

11.5 Wirkungsgrad und maximaler Schallpegel

Ist ein 100-W-Lautsprecher doppelt so laut wie ein 50-W-Lautsprecher? Eine häufig gestellte Frage – ein häufiges Missverständnis. Die Watt-Angabe eines Lautsprechers besagt lediglich, welche maximale Leistung dieser Lautsprecher aufnehmen darf, sie ist keine Aussage über die abgegebene Leistung. Wenn man in ein Lautsprechergehäuse vier 100-W-Glühlampen einbaut, darf man "400-W-Box" draufschreiben – viel Schall entsteht dabei aber noch nicht.

Streng genommen müsste man bei der aufgenommenen Leistung nach Wirk-, Blind- und Scheinleistung unterscheiden, die Praxis vereinfacht hier aber: Jedem Lautsprecher sollte vom Hersteller ein **Nennwiderstand** R zugewiesen werden (z.B. $16\ \Omega$), und daraus ergibt sich, zusammen mit der Maximalleistung, die **Maximalspannung**: $U = \sqrt{P \cdot R}$. Ein $16\text{-}\Omega$ -Lautsprecher, dessen Maximalleistung $100\ \text{W}$ beträgt, darf mit einer maximalen Effektivspannung von $40\ \text{V}$ betrieben werden. Hierbei sind aber noch Einschränkungen zu beachten: $40\ \text{V}$ Gleichspannung dürfen nicht anliegen, obwohl auch hiermit gerade $100\ \text{W}$ erreicht werden – aber sie würden den Lautsprecher zerstören. (Für Gleichspannungsbetrieb geben die Hersteller gar keine Grenzwerte an). Typisch wären bei einem Gitarrenlautsprecher Gitarrentöne, jedoch ist diese Signaldefinition zu allgemein. Als Kompromiss wählt man deshalb häufig speziell gefilterte Rauschsignale, z.B. das **EIA-Rauschen** (RS-426-A, RS-426-B), oder das **IEC-268-1-Rauschen**, oder das **AES-2-1984-Rauschen**, oder das **DIN-45573-Rauschen**, oder andere, speziell definierte Signale. Die dann (je nach Spezifikation) 8 oder 100 oder 300 Stunden auf den Lautsprecher einwirken müssen, ihn aber nicht zerstören dürfen. Hält der Lautsprecher z.B. $100\ \text{W}$ gemäß einer dieser Normen aus, schreibt der Vertrieb $100\ \text{W}$ drauf. Oder $200\ \text{W}$. Denn auch das gibt es: Weil im praktischen Betrieb die Belastung angeblich geringer ist, wurde "CONTINUOUS PROGRAM POWER" definiert, eine Leistungsangabe, die um 100% über den mit Rauschen ermittelten Grenzleistungen liegt. Man sieht: Leistungsangaben sind firmenspezifisch, sie erschließen sich nicht mit $U=RI$ und $P=UI$. Das ist ähnlich wie bei Endstufen: Sagt der französische Hersteller auf der Frankfurter Musikmesse leicht genervt auf die Frage, warum sein mit $90\ \text{W}$ spezifizierter Verstärker nur $55\ \text{W}$ bringt: "Das sind französische Watt." Ah oui, naturellement.

Auch der **Nennwiderstand** eines Lautsprechers erschließt sich dem Suchenden nicht auf den ersten Blick. Ist's der Gleichstromwiderstand, der Minimal-, der Maximalwiderstand? Nein, keiner dieser drei. Die Impedanz $Z(f)$, also der Betrag des komplexen Widerstandes, hängt beim Lautsprecher stark von der Frequenz ab: Bei $0\ \text{Hz}$ beträgt Z z.B. $6.5\ \Omega$, bei der Resonanz ($110\ \text{Hz}$) steigt Z auf z.B. $75\ \Omega$, bei $300\ \text{Hz}$ werden fast wieder $6.5\ \Omega$ erreicht, ab dann nimmt Z zu hohen Frequenzen hin kontinuierlich zu* (**Abb. 11.51**). Mit einem Einzahlwert lässt sich diese Kurve nicht spezifizieren, deshalb entwickelt jeder Hersteller eine (andere?) Methode, um zu *einem* Wert zu gelangen. Da wird z.B. der Impedanzwert bei $1\ \text{kHz}$ genommen. Warum gerade $1\ \text{kHz}$? Weil das eine häufig verwendete Normfrequenz ist. Oder bei $800\ \text{Hz}$. Weil da die empfohlene Übernahmefrequenz liegt. Oder bei $400\ \text{Hz}$, man will sich ja vom Wettbewerb distanzieren. Oder man schreibt gleich aufs Etikett: "Impedanz $4 - 8\ \Omega$ ". Was nun nicht heißt, dass die Impedanz dieses Lautsprechers zwischen 4 und $8\ \Omega$ liegt, sondern dass er für Verstärker empfohlen wird, die ihrerseits Lautsprecher mit Impedanzen von 4 oder $8\ \Omega$ empfehlen. Ah ja. Da verwundert es auch nicht mehr, wenn bei den Janz Besonderen Lautsprechern unumwunden zugegeben wird: "The JBL 2215B Professional Series Loudspeaker is rated as $16\ \Omega$, while the LE15A Home Loudspeaker, which is the same unit, carries an $8\text{-}\Omega$ -rating". Thanks a lot, damit wären nun sowohl die erlaubte Maximalleistung als auch die Impedanz präzise definiert, und ein jeder kann hieraus die erlaubte Maximalspannung ausrechnen. Und bei Rauchzeichen empfiehlt JBL: Turn it down!

* Gehäuse- und Membranresonanzen siehe Kap. 11.3 und 11.8.

Wann geht eigentlich ein Lautsprecher kaputt? Die häufigsten Ausfallursachen sind zu hohe Schwingspulentemperatur (zu hohe Wirkleistung), oder zu große Membranauslenkung. Wo bei diese beiden Effekte sich gegenseitig beeinflussen können: Große Membranauslenkung sorgt u.U. für verstärkte Kühlung der Schwingspule und ermöglicht eine etwas höhere Grenzleistung. Da bei Stromeinprägung die Auslenkung oberhalb der Resonanzfrequenz näherungsweise mit $1/f^2$ fällt, sind große Auslenkungen nur im Bassbereich zu finden – dies ist ein Grund, warum die Resonanzfrequenz des Gitarrenlautsprechers nicht bei 20 Hz, sondern bei 80 – 110 Hz liegt. Ein anderer Grund ist, dass man als Gitarrist nicht dem E-Bass in die Quere kommen möchte – dieser ist nun mal für das Low-End prädestiniert. Was aber nicht heißt, dass der Gitarrist damit generell dem High-End-Bereich zuzuordnen wäre.

Dem Musiker wird es in der Regel egal sein, was genau seinen Lautsprecher zerstört hat, nachdem er "das Volume" von 5 auf 10 aufgedreht hat. Aufdrehen *musste*, weil er sonst nicht mehr gehört worden wäre (die Keys waren nämlich kurz zuvor ebenfalls auf 10 gegangen). Und nun ist der Speaker kaputt, überlastet, wie der Roadie fachkundig attestiert. Das passiert, wenn der Verstärker mehr Leistung liefert, als der Lautsprecher verkraften kann. Und wie viel verkraftet der Lautsprecher? Das hatten wir schon, siehe oben. Andere Frage: Wie viel liefert eigentlich der Verstärker? Zumindest dieser Wert müsste sich doch mit ausreichender Genauigkeit messen lassen? Im Prinzip schon, aber: Beim Gitarrenverstärker wird oft auf Gegenkopplung verzichtet, eine Leistungsangabe bei z.B. 1% Klirrfaktor macht da keinen Sinn. Stattdessen wird häufig einfach die Verstärkung bis zum sichtbaren Clipping erhöht, und daraus wird ein Leistungswert berechnet. Gerne bei 1 kHz, gerne am Nennwiderstand. Welche Ausgangsleistung der Verstärker an einen realen Lautsprecher abgeben kann, was er insbesondere bei Übersteuerung erzeugt, bleibt unbekannt. Und so schreibt dann der Service-Techniker im Internet, er habe noch nie einen 100-W-Marshall gesehen, der 100 W erzeugt hätte; das waren immer 140 W, oder sogar 160 W. Andererseits kämpft sich aber auch die Frage nach oben, wie denn ein AC-30 mit seiner kontinuierlich überlasteten Endstufe 30 W erzeugen könne, wo doch die EL84 im Quartett nur mit 24 W spezifiziert ist. Halten wir also fest: Sowohl die erzeugte Verstärkerleistung, als auch die Lautsprecherbelastbarkeit könnten mit guter Genauigkeit gemessen werden – der Markt hat aber seine eigenen Standards gefunden, die "nicht immer" mit Messtechnik-Normen übereinstimmen.

