

11.3 Schallpegel-Frequenzgang

Ein linear/zeitinvariantes System wird durch seinen Betrags- und Phasengang eindeutig beschrieben. Nimmt man das Übertragungsverhalten eines Lautsprechers näherungsweise als linear/zeitinvariant an, was bei nicht allzu großen Aussteuerungen durchaus zulässig ist, so ist *ein* Betrags-/Phasengang trotzdem völlig unzureichend: Der Lautsprecher ist kein Element der *elektrischen* Zweitorsysteme! Zwar weist er ein elektrisches Eingangstor auf (Anschlussklemmen), ausgangsseitig beschallt er aber ein spezielles Feld, das vom Schalldruck (Skalar) und von der Schallschnelle (Vektor) gebildet wird; beide Größen sind im dreidimensionalen Raum ortsabhängig, und deshalb existieren unendlich viele Übertragungsfunktionen.

Um diese Problematik einigermaßen übersichtlich handhaben zu können, reduziert man das Übertragungsverhalten auf Spezialfälle (Untermengen): Frequenzganganalysen in einer Richtung, und/oder Richtungsanalysen bei einer Frequenz. Zur ersten Gruppe zählen insbesondere die Frequenzgangmessungen "auf Achse", also: Mikrofon zentriert vor dem Lautsprecher, zur zweiten Gruppe gehören die Richtdiagramme.

Bei Würdigung aller Details ist ein Lautsprecher-Frequenzgang unendlich kompliziert, deshalb wird rigoros vereinfacht: Der Ausgangspunkt vieler Betrachtungen ist ein in eine sehr große Schallwand eingebauter Lautsprecher, dessen Membran zunächst zur ebenen Platte (sog. Kolbenmembran) vereinfacht wird [3]. Unter der Annahme linearen Verhaltens wird der Strom proportional in eine Kraft abgebildet, die auf die Membran einwirkt und sie bewegt. Die federnde Membranaufhängung und die Membranmasse bilden zusammen einen Resonator, dessen Polfrequenz im Bereich 70 – 110 Hz liegt. Unterhalb dieser Pol- oder Resonanzfrequenz wirkt die Membran näherungsweise als Feder, überresonant als Masse. Man sagt auch: Unterresonant ist die Membran federgehemmt, überresonant ist sie massegehemmt. Bei sinusförmigem Stromfluss entstehen die drei Bewegungsgrößen Auslenkung, Schnelle und Beschleunigung, die durch Differentiation bzw. Integration ineinander umgerechnet werden können. Da die Membran überresonant massegehemmt ist, wird für Stromeinprägung in diesem Frequenzbereich die Beschleunigung eingepreßt (Newton: $F = m \cdot a$). Dass Lautsprecher nicht immer mit Stromeinprägung betrieben werden, stellt im linearen Modell kein Problem dar: Die elektrische Lautsprecher-Impedanz verknüpft Spannung und Strom.

Integration der Membranbeschleunigung liefert die Membranschnelle, aus der mit dem Realteil der Strahlungsimpedanz die abgestrahlte Schall-**Wirkleistung** berechnet werden kann [3]. Im einfachen Modell ist die abgestrahlte Wirkleistung zwischen der Resonanzfrequenz und der durchmesserabhängigen oberen Grenzfrequenz frequenzunabhängig; die **Grenzfrequenz** liegt beim 12"-Lautsprecher ungefähr bei 600 Hz, darüber fällt die abgestrahlte Leistung mit $1/f^2$. Sagt die einfache Theorie. Auf Achse gemessene Frequenzgänge zeigen aber, dass der typische Gitarren-Lautsprecher auch noch 5 kHz mit respektablem Pegel abstrahlt – erst darüber fällt die Frequenzgangkurve ziemlich abrupt ab. Dies ist jedoch kein Widerspruch zur einfachen Theorie, da Schallpegel und -leistung nicht äquivalent sind: Ab 600 Hz nimmt zwar die abgestrahlte Leistung ab, sie wird aber mit zunehmender Bündelung auf den Bereich vor der Membran fokussiert. Im einfachen Modell kompensieren sich sogar Leistungsabfall und Bündelung, so dass auf Achse gar kein hochfrequenter Pegelabfall stattfindet. Doch hier beginnen gravierende Unterschiede zwischen Theorie und Realität sichtbar zu werden: Die reale Membran weicht in ihrem Schwingungsverhalten vor allem im hochfrequenten Bereich von der idealisierenden Theorie ab. Während die Theorie der axial schwingenden Kolbenmembran eine formstarre Membran voraussetzt, zeigt die reale Membran formändernde Partialschwingungen; sie "bricht auf" und bildet Knotenlinien mit gegenphasig strahlenden Teilflächen.

