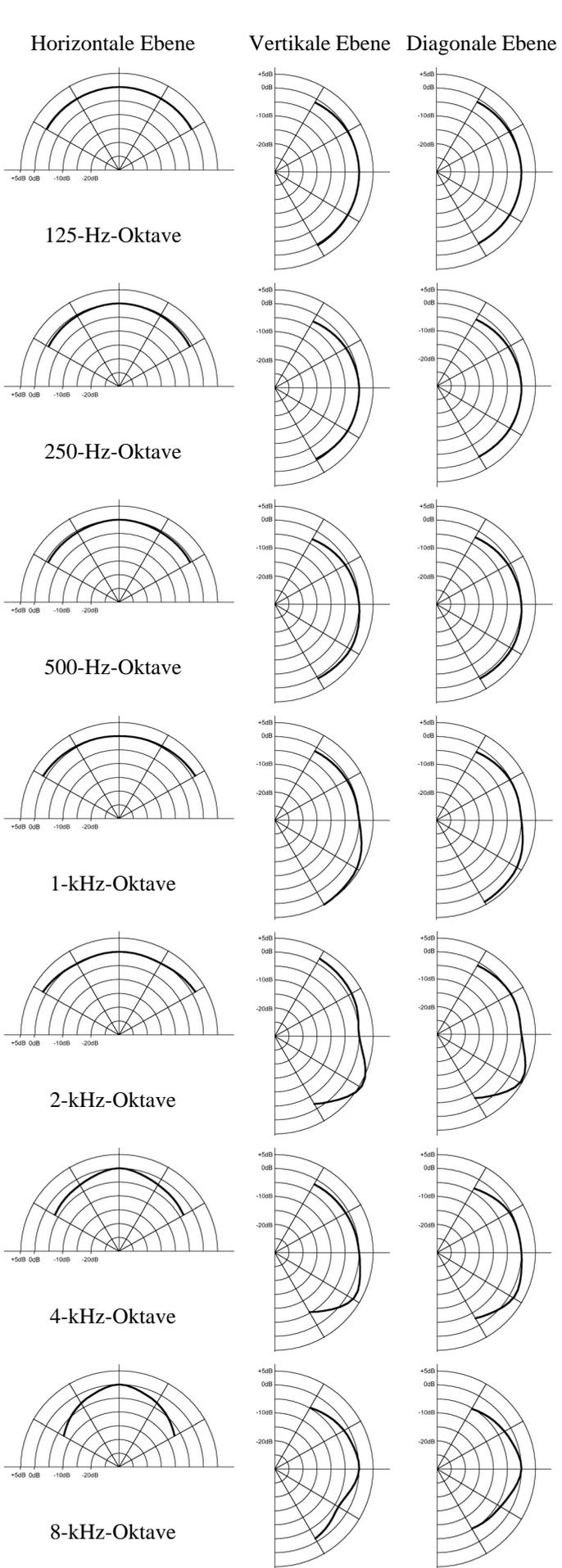
## Richtcharakteristik des "Obertonsängers"

### Gesamtüberblick anhand des Stimmsitzes: Brust

Alle Richtcharakteristiken wurden anhand des Vokals "o", gesungen auf drei Tonstufen (verteilt über den Stimmumfang) ermittelt.

Das Oktavband um 125-Hz zeigt in der Vertikalen und Diagonalen bei allen Stimmsitzen eine leichte Dämpfung bei 60° nach oben. Etwas stärker tritt dieser Effekt in den 250- und 500-Hz-Oktavbändern auf, wiederum etwas schwächer im 1-kHz-Oktavband.