Der Markt – das ist der Schlüssel zum Verständnis. Fenders Pro-Reverb hatte 40 Watt, das waren 5 Watt mehr als beim Vibrolux. Celestions G-12-Lautsprecher erhielten Ende der 60er den dringend erwarteten Leistungsschub von 25 auf 30 W. Endlich erwachsen! Man erkennt Parallelen zum Automarkt: Der 220er ist doch schon ganz was anderes als der 219er. Einerseits gibt es also klassifizierende Leistungsangaben, die einen 10%-igen Unterschied als relevant hinstellen – andererseits scheinen Unterschiede von 50% und mehr im Bereich reiner Willkür zu liegen. Man kann sich des Eindrucks nicht erwehren, dass der Vertriebsleiter vor der großen Musikmesse noch schnell die Reparaturstatistik studiert, und wenn dann der 12-50 fast keine Ausfälle zeigt, erhält er statt des grauen ein rotes Cover und mutiert zum 12-65-S. Wie meinte schon Cicero: O Tempora, o Mores (Wo ein Markt ist, ist auch ein Weg). Das soll nun nicht heißen, dass Leistungssteigerungen ausschließlich im Prospekt stattfinden. Von den 12 W der ersten 1,25"-Papier-Schwingspulenträger zu über 200W bei 3"-Polyimid-Trägern hat schon eine mächtige Entwicklung stattgefunden. Die im Einzelfall aber hinterfragt werden muss: Der Vintage-30 (12", 60 W) wird mit 100 dB "average Sensitivity" angegeben, der Powercell 12-150 (12", 150 W) mit 94 dB. Merke: "6 dB weniger" bedeutet, dass bei gleicher Leistungszufuhr nur mehr 1/4 der Schallleistung rauskommt. Für gleiche Leistungsabgabe müsste man dem Powercell also 240 W zuführen. Das ist jenseits des Power-Limits, also lieber zwei davon kaufen. Powercell? Eher Powersell!

Verbleiben wir noch einen Moment beim Begriff "**average Sensitivity**". Es besteht – eher unüblich für die Branche – Einigkeit, dass man hiermit den Schallpegel spezifiziert, der in 1 m Entfernung mit 1 W elektrischer Leistung erzeugt werden kann. Allerdings: Dieses eine Watt wird nicht wirklich erzeugt, stattdessen legt man die Spannung an den Lautsprecher, die am realen Nennwiderstand 1 W erzeugen würde ($4 V_{\text{eff}}$ bei 16Ω). Hat der Lautsprecher nicht 16, sondern nur 12Ω , bekommt man allein dadurch 1.25 dB geschenkt (was im Prospekt aus mickrigen 99 dB stattliche 100 dB macht). Und über welchen Frequenzbereich zu mitteln ist, wird im Zweifelsfall firmenspezifisch definiert. Lassen wir einen Hersteller zu Wort kommen:

*The Sensitivity represents one of the most useful specifications published for any transducer. It is a representation of the efficiency and volume you can expect from a device relative to the input power. Gut so – das musste mal definiert werden. Weiter im Text geht's allerdings mit: Loudspeaker manufacturers follow different rules when obtaining this information – there is not an exact standard accepted by the industry. Ah ja. Verlassen wir also die Welt der Datenblätter und betrachten, was die theoretische **Elektroakustik** bietet. Eine Kugelquelle, die im freien Schallfeld in 1 m einen Schallpegel von 100 dB erzeugt, produziert eine Schallleistung von ca. 126 mW [3]. Gitarrenlautsprecher erreichen diese 100 dB @ 1m schon bei ca. 1 W Leistungsaufnahme, ihr Wirkungsgrad wäre damit 12.6% – wenn denn die Abstrahlung kugelförmig wäre. Im relevanten Frequenzbereich ist jedoch einerseits mit Bündelung zu rechnen, andererseits übertreffen viele Lautsprecher die 100 dB @ 1m, sodass in summa Wirkungsgrade bis etwa 10% die Grenze für einzelne Membran-Lautsprecher darstellen. HiFi-Boxen erreichen oft nur 0.1%, wohingegen Hornlautsprecher auf über 25% Wirkungsgrad kommen können*. Somit wird also nur der kleinere Teil der zugeführten Leistung in Schall umgewandelt, der größere Teil ist **Wärme**. Kein Wunder, dass Schwingspulen zerstört werden, wenn von zugeführten 100 W über 90 W den dünnen Draht erhitzen. Wie allgemein bekannt, sorgt schon ein 30-W-Lötkolben für mächtig viel Hitze, die Schwingspule muss also viel aushalten können: 200° C (und mehr) entstehen bei Volllast, das halten nur sehr spezielle Materialien aus. Zur Temperaturerniedrigung gibt's nur zwei Möglichkeiten: Die Leistungszufuhr reduzieren (turn it down), oder die Wärmeabfuhr erhöhen. Die erste Maßnahme obliegt dem Musiker, die zweite dem Hersteller (konstruktive Gestaltung der magnetführenden Polstücke, verbreiterte Polplatte, Pole-Piece-Vent etc.).*

Um genauere Daten zum Lautsprecherwirkungsgrad zu bekommen, wurden an einigen Gitarrenlautsprechern **Messungen** durchgeführt. Mit Präzisions-Messgeräten, aber in nur mäßig präzisen Messräumen. Der zur Verfügung stehende Reflexionsarme Raum (**RAR**) absorbiert mit seinen 80 cm langen Glasfaserkeilen ab 100 Hz ausreichend gut, darunter stören Raumresonanzen. Der Hallraum (**HR**) ist mit 220 m^3 zwar groß genug, seine Diffusität war aber (mangels Diffusoren und wegen ungeeigneter Einbauten) nicht optimal. Die folgenden Ergebnisse können somit nicht generell $\pm 1 \text{ dB}$ Messgenauigkeit beanspruchen, sind aber gleichwohl für orientierende Aussagen brauchbar. Messungen im RAR (B&K 4190) erfolgten in 3 m Abstand zur Schallwand, wurden zur besseren Vergleichbarkeit aber auf 1 m umgerechnet: $L_{1\text{m}} = L_{3\text{m}} + 9.5 \text{ dB}$. Bei Sweep-Messungen waren $2.83 V_{\text{eff}}$ eingepreist, bei Terz-Messungen war die Spannung je Terz konstant (Rosa Rauschen + Terzfilterung). Die Messungen der Polardiagramme erfolgten im RAR mit terzbreitem Rauschen, Drehtisch B&K 3922, $d = 3 \text{ m}$. Messungen im Hallraum (B&K 4135) erfolgten auf einer schrägen Kreisbahn ($\varnothing = 3 \text{ m}$), über die energetisch gemittelt wurde. Die meisten Hallraum-Messungen wurden mit zu 50% überlappendem, terzbreitem Rosa Rauschen (IEC 1260 class 0) durchgeführt, $U_{\text{Terz}} = 0.5 V_{\text{eff}}$. Analyse-Software: CORTEX-Viper, Matlab.

* H. Fleischer: Hörner endlicher Länge, Forschungsbericht aus dem Institut für Mechanik, HSBw, 1994.

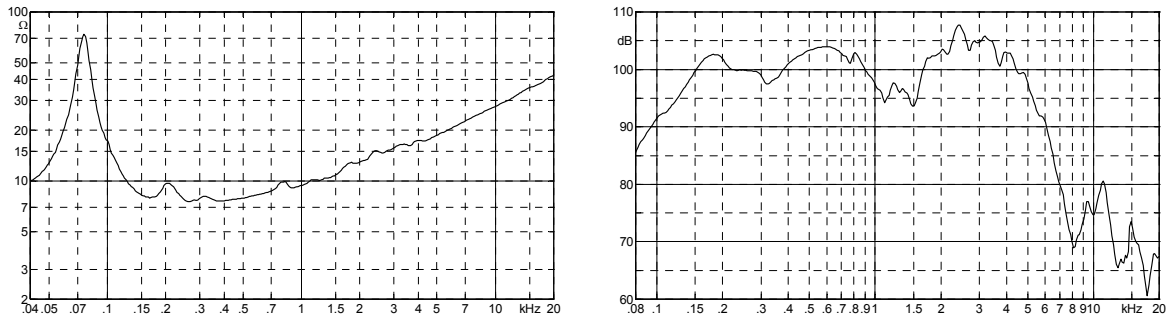


Abb. 11.51: Impedanzbetrag (links), Schallpegel im RAR (Lautsprecher in VOX AD60-VT eingebaut).

Der in **Abb. 11.51** analysierte Lautsprecher ist ein **blauer Celestion**, gemeinhin als "die Legende" bezeichnet, weil er in den berühmten frühen VOX-Verstärkern und den nicht minder berühmten frühen Marshall-Boxen zum Einsatz kam. Diesem Lautsprecher wird ein sagenhafter Wirkungsgrad attestiert, der – glaubt man dem Internet – auf das damals verwendete Magnetmaterial (Alnico) zurückzuführen ist. Und tatsächlich: Mit 1 W erzeugt er in 1 m Abstand bis zu 108 dB! Unter Fernfeldbedingungen ergibt das eine Intensität von 63 mW/m^2 , woraus mit 12.6 m^2 Kugeloberfläche 0.79 W Schallleistung werden. Bzw. 79% Wirkungsgrad. Wirklich?

