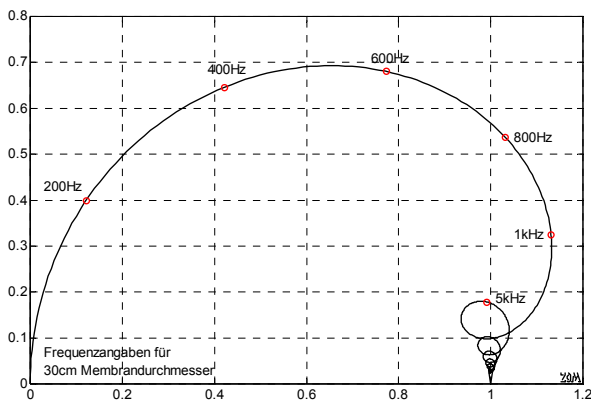


11.10 Horn-Lautsprecher

Die klassische Gitarrenbox hat kein Horn – in der PA und im Regieraum eines Tonstudios können Horn-Lautsprecher aber durchaus zur Anwendung kommen. Um den erschreckend schlechten Wirkungsgrad zu erhöhen, und um die Richtcharakteristik zu modifizieren. Weil beim Studio-Lautsprecher nur bestenfalls 3% der vom Verstärker erzeugten Leistung in Schall umgewandelt wird (Kap. 11.5), gab es schon sehr früh Versuche zur Verbesserung der Anpassung [Olsen]. Die akustische Quellimpedanz der Membran ist ja relativ groß, die der Last klein, da würde man in der Elektrotechnik einen Transformator bemühen – und in der Akustik eben ein Horn.



$$\underline{Z}_{Ko} = \underline{p}/\underline{v} = Z_0 \cdot [R(2ka) + jX(2ka)]$$

$$R(2ka) = 1 - 2 \frac{J_1(2ka)}{2ka}, \quad J_1 = \text{Besselfunktion}$$

$$X(2ka) = 2 \frac{H_1(2ka)}{2ka}, \quad H_1 = \text{Struvesche Funktion}$$

$$2ka = 4\pi a f / c, \quad a = \text{Membranradius}$$

Abb. 11.108: Normierte Strahlungsimpedanz einer Kolbenmembran [3].

In **Abb. 11.108** ist die komplexe Strahlungsimpedanz $R + jX$ dargestellt. Mit $Z_0 = 414 \text{ Ns/m}^3$ multipliziert ergibt sie die Schallfeldimpedanz $\underline{p}/\underline{v}$ für eine kreisrunde ebene Membran, eine erste Näherung für die Lautsprecher-Belastung durch die angrenzende Luft [3]. Unter 450 Hz ist die Membranbelastung überwiegend imaginär, die Membran schiebt Luft hin und her, ohne dass viel Wirkleistung als Welle abgestrahlt wird. Über 450 Hz überwiegt zwar der Realteil, gleichzeitig beginnt aber ab dieser Grenze der Lautsprecher zu bündeln. Durch einen Hornvorsatz vor der Membran wird tieffrequent der Realteil der Belastung vergrößert, und damit der Wirkungsgrad verbessert. Im Tieftonbereich erfordert diese Lösung jedoch sehr große Hörner, weswegen die Mehrzahl der Hornsysteme im Mittel- und Hochtonbereich arbeitet.

Für erste Betrachtungen ist es zweckmäßig, den Hornquerschnitt kreisförmig anzunehmen (Berechnung über Zylinderkoordinaten). Günstige Abmessungen liefern die **hyperbolischen Hörner**, bei denen der Querschnittsradius $r(z)$ ab dem "Trichterhals" über z wächst:

$$r(z) = r_{TH} \cdot \left(\cosh \frac{\varepsilon \cdot z}{2} + M \cdot \sinh \frac{\varepsilon \cdot z}{2} \right)$$

Hierbei ist z die Distanz vom Trichterhals (Radius r_{TH}), M ist ein Formfaktor, die Trichterkonstante ε gibt an, wie schnell der Radius über z wächst. Mit $M = 1$ erfolgt der Flächenwuchs nach einer Exponentialfunktion (Exponentialhorn), mit $M = 0$ nach einer Kettenlinie (Katenoidhorn). Beim Exponentialhorn wächst die (ebene) Querschnittsfläche exponentiell: $S(z) = S_{TH} \cdot \exp(\varepsilon z)$, mit Halsfläche S_{TH} . Aus der Trichterkonstante ε ergibt sich eine untere **Grenzfrequenz** für die Wellenausbreitung im Trichter, $f > \varepsilon c / 4\pi$, aus der Mündungsfläche (Mündungsradius R) eine weitere Grenzfrequenz für optimale Anpassung $f > c / \pi R$. Wenn die Mündungs-Grenzfrequenz zu hoch ist, entstehen u.U. störende Reflexionen im Horn.