In **Abb. 11.10** sind Messungen dargestellt, für die ein Lautsprecher in eine **Schallwand** eingebaut war. Keine unendliche Schallwand, wie die Theorie der Kolbenmembran fordert, sondern eine quadratische (3m x 3m) bzw. kreisförmige Schallwand ($\varnothing = 1\text{m}$). Deren endliche Größe bewirkt, dass an ihrem Rand eine **Beugungswelle** erzeugt wird, die u.a. zum Mikrofon läuft und sich der vom Lautsprecher abgestrahlten Direktschallwelle überlagert. Das Ergebnis sind Interferenzen, d.h. frequenzabhängige Verstärkungen (gleichphasige Überlagerung) bzw. Abschwächungen (gegenphasige Überlagerung) des Schalldrucks. Bei der runden Schallwand ist der Abstand aller Randpunkte zum Membranzentrum gleich, es entsteht eine ausgeprägte *Kammfilterung*. Bei der quadratischen Membran sind die Schallumwege (um die Schallwand herum) richtungsabhängig, außerdem muss die um die Schallwand herum gebeugte Welle gegenüber dem Direktschall einen größeren Weg zurücklegen – ihre Amplitude ist deshalb viel geringer als die des Direktschalls, die Interferenzen sind nur schwach ausgeprägt.

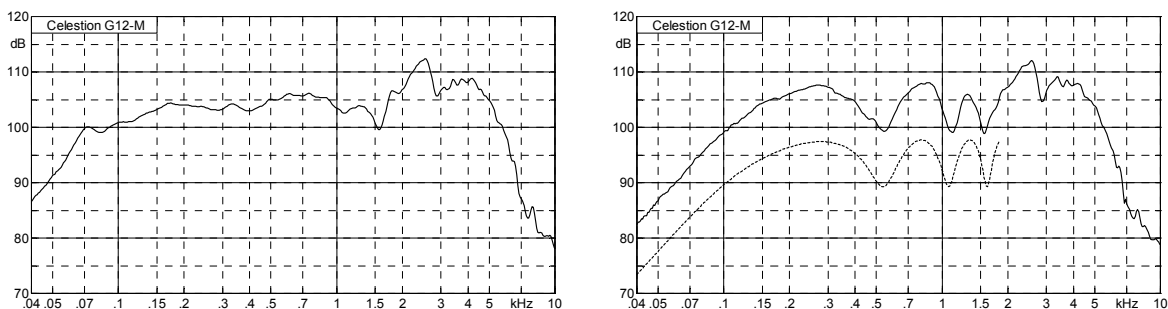


Abb. 11.10: Frequenzgang eines in eine Schallwand eingebauten 12"-Lautsprechers. Mikrofon 0.5 m vor dem Lautsprecher (auf Achse), Schallwand 3m x 3m (links), bzw. $\varnothing = 1\text{m}$ (rechts). Theoretische Interferenz (----).

Im einfachen Modell breiten sich auf beiden Seiten der Schallwand zwei zueinander gegenphasige Halbkugelwellen aus (**Abb. 11.11**). Sobald die Wellenfront den Rand der Schallwand erreicht hat, ändert sich ihre Form, weil nun eine Beugungswelle in den Bereich hinter der Schallwand eindringt. Diese Beugung hat Tiefpasscharakter: Tieffrequente Schalle laufen ohne wesentliche Abschwächung um die Schallwand herum, mit zunehmender Frequenz verringert sich jedoch die Amplitude der Beugungswelle, sodass im hochfrequenten Bereich praktisch nur mehr der Primärschall vorherrscht, ohne Interferenz.

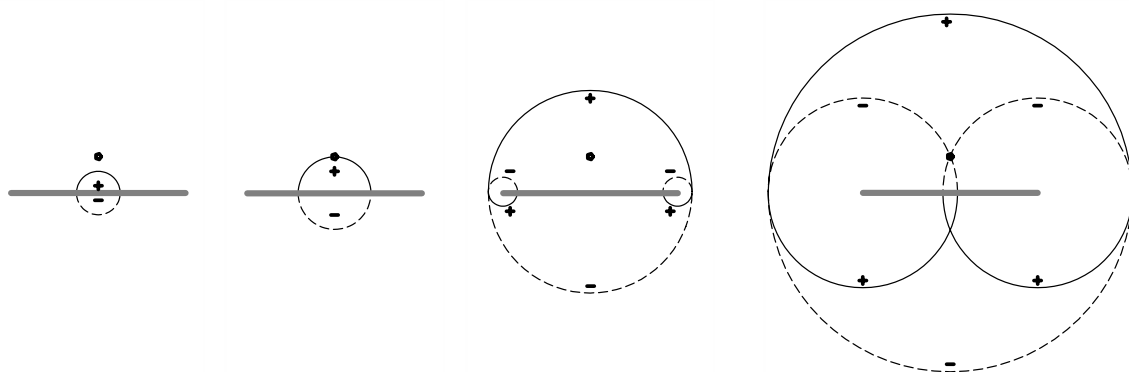


Abb. 11.11: Entstehung einer gegenphasigen Beugewelle am Rand der Schallwand. Der Punkt über der Schallwand kennzeichnet die Mikrofonposition; auf die Primärwelle folgen die beiden gegenphasigen Beugewellen.

In **Abb. 11.11** ist eine Welle zu vier aufeinanderfolgenden Zeitpunkten gezeichnet. Im zweiten Bild erreicht die Primärwelle gerade das Mikrofon, im dritten Bild ist die Welle ein kleines Stückchen über die Schallwand hinaus gelaufen, es beginnt die Beugungswelle. Im vierten Bild erreicht die gegenphasige Beugungswelle das Mikrofon.