Keine Frage, dieser Lautsprecher ist gut, sein Wirkungsgrad ist hoch, aber niemals 79%. Bei 2.5 kHz darf keinesfalls mehr von kugelförmiger Abstrahlung ausgegangen werden, der o.a. "Wirkungsgrad" ist mit dem zugehörigen Bündelungsgrad zu multiplizieren [3]. Und wenn man schon bei den Korrekturfaktoren ist: Die aufgenommene Wirkleistung ergibt sich ja auch nicht zu $P = U^2/R_{\text{Nenn}}$, sondern aus dem tatsächlichen Realteil der elektrischen Impedanz.

Zunächst zur **Richtcharakteristik** (Richtungsmaß, [3]): Lautsprecher-Hersteller geben als Übertragungsfrequenzgang (wenn überhaupt) die "auf Achse" ermittelte Kurve an. Der Lautsprecher strahlt Schall aber nicht nur nach vorne, sondern nach allen Seiten ab. Dieses Verhalten erfasst man entweder durch richtungsabhängige Übertragungsmaße, oder durch frequenzabhängige Richtungsmaße. Also: Pegel über der Frequenz für verschiedene Richtungen, oder Pegel über der Richtung für verschiedene Frequenzen (Kap.11.4). Unterstellt man rotationssymmetrische Schallabstrahlung, reichen Bündelungsmessungen in *einer* Ebene. In **Abb. 11.52** sind zwei Richtdiagramme dargestellt, gemessen an einem Combogehäuse, dessen Rückwand eine $49 \text{ cm} \times 21 \text{ cm}$ große Ausgleichsöffnung aufweist. Wider Erwarten ergibt sich bei 180 Hz eine fast kreisförmige Abstrahlung, keine Dipol-Acht (Details siehe später), bei 2.5 kHz zeigt sich hingegen eine typische Hochtonbündelung – trotz Rückwand-Öffnung.

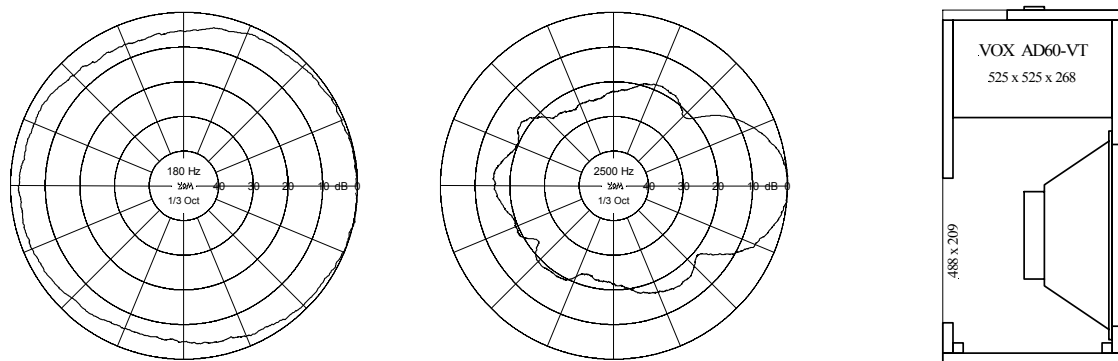


Abb. 11.52: Horizontal-Richtdiagramme bei zwei verschiedenen Frequenzen; VOX AD60-VT.

Der **Wirkungsgrad** η ist eine leistungsbezogene Größe: Schalleistung / Stromleistung, oder etwas präziser: Akustische Wirkleistung P_{ak} / elektrische Wirkleistung P_{el} . Betreibt man den Lautsprecher mit Spannungseinprägung, erhält man P_{el} über $P_{\text{el}} = U^2 / \text{Re}(Z)$. Den Realteil der elektrischen Impedanz zu ermitteln ist nicht besonders schwierig, bei der vom Lautsprecher abgegebenen Wirkleistung P_{ak} wird's hingegen gleich in zweifacher Weise kompliziert: Die messtechnische Ermittlung erfordert einen großen Aufwand, und dann ist diese Leistung ja von der Lautsprecherumgebung abhängig, also keine Konstante. Das ist wie beim Auto: Der Motor mag ja 400 PS leisten können, aber nicht auf vereisten Straßen. Der akustische Quellwiderstand der Membran, als Quotient von Schalldruck und Schallschnelle definiert, ist relativ groß: Die Membran könnte großen Druck erzeugen, aber bei relativ kleiner Membrangeschwindigkeit. Der Realteil der Strahlungsimpedanz ist hingegen eher klein: Selbst bei relativ großer Membrangeschwindigkeit bleiben die an die Luft übertragenen Kräfte relativ klein, an der Membran entsteht eine erhebliche Fehlanpassung. *Groß* bzw. *klein* sind hierbei aufgabenspezifisch zu sehen, die Literatur [z.B. 3] liefert ergänzende Daten. Die Lautsprechermembran ist beim typischen Betrieb stark unterfordert, wie der Werfer, der einen sehr kleinen Ball wirft: Ob der 10 oder 20 Gramm wiegt, ist unwesentlich, die Geschwindigkeit wird in beiden Fällen ungefähr gleich sein, die Energie des schwereren Balls also ungefähr doppelt so groß, der Wirkungsgrad lastabhängig. Auf den Lautsprecher übertragen: Könnte man die Lastimpedanz vergrößern, würde auch der Wirkungsgrad größer werden. Man kann die Lastimpedanz vergrößern, z.B. indem man den Lautsprecher auf den Boden oder gleich in eine Raumecke stellt, hierbei erhöht sich der Wirkungsgrad. Natürlich nicht unbegrenzt, bei zu hoher Last nimmt die Geschwindigkeit ab. Auch da gibt's Parallelen zum Werfer: Ein 5-kg-Ball wird nicht mehr die Geschwindigkeit des 20-Gramm-Balls erreichen können.

Der Lautsprecherwirkungsgrad ist offenbar nicht leicht zu ermitteln, das mag ein Grund sein, warum die Industrie derartige Größen kaum veröffentlicht. Nach gängiger Theorie kann sich η um den Faktor 8 (!) ändern, wenn der Lautsprecher aus dem RAR in die Ecke eines reflektierenden Raumes gebracht wird. Auch wenn man in der Praxis nicht die jeweiligen Grenzfälle erreicht – selbst der Faktor 2 wäre ja schon ein erheblicher Unsicherheitsfaktor. Ein Weg aus diesem Dilemma führt über die vergleichende Messung im Spezialraum: Beispielsweise werden zwei Lautsprecher im RAR vermessen, als Resultat interessieren aber nicht so sehr ihre absoluten Wirkungsgrade, sondern deren Relation. Findet man im RAR 5% zu 3%, kann man für den realen Raum ein ähnliches Verhältnis erhoffen. Messungen im RAR führen zu ziemlich genauen Ergebnissen, erfordern aber einen großen Aufwand, da die Abstrahlung ja nicht kugelförmig erfolgt, und deshalb sehr viele Messpunkte (bzw. Messbahnen) nötig sind. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die **Absorberkeile** eines RAR auch über 100 Hz nicht perfekt absorbieren. Selbst wenn man also den Messbereich auf $f > 100$ Hz begrenzt, liegt kein perfektes Freifeld vor. In dem zur Verfügung stehenden RAR wurden bis 300 Hz Pegelunterschiede von bis zu ± 1 dB gemessen, wenn (axial in konstanter Distanz $d = 3$ m gemessen) die Positionen von Lautsprecher und Messmikrofon verändert wurden. 2 dB Unterschied bedeutet beim Wirkungsgrad eine relative Abweichung von 58%, also z.B. 8% statt 5%. Dazu kommen noch all die Toleranzen der Geräte, die – Brüel bewahre – vorbildlich präzise sind, aber eben doch ein kleines Bisschen neben dem Sollwert liegen. Als Autor beschleicht einen ein komisches Gefühl, wenn man eben noch die 35/40-W-Unterschiede der Fender-Verstärker in mildes Spott-Licht tauchte, selbst aber 58% Messunsicherheit produziert. Was soll's, andere Messräume stehen nicht zur Verfügung, und im Hallraum wird's noch ungenauer. Nein, im Ernst: Von all den untersuchten RAR-Positionen wurde die bestmögliche für alle weiteren Messungen beibehalten, vergleichende Aussagen lassen sich hiermit schon zuwege bringen, und über 300 Hz bleiben die Abweichungen bereits unter ± 0.5 dB. Und generell gilt: Jede präzisere Messung ist willkommen.