In **Abb. 11.109** ist für drei verschiedene Hörner der Querschnittsverlauf über z dargestellt, sowie der logarithmierte Realteil der akustischen Lastimpedanz ($0 \text{ dB} = Z_0$); zum Vergleich enthält das rechte Bild auch den Fall ohne Horn (rote Kurve). Für die Lastberechnung im rechten Bild wurde die Hornlänge zu unendlich angenommen, um Reflexionen und stehende Wellen auszuschließen. Bei endlichen Hornlängen wird ein Teil der zur Mündung laufenden Welle dort reflektiert; je kleiner die Mündungsfläche, desto stärker die Reflexion. In **Abb. 11.110** sind zwei Fälle mit identischer Wellen-Grenzfrequenz, aber unterschiedlicher Mündungs-Grenzfrequenz dargestellt. Optimal ist ein Mündungswinkel von ca. 90° .

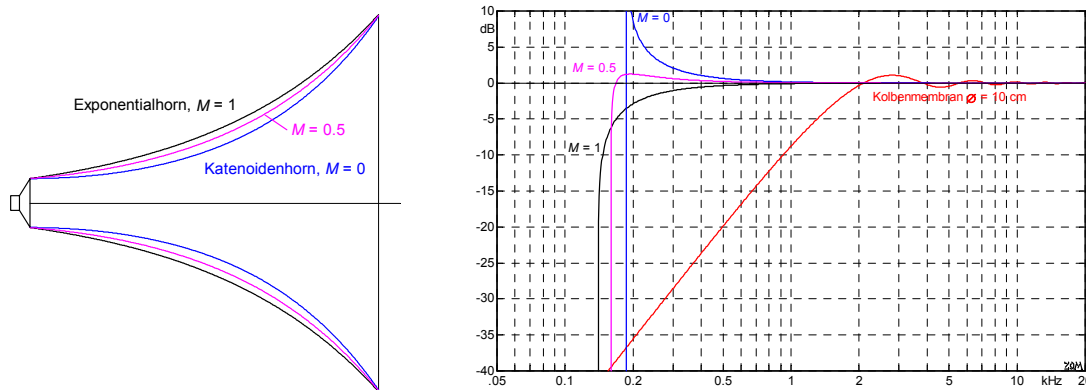


Abb. 11.109: Querschnittsverlauf (links) und Membranbelastung bei verschiedenen Hörnern, Halsradius = 5 cm.

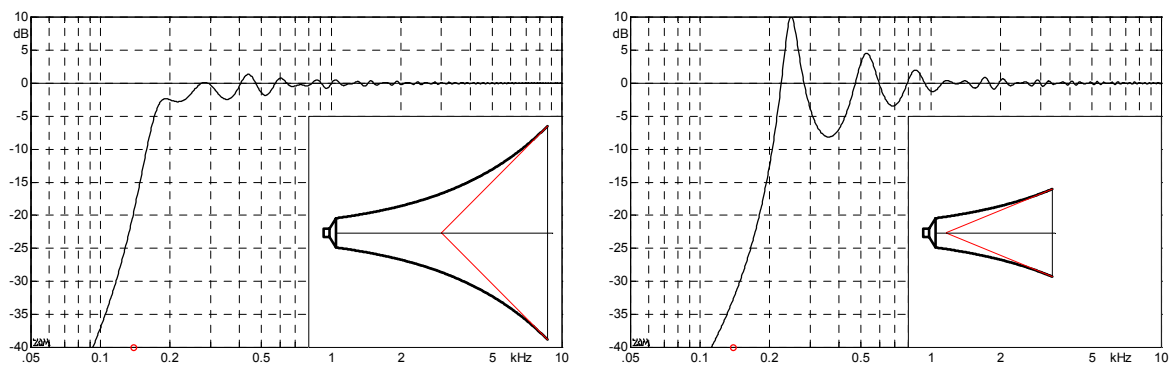


Abb. 11.110: Logarithmierter Realteil der Membranbelastung für zwei verschiedene Hornlängen; gleiches ε .