Wie Abb. 11.10 gezeigt hat, verhindert eine *große* Schallwand den akustischen Kurzschluss zwischen den von Membran-Vorder- und -Rückseite abgestrahlten gegenphasigen Schallwellen – diese Maßnahme ist aber nicht bühnentauglich. Alternativ kann die von der Rückseite abgestrahlte Welle auch dadurch an der Ausbreitung gehindert werden, dass der Lautsprecher in ein luftdichtes **Gehäuse** eingebaut wird. Mit drei Haupteffekten: 1) Die rückwärtige Welle wird nicht abgestrahlt, 2) im Gehäuse entstehende Resonanzen verändern die Membranschwingung und damit auch den nach vorne abgestrahlten Schall, 3) die Steifigkeit der im Gehäuse eingeschlossenen Luft erhöht die Hauptresonanz. Ehe auf diese Gehäuse-Spezifika genauer eingegangen wird, muss aber noch der bei Schallwandmontage gemessene Frequenzgang genauer betrachtet werden.

Nach der Kolbenmembran-Theorie steigt der auf Achse gemessene Schallpegel tieffrequent mit 40 dB/Dek bis zur Resonanz (z.B. 100 Hz), überresonant bleibt der Pegel dann frequenzunabhängig konstant. Abb. 11.10 hatte schon gezeigt, dass dies nicht der Realität entspricht: Ab 1.5 kHz sind Welligkeiten unübersehbar, ab 5 kHz knickt die Kurve nach unten ab. Der Grund für diese Abweichung von der idealisierenden Theorie sind **Partialschwingungen** der Membran, die eben nicht formstarr bleibt, sondern ein ortsabhängiges Schwingungsmuster entwickelt. **Abb. 11.12** zeigt eine typische Lautsprecher-Membran im Schnitt. An den zylindrischen Schwingspulenträger (im Bild unten) schließt die leicht gekrümmte Membran an, auf die nach wenigen Millimetern die Staubschutzkalotte aufgeklebt ist. In der oberen Hälfte weist die Membran umlaufende, ziehharmonika-ähnliche Falten (Rippen, Corrugations) auf, die ein mechanisches Filter darstellen, das die peripheren Membranteile hochfrequent abkoppeln soll. An den mit Zahlen versehenen Messpunkten wurde die axiale Membranschnelle mit einem **Laser-Vibrometer** in Abhängigkeit von der Frequenz gemessen, siehe **Abb. 11.13**.

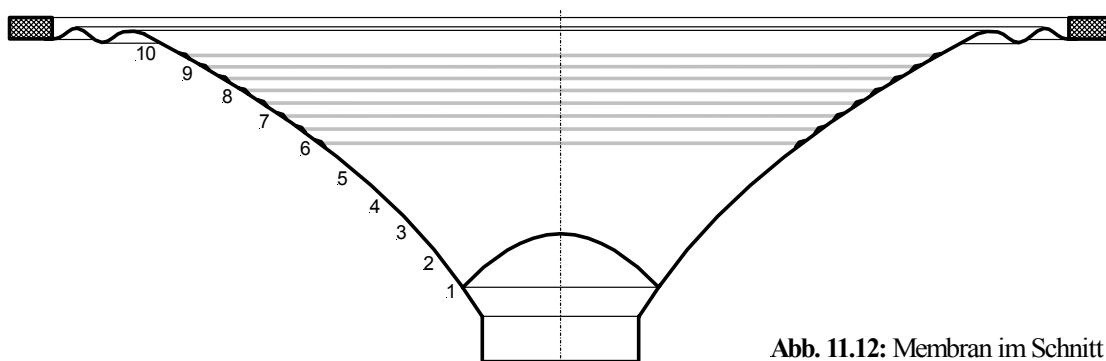


Abb. 11.12: Membran im Schnitt

Die Schnelle-Analyse zeigt, dass nur im Frequenzbereich bis ca. 300 Hz die Membran formstarr schwingt; in diesem Bereich folgt der Schnellfrequenzgang der theoretischen Bandpasskurve. Darüber zeigt sich eine unüberschaubare Vielfalt von Membran-Eigenschwingungen.

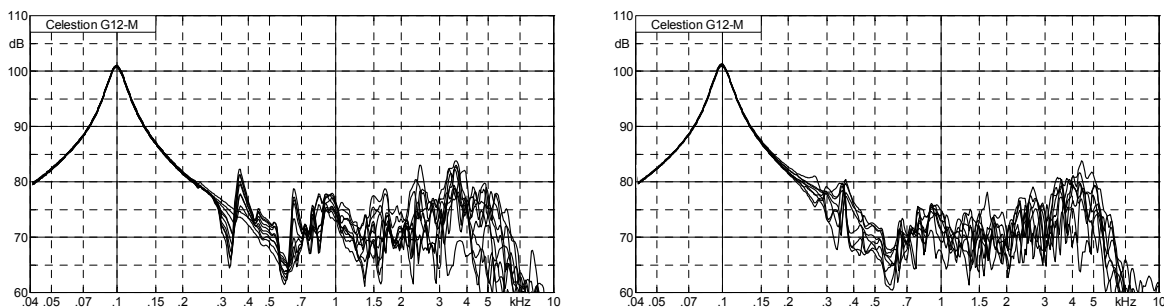


Abb. 11.13: Schnelle-Frequenzgänge an verschiedenen Membranpunkten; radial (links), zirkulär (rechts).