Bei **RAR-Messungen** unterstellt man, dass der Lautsprecher eine Schallwelle abstrahlt, die nicht mehr (bzw. kaum mehr) reflektiert wird; trifft sie auf die raumbegrenzenden Glasfaserkeile, wird ihre Schallenergie (fast) vollständig in Wärme umgewandelt. In diesem Betriebszustand lässt sich die **Strahlungsimpedanz** (= der den Lautsprecher belastende Widerstand) für einige Idealfälle berechnen [Beranek, Olsen, Zollner/Zwicker]. In diesem Zustand wird der Lautsprecher aber kaum betrieben, nur selten spielt der Gitarrist im Reflexionsarmen Raum. Das heißt nun nicht, dass RAR-Messungen unsinnig sind, vielmehr sind ergänzende Messungen (und natürlich Hörversuche) in anderen Räumen wünschenswert. Im Gegensatz zu den Wänden des RAR reflektieren normale Wände Schall in erheblichem Maße, zum Lautsprecher kommt eine Schallwelle zurück (eigentlich unendlich viele ...), die Membran strahlt nicht mehr in ein freies Schallfeld, sondern muss gegen den Schalldruck der Reflexionen arbeiten. Da sie aber sowieso unterfordert ist (siehe oben), wird ihre Bewegung hierdurch nur wenig geschwächt, und (bei günstiger Phasenlage) **der Wirkungsgrad erhöht**. Im realen Raum kann der Lautsprecher also mehr Schallleistung abgeben als im RAR – aber u.U. auch weniger, wenn der Lautsprecher beispielsweise in einem Druckknoten steht.

An dieser Stelle empfiehlt es sich, auch einmal einen Blick auf die **elektrische Impedanz** zu werfen. Der Lautsprecher ist ja ein passives Zweitor, Änderungen der Lastimpedanz müssten eigentlich die Eingangsimpedanz verändern. **Abb. 11.53** zeigt, dass dies tatsächlich der Fall ist – aber in eher geringem Maße*. Ein einfacher Grund: Der Wirkungsgrad, der natürlich auch die Impedanztransformation beeinflusst. Oder etwas elementarer: Gegenüber dem ohmschen Schwingspulenwiderstand spielt die Lastimpedanz nur eine untergeordnete Rolle. Der Zusammenhang zwischen Betrag und Realteil der elektrischen Impedanz ist im rechten Bild dargestellt. An den Extremwerten stimmen beide Kurven in etwa überein (hier ist die Impedanz näherungsweise reell), dazwischen ist der Realteil kleiner als der Betrag, wie's bei Impedanzfunktionen sein muss.

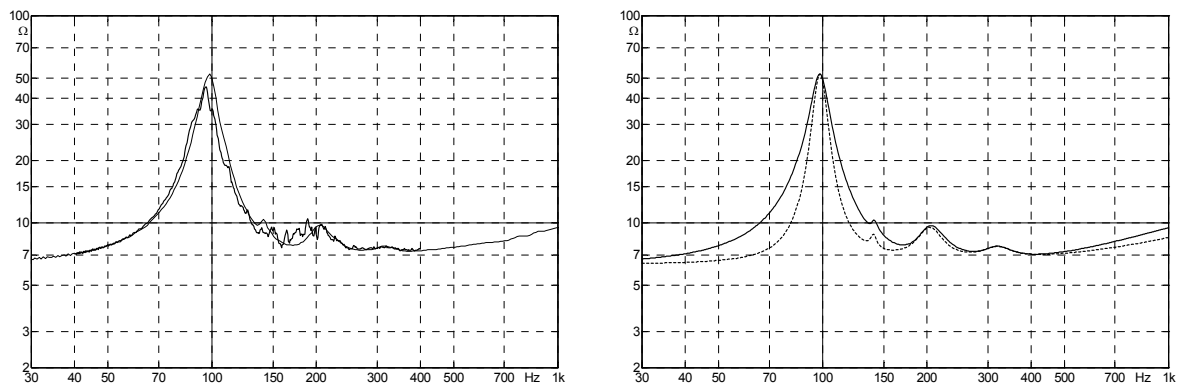


Abb. 11.53: Links: Betrag der elektrischen Lautsprecherimpedanz (RAR —, Hallraum —). Im rechten Bild ist der Vergleich zwischen Betrag (—) und Realteil (----) der elektrischen Impedanz dargestellt (RAR).

Aus diesen Ergebnissen kann man folgende **Näherung** ableiten: Ändert sich die akustische Umgebung eines Lautsprechers, bleibt seine Leistungsaufnahme nahezu unverändert; seine Leistungsabgabe kann sich aber wesentlich ändern (was noch genauer zu untersuchen ist).

* Auch da erreicht man schnell 10% Unterschied, der Fokus soll aber auf den Haupteffekten liegen. Die Unterschiede sind außerdem auf den Bereich unter 200 Hz begrenzt; darüber stimmen beide Kurven überein.

Nun zum **Hallraum** (HR). Im Idealfall ist dies ein Raum mit stark reflektierenden Wänden, die (außer im Nahbereich der Quelle) für ein **diffuses Schallfeld** sorgen. Also für ein Schallfeld, in dem der Schall mit gleicher Wahrscheinlichkeit aus allen Richtungen am Messpunkt ankommt, und dessen (gemittelter) Schalldruck vom Ort unabhängig ist. Die Ausnahme ist der Nahbereich um die Quelle, der durch den effektiven **Hallradius** begrenzt wird [3]. Ein typischer Hallradius ist 0.5 m (oder weniger), den effektiven Hallradius bekommt man hieraus durch Multiplikation mit der Wurzel aus dem Bündelungsgrad (z.B. $0.5 \text{ m} \times 3 = 1.5 \text{ m}$).

Etwas präziser: Im gesamten Hallraum überlagern sich (LZI-System) das freie und das diffuse Schallfeld; nahe bei der Quelle überwiegt das freie Feld, weiter weg überwiegt das diffuse. Bei kugelförmiger (nicht bündelnder) Abstrahlung ist der Bündelungsgrad $\gamma = 1$, die Grenze zwischen freiem und diffusen Feld wird durch den **Hallradius** definiert. Bei bündelnder Abstrahlung muss stattdessen der effektive Hallradius verwendet werden: $r_H^* = r_H \cdot \sqrt{\gamma}$. Durch die verlustarmen Schallreflexionen bilden sich bei breitbandiger Anregung unzählige* stehende Wellen aus, wobei die Eigenmodendichte mit steigender Frequenz quadratisch zunimmt. Regt man den Hallraum mit einem (sehr langsamen) Sinus-Sweep an, treten tieffrequent die einzelnen Raumresonanzen deutlich hervor; hochfrequent ergibt sich nur mehr ein Gewirr kleinerer und größerer Zacken (**Abb. 11.54**). Und damit sind wir bei der Grundproblematik der Hallraummessungen angekommen: Diese Maxima und Minima sind stark vom Ort abhängig, sie stellen keine Raumkonstanten dar. Zwar sind die Eigenfrequenzen des Raumes (bei konstanter Temperatur, Feuchtigkeit und Luftdruck) tatsächlich als Konstanten anzusehen, ob und wie die dazugehörigen Schwingungsmoden aber angeregt und gemessen werden, hängt von der Position des Lautsprechers und des Mikrofons ab.

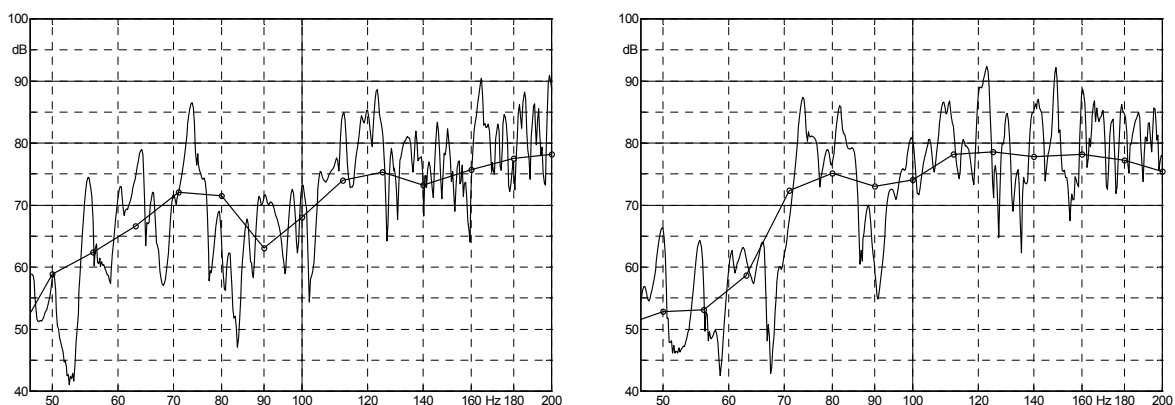


Abb. 11.54: Sweep-Messungen im Hallraum, zwei verschiedene Mikrofonpositionen; \dashrightarrow Terzmittelwerte.