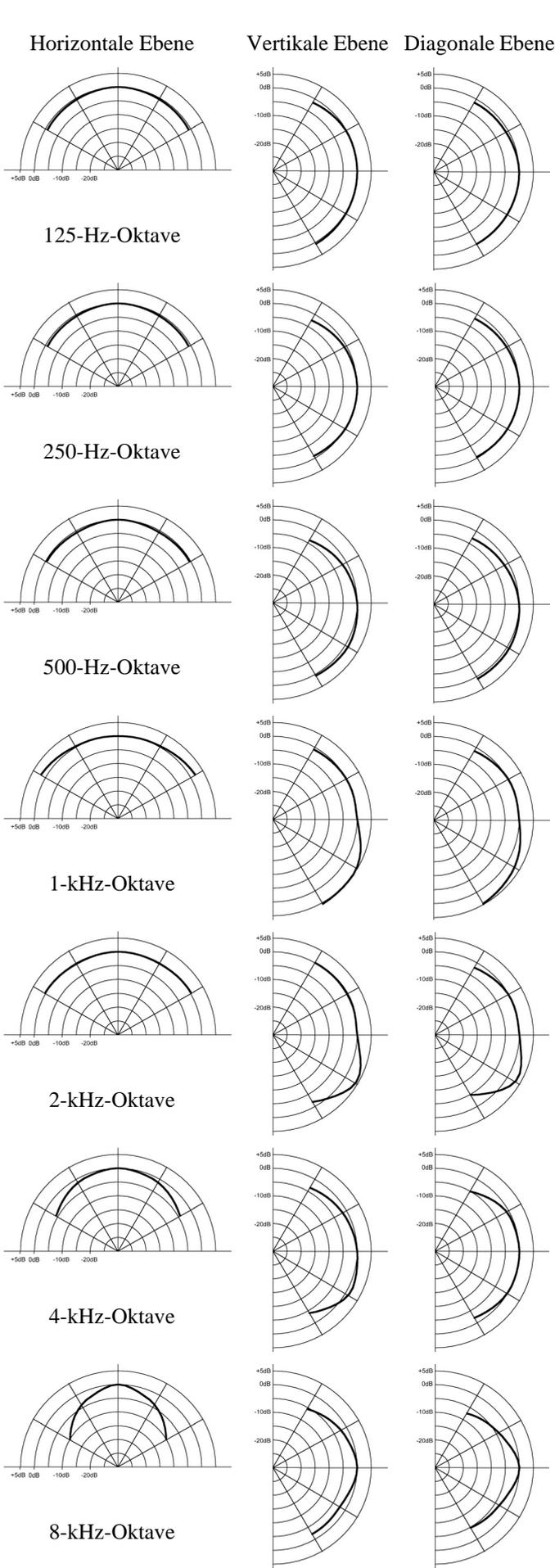
Innerhalb der 500-Hz-Oktave ist bei allen Stimmsitzen eine leichte Verstärkung nach unten erkennbar. Außerdem lässt das 1-kHz-Oktavband durchgängig eine leichte Pegelzunahme in den Extrempositionen der Horizontalen erkennen. Am deutlichsten fällt bei allen Stimmsitzen ein 30° nach unten gerichtetes Maximum in den 1- und 2-kHz-Oktaven auf. In der 1-kHz-Oktave setzt sich dieses Maximum nach 60° unten fort, während die 2-kHz-Oktave dort stark gedämpft gemessen wird. Dieses Phänomen ist als spezielle Richtwirkung des Sängerformanten bekannt. Selbst in der 4-kHz-Oktave ist noch eine leichte Verstärkung zu sehen, ebenso eine starke Richtwirkung in der Horizontalen. In der 8-kHz-Oktave ist die Abstrahlung stark in der Medianebene konzentriert. Der Stimmsitz in der Brust zeigt dabei die deutlichste Richtwirkung bei 0° horizontal.



**Richtcharakteristik**  
**"Obertonsänger" Stimmsitz:**  
**Schädeldecke**

Bei der Anwendung dieses Stimmsitzes wird in der 2-kHz-Oktave das insgesamt stärkste Maximum erzeugt.

In der 4-kHz-Oktave ist an der gleichen Stelle (30° vertikal nach unten) ebenfalls ein Maximum deutlich erkennbar, das bei den anderen Stimmsitzen nicht oder nur schwach auftritt. Gleichzeitig ist die 4-kHz-Oktave in der gleichen Ebene bei 60° nach oben etwas schwächer gedämpft. Im 8-kHz-Oktavband ist bei 30° nach unten in vertikaler Richtung die insgesamt deutlichste Dämpfung erkennbar.