Besonders auffällig ist aber, dass die Membran-Rippen gar keinen Tiefpass bilden! In den Randbereichen schwingt die Membran keinesfalls schwächer als in Zentrumsnähe, ganz im Gegenteil: Der Rand schwingt sogar stärker. Die **Tiefpass-Theorie** ist schon ziemlich alt, sie entstammt einer Zeit, als die Membran nicht mal schnell mit dem Scanning-Vibrometer abgetastet werden konnte. Es ist durchaus vorstellbar, dass die damals mit einfachen Methoden untersuchten Lautsprecher so effiziente Rippen und Rillen hatten, dass tatsächlich mit steigender Frequenz der effektive Membrandurchmesser kleiner wurde – dies war wünschenswert, um Bündelung und Wirkungsgrad zu optimieren. Bei dem untersuchten Gitarren-Lautsprecher entsteht jedoch eine Vielzahl relativ schwach bedämpfter Eigenschwingungen, deren Amplitude größer als die des Antriebs ist. In **Abb. 11.14** sind je zwei der Schnellefrequenzgänge aus **Abb. 11.13** dargestellt: Einmal für einen Messpunkt am Klebefalz der Kalotte (----), einmal für einen randnahen Messpunkt. Von Tiefpassfilterung kann hierbei nicht gesprochen werden, weder beim Celestion (8 umlaufende Rippen), noch beim Fane (glatte Membran).

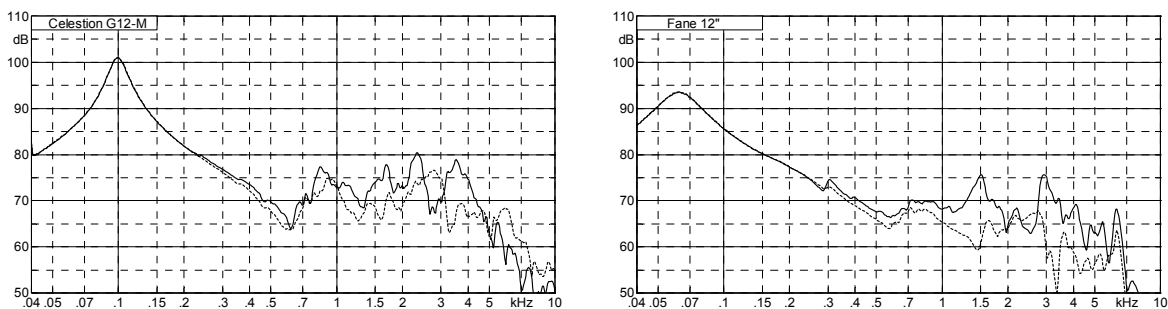


Abb. 11.14: Vergleich der Membranschnellen: Zentrumsnahe Bereiche (----), Randbereiche (—).

Beim Vergleich der beiden Lautsprecher drängt sich die Vermutung auf, dass die verrippte Membran sogar noch resonanzfreudiger ist als die glatte. Überraschend wäre es nicht: Jede von der Schwingspule (bzw. von der Magnetkraft) hervorgerufene Bewegung beginnt am inneren Ende der Membran und breitet sich als Biegewelle über diese aus. Bei jeder Änderung des Wellenwiderstandes, wie dies z.B. bei Rippen oder am Rand geschieht, kommt es zu Reflexionen, sodass letztlich eine Vielzahl primärer und reflektierter Wellen über die Membran laufen. In bestimmten Membranbereichen überlagern sich viele Wellen gleichphasig, was zu besonders starken Schwingungen führt (Schwingungsbauch), in anderen Bereichen löschen sich die Wellen hingegen weitgehend aus, was einen Schwingungsknoten bzw. eine **Knotenlinie** ergibt. Diese Knotenlinien können konzentrische Kreise sein, was bei einer Messung über einem Radiusstrahl als Minimum erfasst wird (**Abb. 11.13** links), sie können aber auch radial verlaufen, was eine zirkuläre Messstrecke erfordert (**Abb. 11.13** rechts).

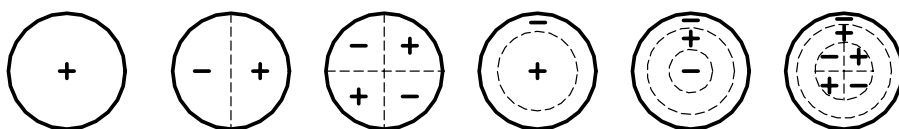


Abb. 11.15: Schwingungsmoden der Membran

In **Abb. 11.15** sind einige typische Membran-Schwingungsbilder dargestellt. Das linke Bild steht für die formstarre Membranschwingung; alle Punkte bewegen sich in dieselbe Richtung. Im zweiten Bild trennt eine Knotenlinie die linke und rechte Hälfte; während die Punkte der einen Hälfte in die eine Richtung schwingen, bewegen sich die Punkte der anderen Hälfte in Gegenrichtung. Diese stehende Welle muss nicht vollständig ausgeprägt sein, es kann auch durchaus noch zusätzlich eine fortschreitende Welle überlagert sein. Die weiteren Bilder zeigen Schwingungsmoden zunehmender Komplexität, die durchaus schon um 1 kHz auftreten.