Weil sich im Hallraum beim Verändern der Mikrofonposition die mit Sinus-Sweep ermittelten Resonanz-Zacken schon mal um 30 dB ändern können, misst man üblicherweise nicht mit Sinustönen, sondern mit terz- oder oktavbreitem **Rauschen**. Das aber zu den stochastischen Signalen gehört, und deshalb einer speziellen Messtechnik bedarf. Jede über einen Zeitabschnitt durchgeführte Rausch-Messung stellt einen Stichproben-Mittelwert dar, der jeweils nur als Schätzwert für den wahren Wert der Grundgesamtheit interpretiert werden darf. Deshalb ergeben zwei nacheinander durchgeführte Messungen in der Regel auch nicht denselben, sondern nur zwei ähnliche Messwerte. Geht man von **normalverteiltem Rauschen** aus – in der Raumakustik üblich – streuen die zur Effektivwertbildung benötigten Schalldruckquadrate χ^2 -verteilt. Verlängern der Mittelungszeit oder Vergrößern der Bandbreite reduziert die Standardabweichung des Messfehlers [Bendat / Piersol].

* Streng genommen sind die Reflexionen schon abzählbar, also: "Sehr, sehr viele".

Je tiefer die Mittenfrequenz der Analyseterz, desto kleiner die absolute Bandbreite; die tiefste Terz braucht also die längste Mittelungszeit. Zu $f_m = 100$ Hz gehören 23 Hz Terzbandbreite, da beträgt die Standardabweichung des normierten Messfehlers ca. 2%. Bei stattlichen 30 s Mittelungszeit! Legt man dann – wie in der Statistik häufig der Fall – die Grenzen des **Vertrauensintervalls** auf $\mu \pm 3\sigma$, so weichen 99.7% aller Messwerte um weniger als ± 0.5 dB vom wahren Wert ab. Das Terzpegelspektrum der Lautsprecherspannung kann mit 30 Sekunden Mittelungszeit also in ausreichender Genauigkeit gemessen werden. Das terzbreite Schalldruckspektrum des Hallraumes kann nach dieser Vorschrift zwar auch ermittelt werden, hierbei ist aber zu berücksichtigen, dass der Schallpegel (stochastisch) von der Zeit, und zusätzlich vom Ort* abhängt. Ein für das Diffusfeld repräsentativer Pegel ergibt sich erst, wenn die Anzahl der Raumresonanzen pro Terz ausreichend hoch ist. Ohne zu sehr ins Detail zu gehen: Unter 100 Hz ist dies sicher nicht der Fall (Abb. 11.54), und auch über 100 Hz sind noch deutliche Pegelunterschiede zu erkennen (**Abb. 11.55**). Die Pegelmessung erfolgte deshalb nicht an einem Punkt im Hallraum, sondern mit rotierendem Mikrofon.

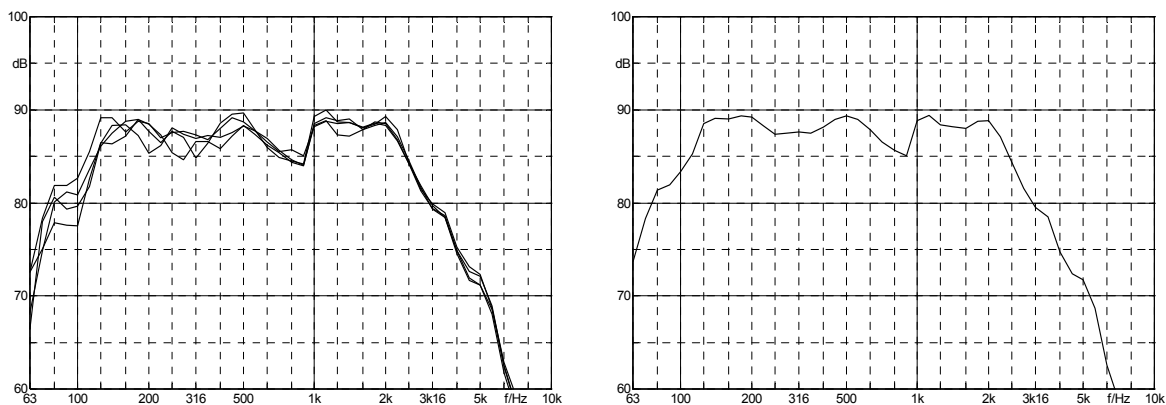


Abb. 11.55: Hallraum-Terzpegel, an vier Positionen mit ortsfestem Mikrofon gemessen (links). Das rechte Bild zeigt eine örtliche Mittelung über einen (nicht wandparallelen) Kreis mit 3 m Durchmesser.

Für einen Umlauf auf der 9.4 m langen Kreisbahn benötigt das Messmikrofon 80 s. Damit ist sowohl zeitlich als auch räumlich eine ausreichende Mittelungsgenauigkeit erreicht – zumindest im Rahmen der gewählten Aufgabenstellung. Der durch energetische Mittelung über die Kreisbahn gewonnene Schallpegel L ergibt zunächst die Intensität $I = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \cdot 10^{L/10\text{dB}}$, woraus die Schalleistung P_{ak} berechnet werden kann:

$$P_{ak} = 0.038 \text{ m}^2 \cdot (1 + S\lambda/8V) \cdot \frac{V/\text{m}^3}{T_N/\text{s}} \cdot I \quad \text{Schalleistung}$$

Hierbei ist S die Raumboberfläche, λ die Wellenlänge, V das Raumvolumen und T_N die Nachhallzeit. Der Klammerausdruck stellt die sog. Waterhouse-Korrektur[♥] dar, die Energiekonzentrationen in Wandnähe berücksichtigt.

Als Beispiel: Für 100 dB Schalldruckpegel erhält man mit $V = 220 \text{ m}^3$ und $T_N = 2 \text{ s}$ im hochfrequenten Bereich eine Schalleistung von 42 mW. Der kleine Unterschied zwischen dem Intensitätspegel L_I und dem Schalldruckpegel L_p ($L_I = L_p - 0.2 \text{ dB}$) wird beim Vorfaktor 0.038 berücksichtigt.

* Die Ausbreitung und Reflexion jeder einzelnen Welle unterliegt einem determinierten Prozess.

♥ Waterhouse R.V., JASA Vol. 27, March 1955.

Nachdem nun für den Reflexionsarmen Raum (RAR) und den Hallraum (HR) Messaufbauten zur Schallpegelbestimmung geschaffen worden waren, konnte mit der Messung der abgestrahlten Leistung begonnen werden. Zunächst an zwei Objekten:

- Einem 8"-Lautsprecher (*Eminence α -8*), eingebaut in ein dichtes Gehäuse (22x30x18),
- Einem 12"-Lautsprecher (*Celestion blue*) im offenen VOX AD60-VT (Abb. 11.52).

Abb. 11.56 zeigt die Messergebnisse. Die RAR-Messungen wurden in 3 m Distanz ermittelt, aber auf 1 m umgerechnet ($L + 9.5$ dB). Die HR-Messungen erfolgten durch Mittelung über die Kreisbahn, wie umseitig beschrieben; der im Diffusfeld gemessene Pegel wurde auf 1 m umgerechnet. Testsignal war Rosa Rauschen, terzbreit gefiltert (IEC 1260 class 0), die am Lautsprecher anliegende Terzspannung betrug bei beiden Messungen $2.8 V_{\text{eff}}$.

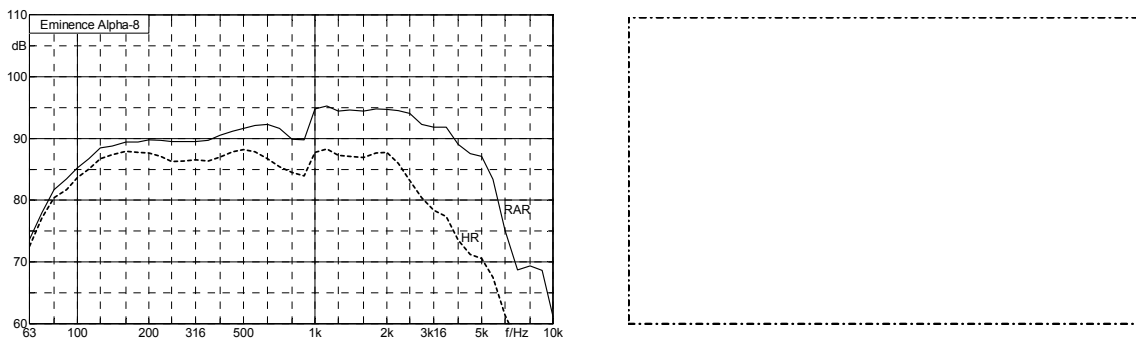


Abb. 11.56: RAR- und HR-Messungen im Vergleich. RAR: 2.8 V/Terz, 1m. HR: 2.8 V/Terz, $r_H \rightarrow 1$ m. Im Frequenzbereich unter 125 Hz zeigen die Schallfelder beider Räume "akzeptable" Artefakte.