Zur Berechnung ist die kreisförmige Querschnittsfläche ein erster Ansatz, in der Realität wächst der Querschnitt aber meistens von der runden Halsfläche zu einer rechteckigen Mündungsfläche; hiermit lässt sich in der vertikalen Ebene eine andere Richtcharakteristik erzeugen als in der horizontalen. Ein Maß für die Abstrahlung ist der **Öffnungswinkel** Φ , der aber, wie **Abb. 11.111** zeigt, in seiner Aussagekraft doch sehr begrenzt ist: trotz gleichen Winkels können sich die Richtdiagramme zweier Lautsprecher deutlich unterscheiden.

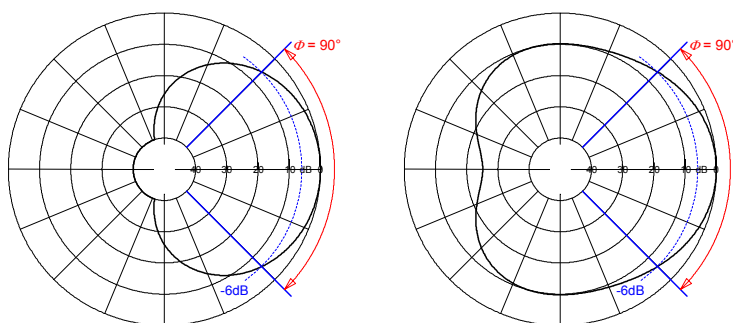
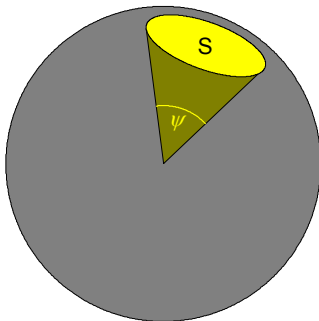


Abb. 11.111: Richtdiagramme: Unterschiedlicher Richtfaktor bei gleichem Öffnungswinkel

Neben dem Öffnungswinkel (engl. *Beamwidth*), der einen Einzahlwert für das Bündelungsverhalten einer Ebene darstellt, gibt das **Bündelungsmaß** (engl. *Directivity Index*) einen Mittelwert über alle Richtungen. Formal ist der quadrierte Richtungsfaktor Γ räumlich über eine die Quelle umschließende Hüllfläche zu integrieren und (reziprok) auf diese Hüllfläche zu beziehen [3]. Der hierdurch entstehende **Bündelungsgrad** γ wird logarithmiert zum Bündelungsmaß d . Im einfachsten Fall nimmt man als Hüllfläche eine Kugel mit Oberfläche $HF = 4\pi r^2$.

$$\gamma(\omega) = \frac{HF}{\iint_{HF} \Gamma^2(\omega) \cdot dHF} \quad d = 10 \lg(\gamma) \text{ dB} \quad HF = \text{Hüllfläche}$$

Als Beispiel sei angenommen, dass eine Quelle kegelförmig in einen Kugelsektor strahlt, mit Zentrumswinkel ψ (**Abb. 11.112**) und Kalottenfläche S . Für $\psi = 180^\circ$ (Halbraum) ergibt sich dann ein Bündelungsgrad von $d = 3 \text{ dB}$, für $\psi = 60^\circ$ erhält man $d = 11.7 \text{ dB}$.



$$\gamma = \frac{4\pi \cdot r^2}{S} = \frac{2}{1 - \cos(\psi/2)}$$

Abb. 11.112: Bündelung beim Kegelstrahler.

Die ersten Rechteckhörner, die in großer Zahl hergestellt wurden, waren **Radialhörner**. Bei ihnen wächst die Horizontalabmessung linear, die Vertikalabmessung muss dann die für einen exponentiellen Flächenzuwachs nötige progressive Vergrößerung erbringen (**Abb. 11.113**). Mit einer derartigen Geometrie wird horizontal ein einigermaßen frequenzunabhängiger Öffnungswinkel erreicht – auf Kosten der vertikalen Bündelung. Spätere Entwicklungen (wie etwa das sog. Mantaray-Horn von Altec Lansing, **Abb. 11.113**) ermöglichten, statt des horizontalen Öffnungswinkels das Bündelungsmaß frequenzunabhängig zu gestalten. Nicht perfekt, und auch nicht im gesamten Frequenzbereich, aber ab einer empfohlenen Grenzfrequenz mit erträglichen Variationen. Nach Altec Lansing entwickelten auch andere Hersteller Hörner mit ungefähr frequenzunabhängigem Bündelungsgrad (JBL, Electro Voice, u.a.). Bei tiefen Frequenzen, wenn die Wellenlänge groß gegenüber den Hornabmessungen ist, bündeln alle Hörner wenig – erst mittel-/hochfrequent wird die spezifizierte Bündelung erreicht.