## Richtcharakteristik

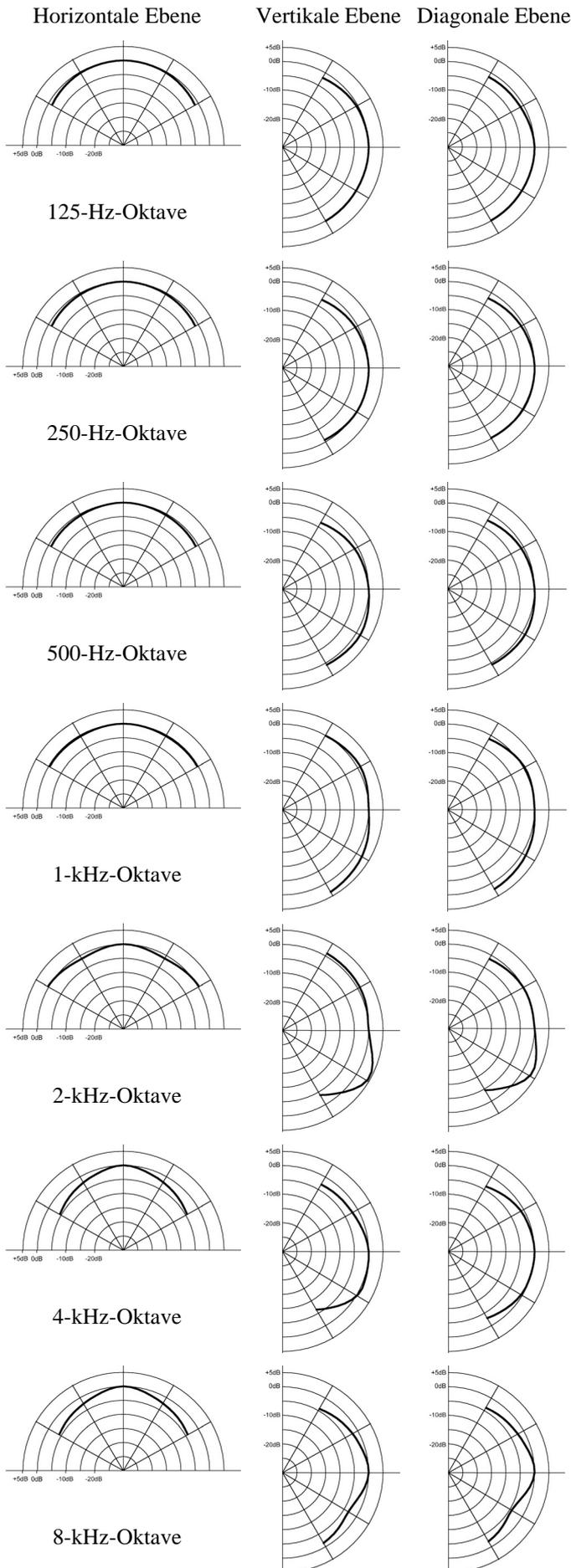
### "Obertonsänger" Stimmsitz: Gaumenplatte

Die genauere Beschreibung lautet: "mit Bestrahlung der Gaumenplatte".

In der Vertikalen Ebene der 500-Hz-Oktave ist bei 60° nach oben, die schwächste Abstrahlung (aller Stimmsitze) zu beobachten.

Ebenso ist "die Bestrahlung der Gaumenplatte" der einzige Stimmsitz, bei dem in der vertikalen Ebene der 2-kHz-Oktave bei 60° nach unten keine starke Dämpfung, sondern sogar eine (hier kaum sichtbare) Verstärkung erfährt.

Im 8-kHz-Oktavband ist wie beim Stimmsitz: Brust eine besonders starke Richtwirkung nach vorn in der Horizontalen zu erkennen.



## Richtcharakteristik "Obertonsänger" Stimmsitz: Nasenzwurzel

Bei diesem Stimmsitz zeigt sich eine leicht erkennbare Dämpfung der seitlichen, horizontalen Abstrahlung in den 125- und 250-Hz-Oktavbändern.