Bei beiden Lautsprechern zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den im RAR und im HR gemessenen Frequenzgängen. Hauptursache dieser Abweichungen ist vor allem die mit steigender Frequenz zunehmende Bündelung; aber auch die unterschiedliche Strahlungsimpedanz spielt eine Rolle. Der in ein relativ kleines, dichtes Gehäuse eingebaute Eminence-Lautsprecher wirkt bei tiefen Frequenzen näherungsweise als Kugelquelle – im RAR wird seine Strahlungsimpedanz hauptsächlich von einer Masse gebildet [3]. Im HR ergibt sich eine wesentlich kompliziertere Strahlungsimpedanz, die von den individuellen HR-Daten und der Position des Lautsprechers abhängt. Die geringe Anzahl der Raummoden pro Terz bewirkt, dass der Lautsprecher nur in wenige, schmale Frequenzbänder Schallenergie mit relativ gutem Wirkungsgrad abgeben kann, der auf 1 m umgerechnete Hallraumpegel ist deshalb etwas geringer als der RAR-Pegel. Das VOX-Gehäuse hat auf der Rückseite eine $49 \times 21 \text{ cm}^2$ große Öffnung; auch im tieffrequenten Bereich ist deshalb schon mit Bündelung zu rechnen, die mit steigender Frequenz zunimmt – aber anders als beim Eminence-Lautsprecher. Im RAR wurde der VOX freistehend gemessen, im HR stand er auf einem 50 cm hohen Hocker. Aus dieser bühnentypischen Betriebsart ergeben sich bis ca. 600 Hz Unterschiede in der Strahlungsimpedanz, die bei Abb. 11.61 noch zu diskutieren sein werden. Dazu kommt auch hier die spezielle, orts- und modenabhängige Hallraum-Belastung. Die Frage nach dem Wirkungsgrad muss somit raumspezifisch diskutiert werden, zwischen den im RAR und im HR ermittelten Wirkungsgraden bestehen systematische Unterschiede. Die einerseits schallfeldtypisch sind, andererseits Auswirkungen der individuellen Raumparameter darstellen.

Um das Bündelungsverhalten etwas genauer quantifizieren zu können, wurden im RAR für beide Lautsprecher Horizontal-Richtdiagramme (d.h. Richtungsmaße in Polarkoordinaten) mit Terz-Rauschen aufgenommen (**Abb. 11.57**).

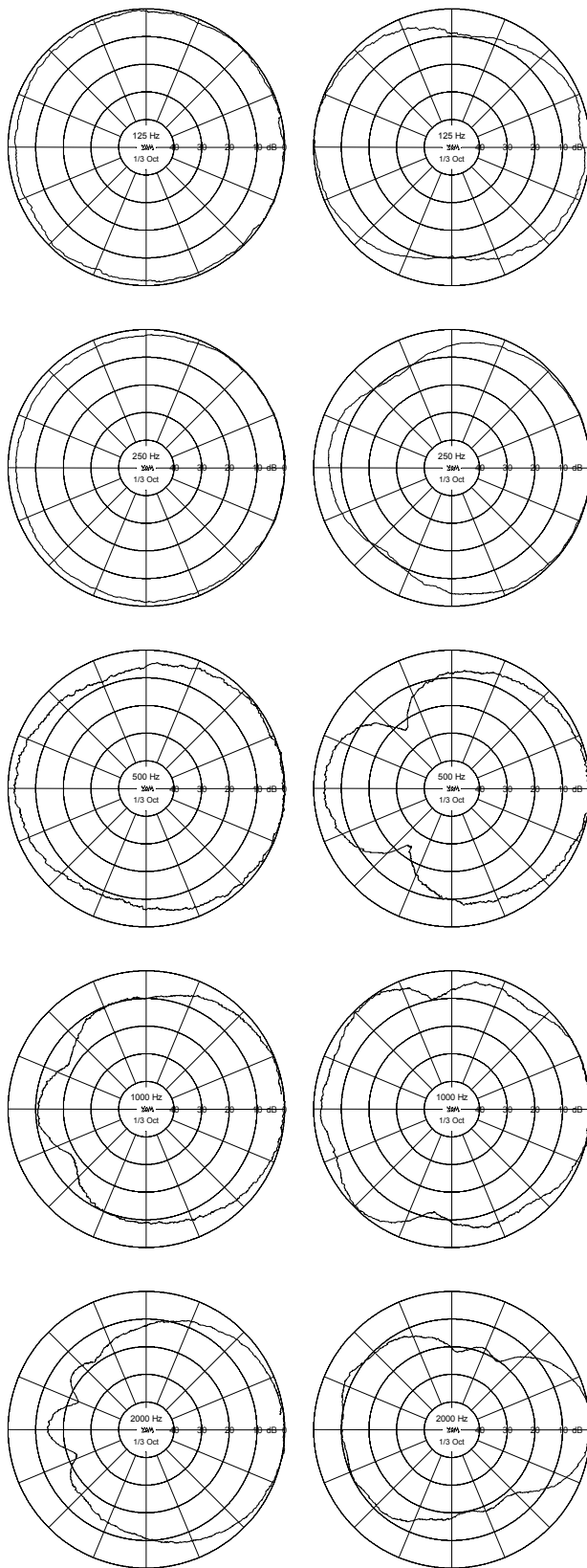


Abb. 11.57: Horizontal-Richtdiagramme.
Eminence Alpha-8 (links), VOX AD60-VT (rechts).
Alle Richtdiagramme sind auf das Maximum normiert.

In **Abb. 11.57** sind in der linken Spalte die Richtdiagramme des Eminence-Lautsprechers, in der rechten die des VOX-Celestion dargestellt. Der Eminence war in ein dichtes Gehäuse eingebaut, der Celestion in das rückseitig offene AD60-VT-Gehäuse (Abb. 11.52).

Die Bündelung des Eminence nimmt mit steigender Frequenz fast lehrbuchmäßig zu, der VOX zeigt demgegenüber ein viel komplexeres Verhalten. In keinem Frequenzbereich wirkt er als reiner Dipol, da die im Gehäuse eingeschlossene Luft mit der komplexen Impedanz der "Ausgleichsöffnung" ein phasendrehendes Filter bildet. Dessen Charakteristik entfernt an eine Bassreflexbox erinnert, deren Abstimmung aber sehr speziell und keinesfalls nach Thiele/Small erfolgte. Was aber auch gar nicht gefordert ist: Dieses Gehäuse soll den Gitarrenton ideal abstrahlen, darf und soll durchaus klangformend wirken, was beim typischen HiFi-Lautsprecher ja eher nicht erwünscht ist.

Nicht alle Gitarren-Lautsprecher sitzen in offenen Gehäusen: Der wohl berühmteste Vertreter der geschlossenen Box dürfte von Marshall stammen, aber auch Fender, bei kleineren Combos eher für offene Gehäuse bekannt, bot mit dem Showman und dem Bandmaster schon früh geschlossene Lautsprechergehäuse an. Bzw. klassische Bassreflex-Boxen mit z.T. durchaus originellen, koaxialen Reflexöffnungen. Es scheint, als würden im oberen Leistungsbereich die zwei- oder dreiteiligen "Piggyback"-Versionen dominieren, im unteren Bereich dagegen eher die Combos – ein Dogma ist dies aber nicht. Letztlich entscheidet jeder Gitarrist nach Soundfülle und Abstrahlcharakteristik – oder nimmt einfach "same as Jimi had".

Abb. 11.56 offenbart schon viel über die Abstrahlung, stellt aber noch nicht direkt den Wirkungsgrad dar. Dieser lässt sich im RAR aus dem Hüllflächenintegral über dem quadrierten Schalldruck ermitteln, oder im HR aus Intensität und Hallradius-Kugelfläche. Zur RAR-Messung sind entweder viele Messpunkte bzw. -bahnen erforderlich, oder rotationssymmetrische Abstrahlung; im HR müssen lediglich Diffusfeld-Schallpegel, Volumen und Nachhallzeit bekannt sein. Um den Aufwand in Grenzen zu halten, wurde der **Wirkungsgrad** nicht im RAR, sondern im HR ermittelt – zunächst unter Nennbedingungen, also $P_{el} = U^2 / R_N$. Diese Spezifikation ist physikalisch noch nicht ganz korrekt, liefert aber sinnvolle Vergleichswerte für den Betrieb bei Spannungseinprägung. Auch wenn Gitarrenverstärker nicht generell niederohmig sind, sie nähern sich dieser Betriebsart beim durchaus typischen Clipping. Ergänzende Messungen zum exakt definierten physikalischen Wirkungsgrad folgen anschließend.

Abb. 11.58 zeigt den im HR ermittelten Nenn-Wirkungsgrad des "Celestion blue", montiert in das VOX AD60-VT-Gehäuse. Beeindruckend, aber keinesfalls einzigartig: Dünn eingezeichnet sind Konkurrenten aus dem eigenen Haus, die sich ähnlich effizient geben; der neue Neodymlautsprecher ("Neodog", oberste Kurve) legt sogar noch eins drauf. Dass Wirkungsgrade aber auch kleiner sein können, ist im rechten Bild dargestellt: Lediglich die JBL-Box kann mit ihrem 9 kg schweren 12"-Lautsprecher einigermaßen mithalten, die anderen beiden Boxen wurden offensichtlich nach anderen Kriterien optimiert.