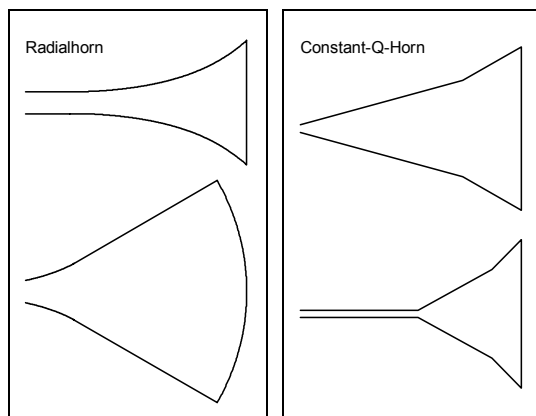


Abb. 11.113: Radialhorn und Constant-Q-Horn; vertikale (oben) und horizontale Querabmessungen.

Abb. 11.114 stellt das Bündelungsverhalten eines Radialhorns [D.B. Keele, AES Prep. 1083] dem eines Constant-Q-Horns [JBL 2356A] gegenüber. Der Directivity-Index (also DI bzw. d) nimmt beim Radialhorn zwischen 500 Hz und 15 kHz um 10 dB zu. Einerseits hilfreich, weil der Leistungsfrequenzgang typischer Horntrieber ab ca. 2 kHz abfällt, andererseits unschön, weil davon nur der Direktschall, nicht der Diffusschall profitiert [3].

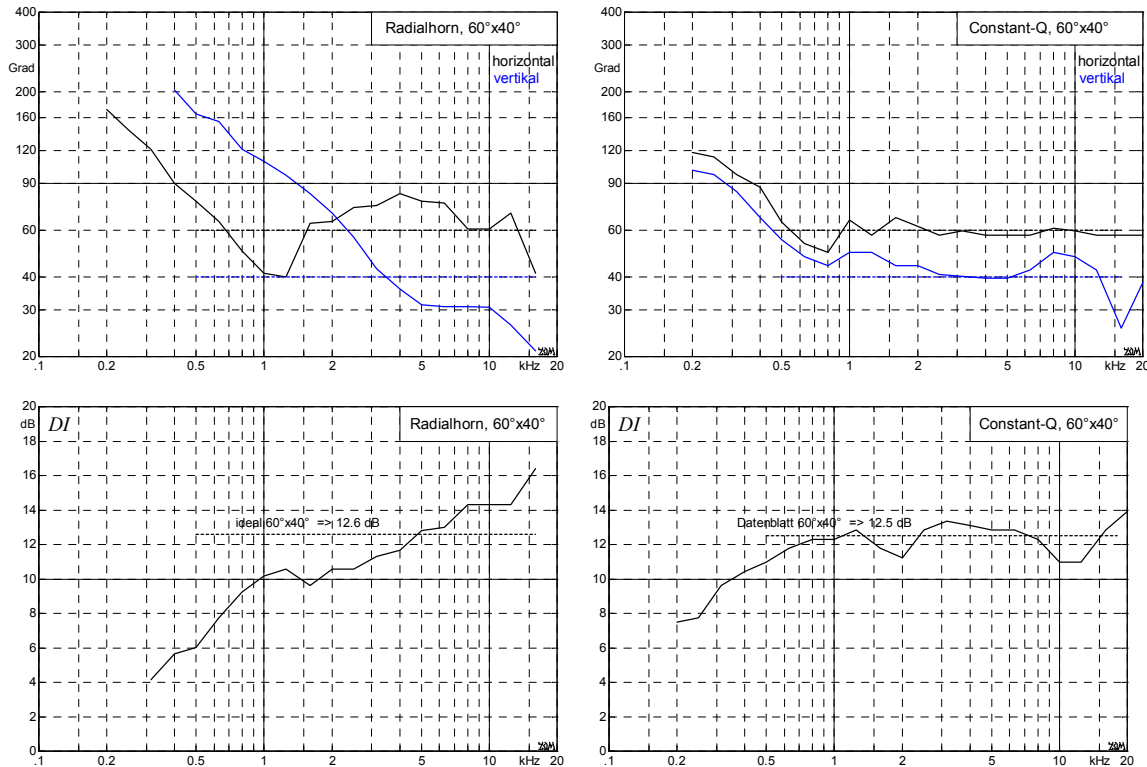
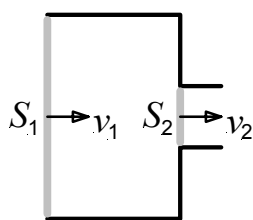