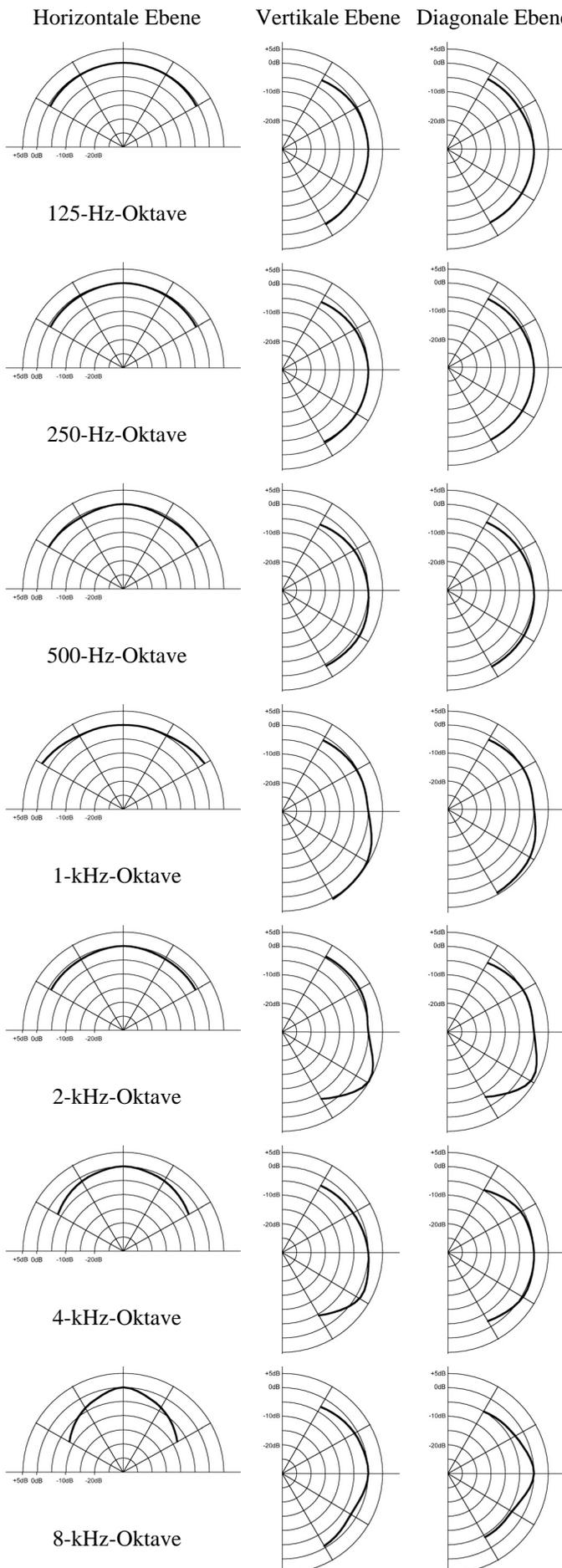
In der 1-kHz-Oktave sind weitere exklusive Ausprägungen zu beobachten. Zum einen geschieht die Abstrahlung dieses Frequenzbandes, im Gegensatz zu der seitlichen Verstärkung bei anderen Stimmsitzen, ungerichtet. Zum anderen erfolgt die Abstrahlung in der vertikalen Ebene bei  $60^\circ$  nach unten gedämpft und bei  $30^\circ$  nach oben leicht verstärkt.

In der 4-kHz-Oktave zeigt sich ganz unten in der Vertikalen die stärkste Dämpfung aller Stimmsitze. Die 8-kHz Oktave ist weniger stark gerichtet als bei den anderen untersuchten Stimmsitzen.

## Richtcharakteristik

### "Obertonsänger" Stimmsitz: Ohren

Bei diesem Stimmsitz zeigte sich lediglich eine deutliche Zunahme der seitlichen Extreme in der Horizontalen des 1-kHz-Oktavbandes.