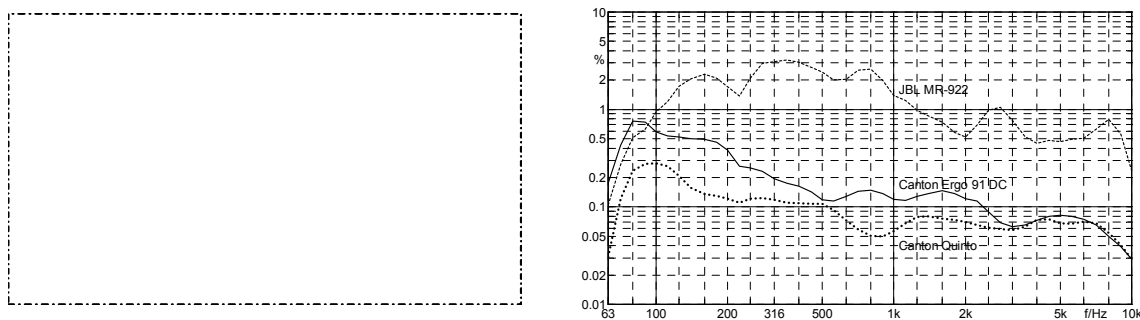


Abb. 11.58: Links: Nennwirkungsgrad des "Celestion blue". Dünn: 4 weitere Celestion-12"-Lautsprecher zum Vergleich: Neodog, Vintage-30, G12-80, G12-30H. Rechts: Fullrange-Boxen. Der "Nennwirkungsgrad" wird für den spezifizierten Nennwiderstand ermittelt, unabhängig vom tatsächlichen Lautsprecher-Widerstand.

Die Frage, ob denn nun Lautsprecher mit **Alnico-Magneten** "lauter sind" oder "mehr Höhen bringen" als solche mit Keramik-Magneten, soll anhand zweier Beispiele kurz diskutiert werden (**Abb. 11.59**). P12-R und L-122, beide mit Alnico-Magneten bestückt, haben einen geringeren Wirkungsgrad als der Vintage-30 (Keramik-Magnet). Der "Celestion blue" (Alnico) hat dagegen einen höheren Wirkungsgrad als sein Keramik-Konkurrent Eminence L-125. Neben dem Magnetmaterial kommt es nämlich vor allem auf die Magnetgröße und die Membran an, "geniale Alnico-Klangeigenschaften" sind nichtssagende Werbung.

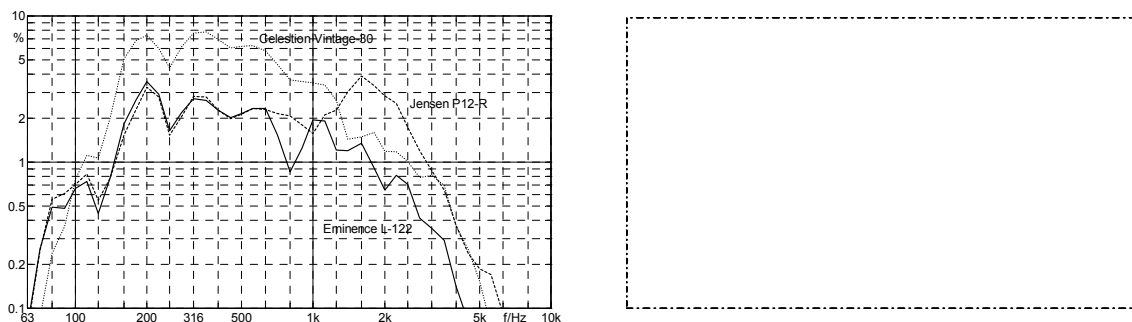


Abb. 11.59: Nennwirkungsgrad wie in Abb. 11.58, Vergleich Alnico- vs. Keramik-Magnet.

Nun zum korrekt definierten **Wirkungsgrad**, also dem Verhältnis aus abgegebener zu aufgenommener Wirkleistung. Wieder im Hallraum ermittelt, mit den dort gegebenen Besonderheiten. Wie in **Abb. 11.60** dargestellt, unterscheidet sich der *Realteil* der elektrischen Impedanz vor allem bei den Resonanzstellen 95 Hz und 190 Hz, sowie im hochfrequenten Bereich vom *Nennwiderstand*. Demzufolge ist der Lautsprecher-Wirkungsgrad in diesem Bereichen größer als der mit Bezug auf den Nennwiderstand (8Ω) ermittelte "Nennwirkungsgrad". Die Unterschiede sind klar zu sehen, können bei orientierenden Betrachtungen aber auch ignoriert werden. Dies um so mehr, als alle untersuchten 12"-Lautsprecher ähnliche Impedanzfrequenzgänge zeigten; lediglich das Verhalten bei der Haupt-Resonanz (hier 95 Hz) kann sich wesentlich unterscheiden. Falls gerade dieser Bereich interessiert, sind genaue Impedanzmessungen erforderlich.

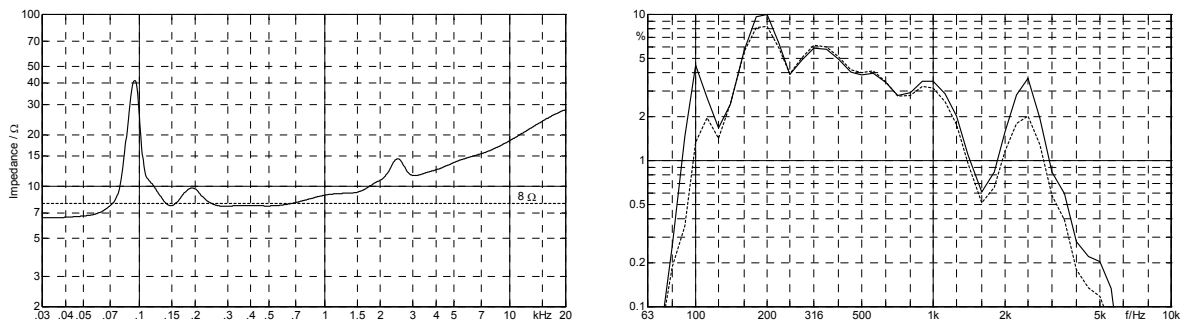


Abb. 11.60: Realteil der elektrischen Impedanz (links), Vergleich zwischen Nennwirkungsgrad (---) und tatsächlichem Wirkungsgrad (Terz-Mittelwerte). VOX AD60-VT mit Original-Lautsprecher.

Es wurde schon darauf hingewiesen, dass der Lautsprecher-Wirkungsgrad keine Konstante ist, sondern vom akustischen Umfeld abhängt. Der VOX AD60-VT, ein kleiner Combo, steht im Bühnenalltag zumeist auf einem Hocker. Seine Bedienungsknöpfe sind dadurch in Reichweite, und der Gitarrist hört sich besser. Aber natürlich kann man den VOX auch auf dem Boden stehen lassen, die gespeicherten Programme wären auch per Fußtaster abrufbar. Wie unterscheidet sich die Schallabstrahlung in diesen beiden Betriebsarten? Da die Lastimpedanz bei Annäherung an eine reflektierende (Boden-) Fläche steigt, erhöht sich tieffrequent der abgestrahlte Pegel um bis zu 3 dB (**Abb. 11.61**). Durch Verschließen der Rückwand kann man das Gegenteil erreichen: Über einen weiten Frequenzbereich nimmt der Pegel ab, lediglich bei ganz tiefen Frequenzen erzielt man hiermit einen Gewinn. Der aber nicht generell wünschenswert ist, da viele Gitarristen diesen Frequenzbereich lieber dem E-Bass überlassen.

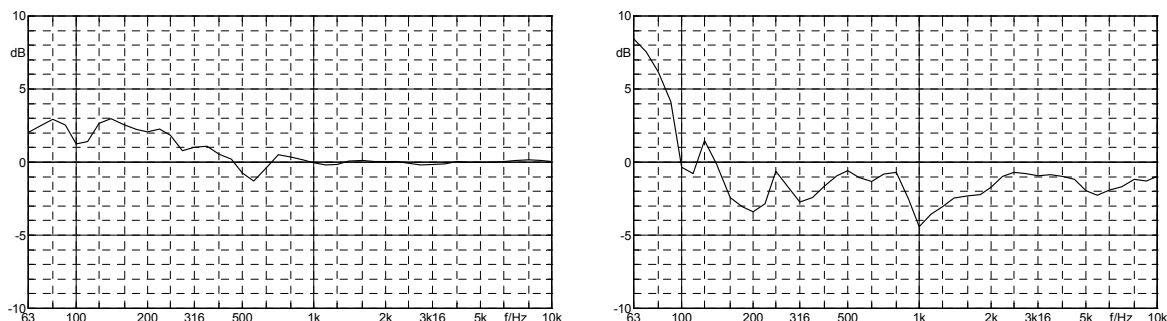


Abb. 11.61: Links: Pegelgewinn bei Platzierung des VOX AD60-VT auf dem Boden (gegenüber Hocker). Rechts: Pegelverlust beim Verschließen der rückseitigen Ausgleichsöffnung. Beide Messungen: Hallraum.