Abb. 11.114: Öffnungswinkel und Bündelungsmaß (DI) bei zwei verschiedenen Hörnern. Das Radialhorn wurde im Datenblatt als 60°x40°-Horn vermarktet, was insbesondere bei der vertikalen Bündelung mutig ist.

Bei Mittel- und Hochtonhörnern sitzt das Horn nicht direkt auf der Membran auf, stattdessen verbindet beide eine **Druckkammer** (**Abb. 11.115**). Unterstellt man ortsunabhängigen Druck, liefert die Kontinuitätsbedingung ($q_1 = q_2$) den Zusammenhang zwischen Membran (Index 1) und Hornbeginn (Trichterhals, Index 2): Die Lastimpedanz wird um das Flächenverhältnis vergrößert. In der Praxis hat die Druckkammer aber keine Zylinderform, sondern ist als sog. **Phasenausgleichskeil** (engl. *Phase plug*) ausgebildet. Hiermit vermeidet man wegabhängige Interferenzen. Antrieb und Membran werden zum **Treiber** zusammengefasst, auf den Hörner mit unterschiedlichem Bündelungsverhalten aufgeschraubt werden können. Um für den Treiber unabhängig vom Horn Daten angeben zu können, montiert man ihn auf eine "**Plane Wave Tube**" (PWT); das ist ein bis zu 6 m langes Rohr, in dem sich Wellen reflexionsfrei ausbreiten können. Die Rohr-Eingangsimpedanz ist näherungsweise reell, $p/v = 414 \text{ Ns/m}^3$.



$$p = \text{const}$$

$$q = v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2$$

$$Z_1 = \frac{F_1}{v_1} = \frac{S_1}{S_2} \cdot Z_2$$

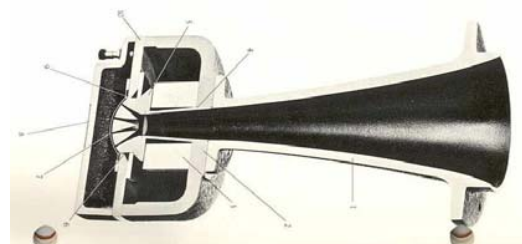


Abb. 11.115: Druckkammer. Foto: Lansing-Heritage

Abb. 11.116 zeigt einen typischen PWT-Frequenzgang. Der Treiber (JBL 2451) wurde zur Messung an eine 1.5"-PWT montiert (im Datenblatt wird allerdings eine 1"-PWT angegeben). Bei mittleren Frequenzen erreicht dieser Treiber einen elektroakustischen **Wirkungsgrad** von 30%, ab 3 kHz verschlechtert sich jedoch die Kopplung, so dass um 10 kHz nur mehr 3% erreicht werden. Was ja auch nicht schlecht ist. Montiert man an diesen Treiber ein Radialhorn, so sorgt dessen über der Frequenz zunehmende Bündelung für eine teilweise Kompensation des Höhenabfalls – zumindest beim vor dem Lautsprecher erzeugten Direktschall. Auf den Diffusschall hat (nach den Regeln einfacher Raumakustik) die Bündelung keinen Einfluss. Die Hersteller empfehlen, die schwachen Höhen durch Filter (Equalizer, EQ) auszugleichen, was aber nur in Maßen gelingt: Eine Anhebung um 10 dB verzehnfacht die Leistung!