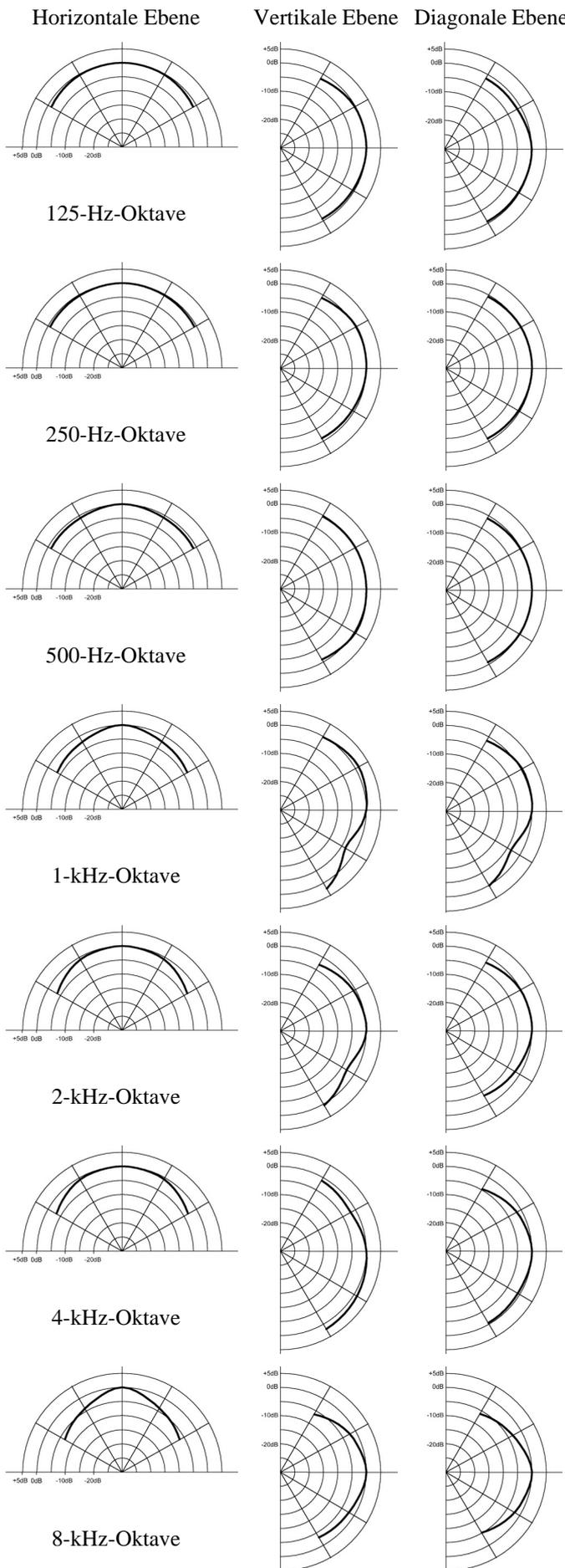
### **3.3.6 Obertongesang**

## Richtcharakteristik

### "Obertonsänger" Obertongesang

Gesungen wurde der Grundton as mit den Obertönen 3 bis 7 (Teiltöne 4 bis 8), diese entsprechen ungefähr den Tonstufen as", c", es", ges" und as". Der gesungene Laut entspricht in etwa einem englisch ausgesprochenen "r".

Im Vergleich zu den konventionell gesungenen Tönen des Sängers, sind keine ähnlich starken Maxima vorzufinden. Eine kleine Tendenz zeigt sich bei der 4-kHz-Oktave in 60° nach unten gerichtet. Die Dämpfung der Oktaven um 1 und 2 kHz nach 30° unten fallen ebenso ins Auge wie die starke Bündelung der 8-kHz-Oktave.



### 3.4 Fazit

Die Ergebnisse für klassisch geformte Stimmen stehen weitestgehend im Einklang mit den im Fernfeld und reflexionsarmen Raum gemessenen Werten von Meyer und Marshall.<sup>7</sup> Die Gerichtetheit des Oktavbandes um 2 kHz – und somit des Sängerformanten – nach unten konnte bestätigt werden. Die Ergebnisse konnten dahingehend ergänzt werden, dass sich das Maximum in der diagonalen Ebene seitlich fortsetzt. Beinhaltet der Gesang jedoch keinen deutlichen Sängerformanten, so nimmt dieses Maximum der 2-kHz-Oktave deutlich ab oder ist gar nicht vorhanden. Dies wurde für Frauenstimmen ebenso gemessen wie für Stimmen, die nicht dem klassischen Stimmideal entsprechen. Deutlich zu sehen ist dieser Effekt auch beim Vergleich des Falsettgesangs mit dem im Brustregister.

Meyer und Marshall maßen die 500-Hz-Oktave im Bereich vor dem Sänger als nahezu radial abgestrahlt. Für die untersuchten klassisch ausgebildeten Sänger war dies jedoch nicht der Fall, eine leichte Zunahme des Frequenzbandes nach unten wurde gemessen. Diese Verstärkung gegenüber der Horizontalen nimmt bei den untersuchten Sängern, die weniger Gesangspraxis oder keine umfangreiche klassische Ausbildung haben, signifikante Werte an.

Ein umgekehrtes Bild zeigt sich bei der Oktave um 1kHz. Bei allen Sängern, die nicht das klassische Stimmideal verfolgen, war eine sehr deutliche Abnahme nach 30° unten zu messen. Beim Gesang mit der Tiefstellung des Kehlkopfes, wie er im klassischen Bereich gelehrt wird, trat anstelle dieses Minimums tendenziell eine Verstärkung. Diese wird bei Meyer und Marshall ebenfalls erwähnt. Bei allen Sängern war jedoch ein leichter Pegelanstieg der Oktave von der Horizontalen nach oben zu messen.