Die folgende Seite stellt RAR- und Hallraum-Messungen mehrerer Lautsprecher gegenüber. Alle 12"-Lautsprecher wurden im AD60-VT-Gehäuse gemessen.

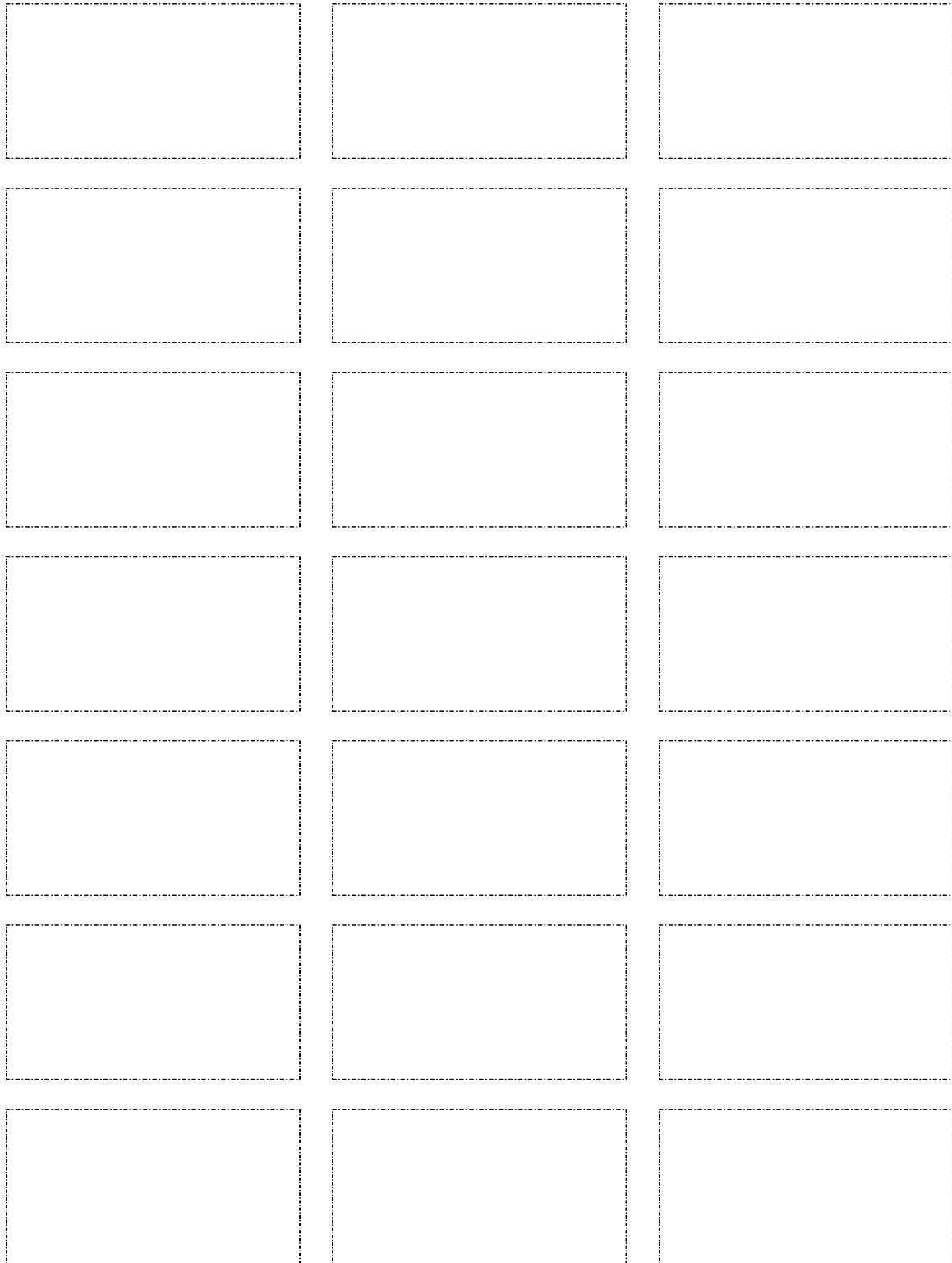


Abb. 11.62: Vergleich zwischen RAR-Messung (—) und HR-Messung (---), umgerechnet auf 1W / 1m. Zu 50% überlappende Terzanalyse (Haupt- und Nebenterz), Rosa Rauschen. Ordinate: Schalldruckpegel dB_{SPL} . Die Messungen zu den ersten 5 Bildzeilen wurden mit dem AD60-VT-Gehäuse durchgeführt. Die dünn eingezeichneten schrägen Geraden sind keine Sollkurven – sie dienen lediglich der Orientierung.

Diese Abbildungen bleiben der Druckversion vorbehalten

Die in **Abb. 11.62** dargestellten Frequenzgänge zeigen Gemeinsamkeiten, die vom Gehäuse (und ggf. von ähnlicher Bauform) kommen, und Unterschiede, die auf unterschiedliche Membrankonstruktionen zurückzuführen sind. Interessant ist die Differenz zwischen RAR- und HR-Frequenzgang, denn darin offenbart sich das **Bündelungsmaß** (Kap. 11.4). Hierbei sind zwei Besonderheiten zu beachten: 1) Der Lautsprecher war während der HR-Messung ortsfest, seine Strahlungsimpedanz ist also sehr raumspezifisch. 2) Die Bezugsrichtung ist bei der RAR-Messung immer 0° , auch wenn in andere Richtungen mehr Schallleistung abgestrahlt wird – deshalb sind auch negative Bündelungsmaße möglich. Dass $d = 0$ dB nicht generell kugelförmige Abstrahlung bedeutet, wurde bereits erläutert.

Angesichts der in **Abb. 11.62** dargestellten Messkurven soll nochmals darauf hingewiesen werden, dass für einen Gitarren-Lautsprecher andere Optimierungs-Richtlinien gelten als für einen Studio-Monitor. Leicht übertrieben könnte man sagen: *Wenn der Wirkungsgrad groß genug ist, ergibt sich der Rest von selbst.* Mit einer Canton Quinto wird der Hard-Rocker auf der Bühne nicht froh – das ist keine Gitarren-Box. Ein einziger Vintage-30 erzeugt bei maximal zulässiger Belastung (60 W) in 1m Entfernung bis zu 123 dB Schallpegel, eine Quinto bei Maximalleistung hingegen nur 102 dB. Rein rechnerisch müsste der Quinto also mehr als die hundertfache Maximalleistung zugeführt werden, um mit dem Vintage-30 mithalten zu können. Andererseits wäre der Vintage-30 als Abhör-Monitor völlig deplaziert, sein Frequenzgang zu unausgeglichen. Keinem der in **Abb. 11.62** analysierten Instrumental-Lautsprecher kann man einen "schlechten" Frequenzgang attestieren – die Berge und Täler sind genretypisch, der eine Gitarrist bevorzugt dieses, der andere jenes.

Frequenzgänge helfen, Unterschiede und Gemeinsamkeiten zu objektivieren – einen Hörtest ersetzen können sie nicht. Aus den Messkurven lassen sich pauschale Aussagen zum Wirkungsgrad, und damit zur Lautstärke ableiten, und sehr allgemeine Aussagen zum Klang: Das tiefe 1.5-kHz-Loch eines G12-H mit dem darauffolgenden 3-kHz-Maximum ist schon klangformend. Ob nun aber der darüber gezeichnete Celestion blue besser oder schlechter als der G12-H klingt, das sagen die Messkurven nicht. Der Handel hat es meisterhaft verstanden, das "Tunen" und "Retrofitten" anzuheizen: Da wird dem mit dem Klang seiner Anlage unzufriedenen Gitarristen suggeriert, durch Austausch der Tonabnehmer/Potentiometer/Lautsprecher in die Profiligen aufzusteigen. Ein Austausch kann sinnvoll sein, wenn echt minderwertige Komponenten verbaut wurden. Dass aber beim Austausch eines G12-H (119 €) gegen einen "Heritage" G12-H (195 €) aus Schrott der Hendrix-Sound entsteht, ist mehr als fraglich. Man stelle sich nur einmal vor, der Meister hätte damals, als er z.B. im Münchner Kongress-Saal aus zwei Marshall-Türmen die Hölle frei lies (in der ersten Reihe als Ohrenzeuge mit gefühlten 150 dB miterlebt), eine Zugabe über eine AC30-Wand gegeben – das wäre schon auch in Ordnung gegangen. Die Finger sind's, daran muss immer wieder erinnert werden.