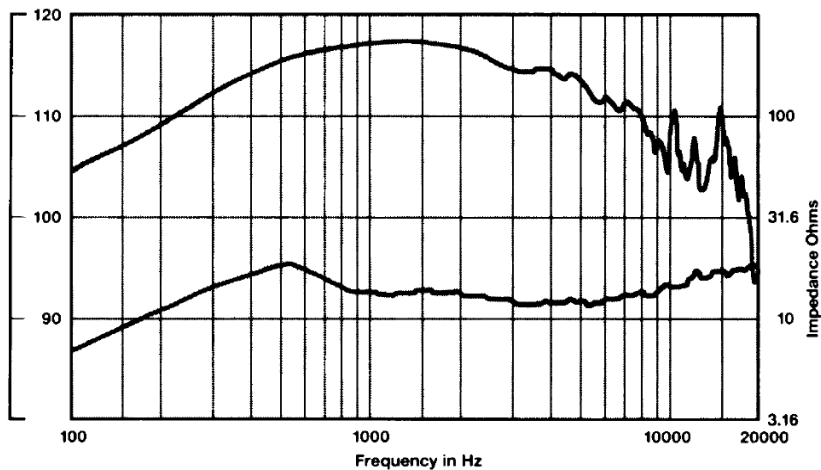


Abb. 11.116: Leistungsfrequenzgang und Impedanz eines an eine PWT montierten Treibers [JBL 2451]. Die Ordinate spezifiziert den mit $P_{ak} = 1mW$ in der PWT erreichbaren SPL in dB. Da die akustische Belastung reell ist, kann vom Schalldruck direkt auf die Schallleistung umgerechnet werden: $P = p^2 \cdot S/Z_0$.

Abb. 11.117 zeigt zwei weitere Hörner: mit akustischer Linse, und mit Trennstegen im Horn. Die extreme Vertikalbündelung der Linse war an deren Aussterben sicher nicht unbeteiligt. Das Smith-Horn ist eine Art Multicell-Horn, aber mit geschlossenem Boden und Deckel.

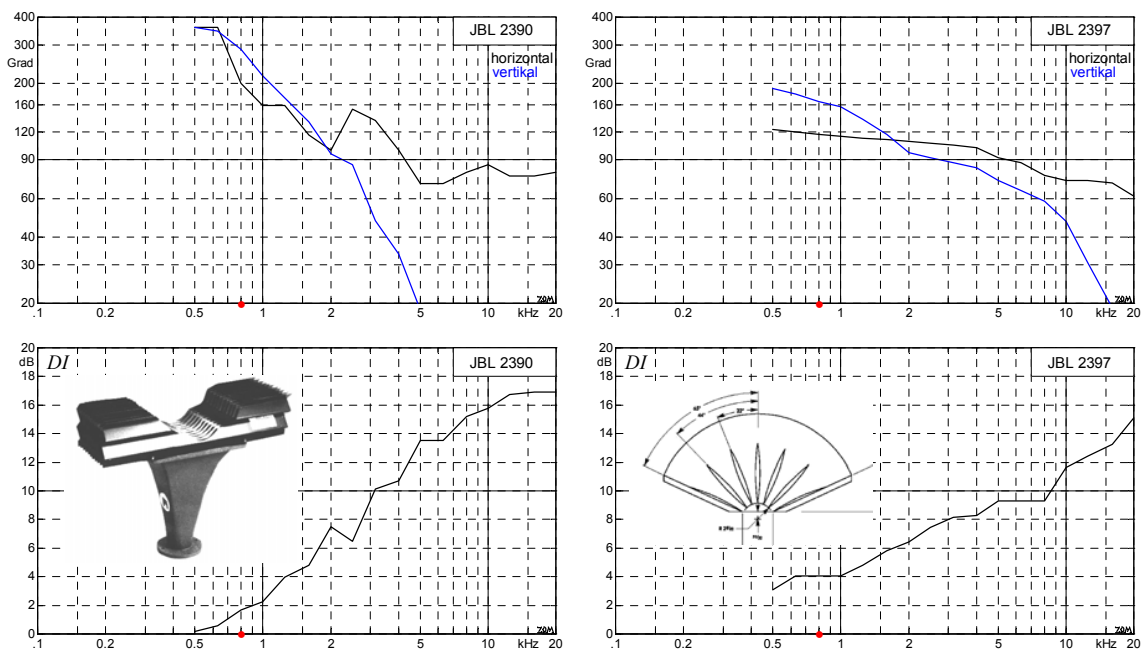


Abb. 11.117: Bündelung bei einer JBL-Linse (links) und beim sog. Smith-Horn (rechts).