Bei den Vergleichen verschiedener Dynamikstufen konnten Unterschiede gemessen werden. Sie lassen sich jedoch nicht allgemein beschreiben. Die von Meyer und Marshall beschriebene starke Abnahme hoher Frequenzanteile zur Seite hin wurden in keinem der Fälle beobachtet.

---

<sup>7</sup> Marshall, A. H. und Meyer, J., *The Directivity and auditory Impressions of Singers*, in: *Acustica* Nr. 58, F. Hirzel Verlag, Stuttgart 1985, S. 130 ff.

Betrachtet man die untersuchten Konsonanten im Zusammenhang mit den Vokalen, so kann man feststellen, dass sie nicht prinzipiell anders gerichtet sind. In der Horizontalebene findet keine stärkere Richtung statt, die wichtige 4-kHz-Oktave der Reibelaute "s" und "sch" sind seitlich im Vergleich gar weniger gedämpft. Die Hauptabstrahlrichtungen für die hohen Spektralanteile der untersuchten kurzen Konsonanten "p", "t", sowie des "s" befinden sich nach 30° oben und unten in der vertikalen Ebene. Es ist anzunehmen, dass eine Aufnahme aus diesen Winkeln der Silbenverständlichkeit und Brillanz zuträglich ist. Dunkle Konsonanten, wie das untersuchte Zungen-"r" und "m" zeigen sich in ihren wesentlichen Signalanteilen nach unten gerichtet. Ist es gewünscht, "s"-Laute nicht überzubetonen, ist eine von der Medianebene abweichende Mikrofonposition vorzuziehen.

Grundsätzlich bieten sich für Stimmaufnahmen Mikrofone in der Medianebene oder symmetrisch dazu an, da die hohen, in der 8-kHz-Oktave enthaltenen, Anteile die stärkste seitliche Dämpfung erfahren. Besonders deutlich kam dies beim Falsettgesang zutage. Aufnahmen aus seitlichen Richtungen klingen dementsprechend dumpfer als solche von vorn.

Die Untersuchung des Gesangs im Vibrato zeigte annähernd keine Unterschiede gegenüber den Resultaten für Gesang ohne Vibrato. Der Vergleich zwischen den Einsätzen verschiedener Stimmsitze zeigte ebenso keine nennenswerte Unterschiede auf. Die gesangspädagogisch oft geschulte Vibrationsempfindung und -steuerung äußert sich mitunter im Stimmklang, stehen jedoch nicht in direkter Verbindung zur Richtwirkung des Sängers.

Verstärkt ein Sänger die im Stimmklang enthaltenen Obertöne durch Mundraumresonanzen, so zeigen die Richtdiagramme keine außergewöhnlichen Eigenschaften.

## Literatur- und Webhinweise

Friedrich, G., Bingen Zahn, W. und Zorowka, P. *Phoniatrie und Pädaudiologie*, Verlag Hans Huber, Bern 2000

Haeflinger, E., *Die Singstimme*, Hallwag Verlag, Bern 1983

Kob, M., *Physical Modeling of the Singing Voice* (Diss.), [http://sylvester.bth.rwth-aachen.de/dissertationen/2002/132/02\\_132.pdf](http://sylvester.bth.rwth-aachen.de/dissertationen/2002/132/02_132.pdf), Seitenaufruf vom 20.03.2004

Kob, M. und Jers, H., Directivity measurement of a singer, [http://www.akustik.rwth-aachen.de/~malte/papers/singer\\_directivity.pdf](http://www.akustik.rwth-aachen.de/~malte/papers/singer_directivity.pdf), Seitenaufruf vom 24.01.2004

Marshall, A. H. und Meyer, J., *The Directivity and auditory Impressions of Singers*, in: *Acustica Nr. 58*, F. Hirzel Verlag, Stuttgart 1985

Meyer, J., *Akustik und musikalische Aufführungspraxis*, Verlag Erwin Bochinski, Frankfurt am Main 1999

Seidner, W. und Wendler, J., *Die Sängerstimme*, Henschel Verlag, Berlin 1997

Sundberg, J., *Die Singstimme*, Orpheus-Verlag, Bonn 1997

Hörbeispiele für Aufnahmen aus verschiedenen Winkeln sind als Download unter <http://www.myelvis.de> verfügbar.