Die Vielzahl der in Abb. 11.13 dargestellten Maxima und Minima, sowie deren extreme Ortsabhängigkeit, belegt, dass im Mittel- und Hochtonbereich eine Vielfalt unterschiedlicher Moden entsteht, deren genaue Berechnung und Verifikation nicht Gegenstand dieser Untersuchungen sein sollte. Lediglich in einem Bereich erfolgte eine genauere Analyse: Beim G12-M entsteht schon zwischen 300 – 400 Hz eine stark ortsabhängige Membranbewegung, als deren Ursache zwei 21-Moden zu vermuten sind. **Abb. 11.16** zeigt Schwingungsbilder, die für zwei relativ ähnliche Frequenzen entstehen. Dieses Verhalten, von Fleischer* 1994 anschaulich erläutert, ist bei annähernd rotationssymmetrischen Strukturen häufig zu finden. Die bei *ideal* rotationssymmetrischer Form stets doppelt auftretenden Eigenwerte antimetrischer Schwingungsformen (z.B. 21-Mode) spalten sich bei annähernder Rotationssymmetrie in zwei unterschiedliche Werte auf, denen zwei leicht unterschiedliche Eigenfrequenzen zugewiesen werden können. Die zugehörigen Eigenformen sind vom selben Typ, unterscheiden sich aber in der Winkellage ihrer Knotendurchmesser. Genau das ist in Abb. 11.16 zu sehen: Die bei 350 Hz bzw. 374 Hz auftretenden Eigenformen sind um 45° zueinander verdreht.

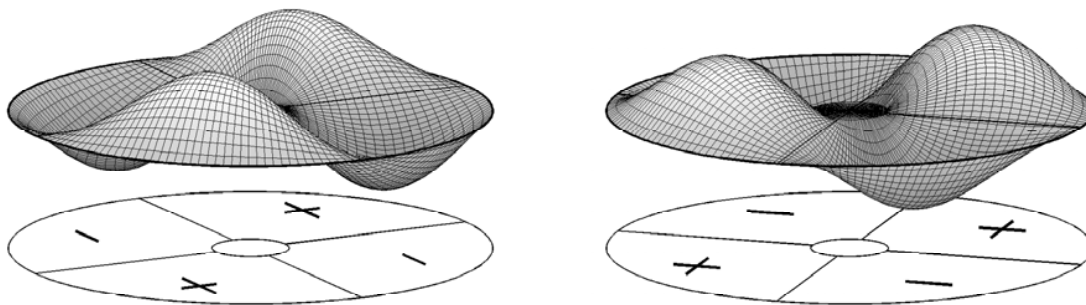


Abb. 11.16: Schwingungsmoden der Celestion-Membran. Die links dargestellte Mode tritt bei 350 Hz auf, die rechts dargestellte bei 374 Hz. Diese beiden Moden sind die tiefstfrequenten dieser 12"-Membran.

Die Membran schwingt, insofern besteht Übereinstimmung zwischen Theorie und Praxis, aber sie schwingt auf derart vielfältige Weise, dass eine Verfeinerung der Theorie-Modelle nicht Gegenstand der geplanten Arbeiten sein konnte. Also Messungen. Im Reflexionsarmen Raum (RAR), zumeist in 3 m Abstand, bei Spannungseinprägung (2.83 V beim 8- Ω -Lautsprecher), oder im Hallraum (HR), ebenfalls Spannungseinprägung (Rosa Rauschen, 2.83 V pro Terz beim 8- Ω -Lautsprecher). Für die ersten Messungen wurde ein 12"-Lautsprecher in ein kleines Holzgehäuse (39x39x25 cm³) und ein etwas größeres Holzgehäuse (39x75x25 cm³) eingebaut. **Abb. 11.17** zeigt die hierzu gehörenden Impedanzfrequenzgänge: Wie erwartet erhöht sich durch die hinzukommende Luftsteifigkeit die Hauptresonanzfrequenz, beim kleinen Gehäuse relativ stark, beim größeren Gehäuse weniger stark.

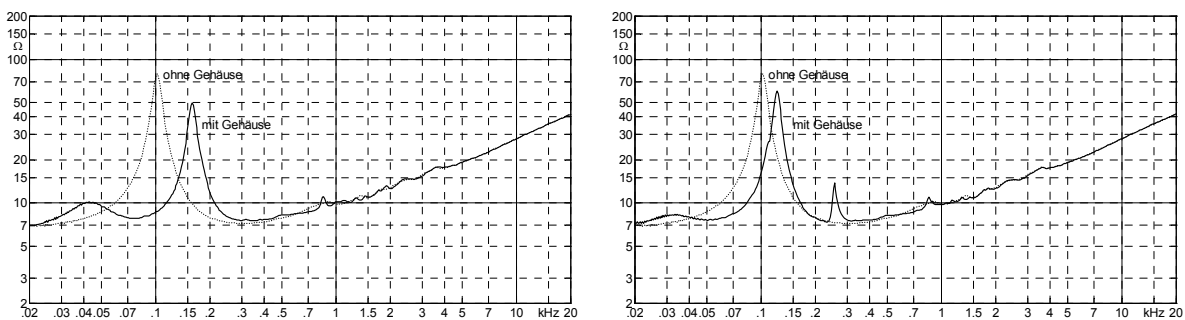


Abb. 11.17: G12-M, Impedanzfrequenzgänge; dichtes Gehäuse 39x39x25 cm³ (links), 39x75x25 cm³ (rechts).

* H. Fleischer: Spinning Modes. Forschungsbericht UniBW München, ISSN 0944-6001.

Die Zunahme der Resonanzfrequenz beträgt beim kleinen Gehäuse etwas mehr als 41%, beim großen etwas weniger. Somit ist die **Luftsteifigkeit** im ersten Fall etwas größer als die Membransteifigkeit*, im zweiten Fall etwas kleiner. Für adiabate Zustandsänderungen ergibt sich die Luftsteifigkeit zu $s_L = 1.4 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot S^2 / V$. Hierbei ist S die effektive Membranfläche, und V das Nettovolumen des Gehäuses. Die **Resonanzfrequenz** berechnet sich aus effektiver Membranmasse m und Gesamtsteifigkeit $s = s_L + s_M$ zu: $f_{Res} = \sqrt{s/m} / 2\pi$. Durch den Einbau in ein dichtes Gehäuse verschiebt sich aber nicht nur die Resonanzfrequenz zu höheren Werten, es entsteht zusätzlich ein Nebenmaximum bei ca. 45 Hz, das auf Undichtigkeiten zurückzuführen ist. Diese "**Leakage-Resonanz**", wie das Nebenmaximum gerne genannt wird, kommt von der in den Spalten bewegten Luftmasse, und von der Luftsteifigkeit s_L . Und natürlich – streng genommen – von der immer mitschwingenden Membran. Mit völlig dichtem Gehäuse müsste die Leakage-Resonanz verschwinden. Müsste sie? Nicht generell, nur mit dichtem Lautsprecher! Jegliche Lüftungs-Bohrung verändert nämlich auch die Leakage-Resonanz.

Über der Hauptresonanzfrequenz sind im Impedanzverlauf weitere Maxima zu sehen, so z.B. beim größeren Gehäuse um 250 Hz. Sie lassen sich Hohlraum-Resonanzen zuordnen, die als Folge der im Gehäuse auftretenden Reflexionen entstehen (stehende Wellen, Kap. 11.8). Im höherfrequenten Bereich, so ab ca. 1 kHz, hat das Gehäuse keinen Einfluss mehr auf die elektrische Impedanz – der Anstieg kommt überwiegend von der Schwingspulen-Induktivität.

Aus Abb. 11.17 wurde deutlich, dass das Gehäuse einen wesentlichen Einfluss auf den Impedanz-Frequenzgang ausübt, für den Klang ist aber der Schallpegel-Frequenzgang maßgeblich. **Abb. 11.18** zeigt hierzu die Unterschiede zwischen Schallwand- und Gehäuse-Montage. Es fallen vor allem zwei Charakteristika auf: Das geschlossenen Gehäuse kann den Bassbereich nicht gut abstrahlen, und es erzeugt zwischen etwa 200 – 2000 Hz eine Reihe von Resonanz-Zacken, die auf **stehende Wellen** zurückzuführen sind. Besonders gut im rechten Bild ersichtlich: Zu 240 Hz gehören 1.43 m Wellenlänge, ins Gehäuse (Innenlänge 72 cm) passt somit genau eine halbe Wellenlänge. Die bei beiden Gehäusen zu findende 800-Hz-Zacke lässt sich der Gehäusetiefe (Innenmaß 21 cm) zuordnen.

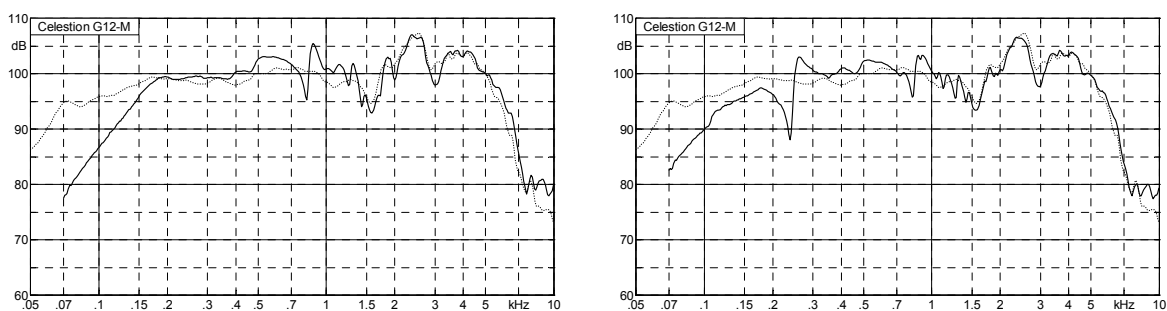


Abb. 11.18: 12"-Lautsprecher. Links: Schallwand vs. 39x39x25-Box; rechts: Schallwand vs. 39x75x25-Box.

Gegen **Hohlraum-Resonanzen** gibt es ein erprobtes Mittel, ohne das keine HiFi-Box auskommt: Dämmmaterial, z.B. Polyesterwatte oder Glas- bzw. Steinwolle. Locker ins Gehäuse gefüllt, werden stehende Wellen gut bedämpft, der Frequenzgang glättet sich. Allerdings verliert man hierdurch an Wirkungsgrad, und das ist bei Gitarren-Lautsprechern in aller Regel unerwünscht, weshalb da zumeist auf jegliche Dämpfung verzichtet wird. Im Gegensatz zur Akustik-Gitarre hat die Elektro-Gitarre ja keinen adäquaten Korpus, der für Hohlraum-Resonanzen sorgen würde – da sind Lautsprecher-Resonanzen durchaus willkommen.

* Gemeint ist mit diesem Begriff immer die Steifigkeit der Membranaufhängung

Abb. 11.19 zeigt Frequenzgänge von bedämpften Gehäusen. Die ins Gehäuse eingebrachten porösen Absorber stellen für die Membran einen reellen Lastwiderstand dar, der Wirkleistung in Wärme umwandelt. Unerwünscht, denn durch diese rückseitige Membranbedämpfung reduziert sich die Membranbewegung, und dadurch auch die Schallabstrahlung.

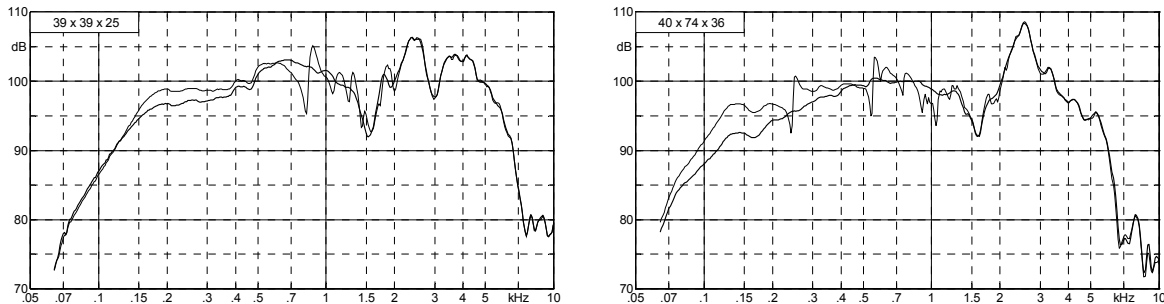


Abb. 11.19: Zwei unterschiedliche Lautsprecher in Gehäusen mit (—) bzw. ohne (---) Absorber.

Neben der Absorption gibt es aber noch eine weitere Möglichkeit, die Ausprägung von Resonanzen zu verringern: Das **offene Gehäuse**. Im unbedämpften geschlossenen Gehäuse wird die von der Membranrückseite erzeugte Schallwelle effizient hin- und herreflektiert, es können sich stehende Wellen hoher Güte bilden. Beim (hinten) offenen Gehäuse hat hingegen ein Großteil der von der Membranrückseite erzeugten Schallenergie nach wenigen Reflexionen das Gehäuse verlassen. Erwünschter Nebeneffekt: Beide Seiten der Membran tragen zur Beschallung der Zuhörer bei. Unerwünschter Nebeneffekt: Desgleichen. Denn natürlich werden sich diese beiden Schallwellen nicht grundsätzlich gleichphasig überlagern, da sind destruktive Interferenzen (Auslöschungen) vorprogrammiert. Die Membran wirkt ja als **Dipol**: Wenn die eine Seite der Membran einen Überdruck erzeugt, entsteht gleichzeitig an der anderen Seite ein Unterdruck. Das ist aber auch beim Bassreflex-Gehäuse so, und trotzdem funktioniert dieses. Grund: Phasendrehungen [z.B. 3], durch Schallumwege und akustische Filter verursacht. Für den Tiefbassbereich ist ein offenes Gehäuse sicher nicht optimal, da löschen sich die von Membran-Vorder- und -Rückseite erzeugten Schallwellen weitgehend aus. Diese Auslöschung wird beim geschlossenen Gehäuse unterbunden, aber auch das hat im Tiefbassbereich seine Probleme, weil hierbei die hohe Luftsteifigkeit die Resonanzfrequenz erhöht. Glücklicherweise ist der Tiefbassbereich für Gitarrenlautsprecher eher unwichtig, zumeist sogar direkt unerwünscht. Und deshalb hatten nicht nur die ersten Gitarren-Combos offene Gehäuse – das ist auch heute noch eine bewährte Standard-Variante.

Abb. 11.20 zeigt Impedanzfrequenzgänge für offene Gehäuse. Durch die Schallführung vergrößert sich die rückseitige Massenbelastung der Membran, die Resonanzfrequenz sinkt geringfügig. Hohlraumresonanzen sind vorhanden, aber stärker bedämpft als bei Abb. 11.19.

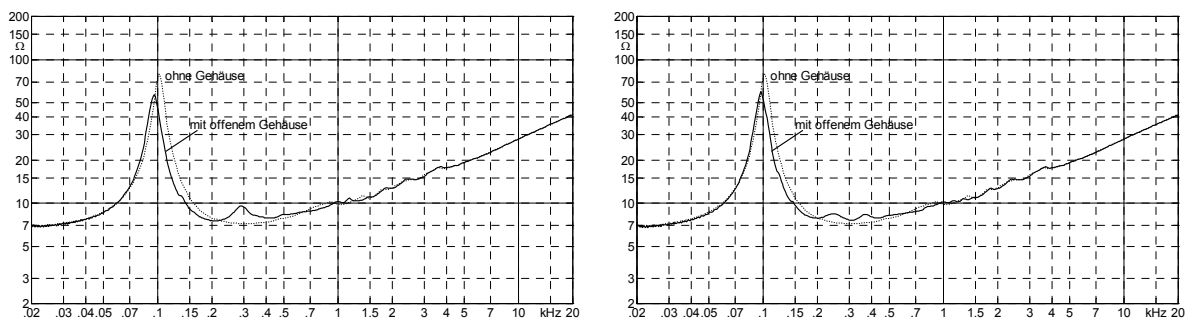


Abb. 11.20: G12-M, Impedanzfrequenzgänge; offenes Gehäuse 39x39x25 cm³ (links), 39x75x25 cm³ (rechts).

In **Abb. 11.21** sind die zu Abb. 11.20 gehörenden Schallpegel-Frequenzgänge dargestellt. Gegenüber der Schallwand-Wiedergabe nehmen die Welligkeiten deutlich zu, haben aber eine andere Charakteristik als beim geschlossenen Gehäuse: Nicht mehr so schmalbandig, sondern globaler, in größeren Bögen verlaufend. Über die in das Diffusfeld abgestrahlte Schalleistung geben die Bilder der zweiten Bildzeile Auskunft: Ab 200 Hz bzw. 160 Hz strahlen die offenen Gehäuse mehr Schall ab, nur im darunter liegenden Frequenzbereich kommt es zu selektiven Abschwächungen. **Fazit:** Das offene Gehäuse ist lauter, aber etwas bassschwächer als das geschlossene. Welches man bevorzugt, ist – wie immer – Geschmackssache.

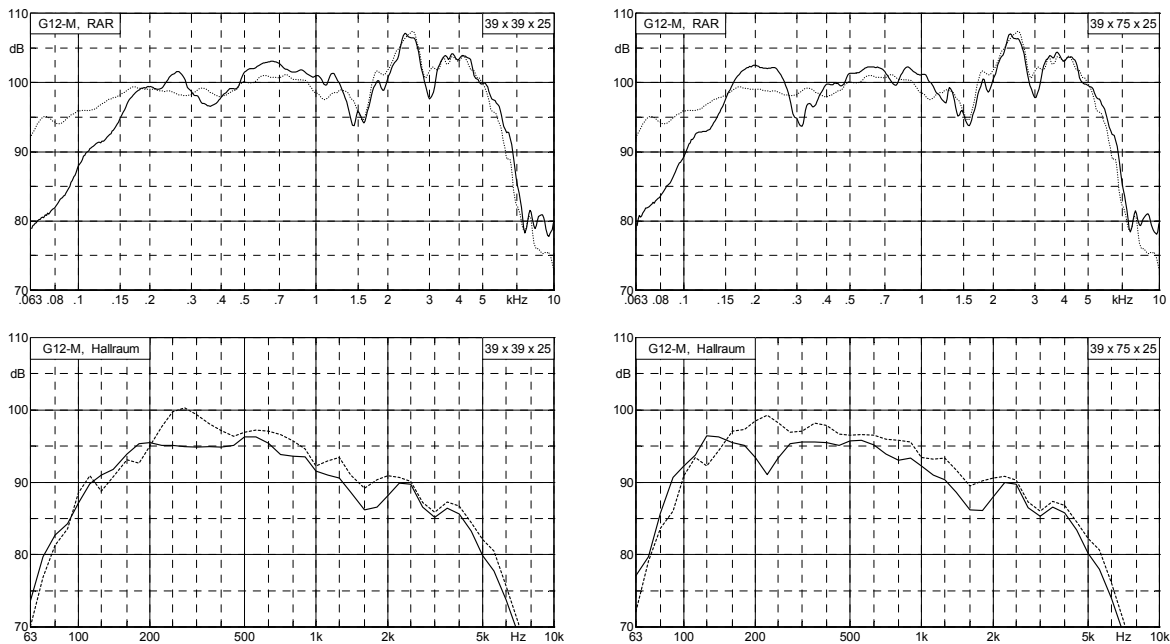


Abb. 11.21 oben: Schallwand vs. offenes 39x39x25-Gehäuse (links) bzw. offenes 39x75x25-Gehäuse (rechts). In der zweiten Bildzeile sind Diffusfeld-Frequenzgänge dargestellt, mit Gehäuse-Rückwand (—) bzw. ohne (---).

Nun könnte man einwenden, dass im Zeitalter MOPS-starker Signalprozessoren der Lautsprecher-Frequenzgang doch gar keine Bedeutung mehr habe, weil sich mit wenigen Programmzeilen jeder beliebige Frequenzgang "designen" lasse. Und wieder fällt der Gitarrenverstärker aus der Rolle: Sofern Endstufen-Verzerrungen gewünscht werden (und viele Gitarristen sind gerade daran interessiert), ist keine digitale Filterung mehr möglich. Denn nach der Endstufe kommt direkt der Lautsprecher, und wie schon in der Systemtheorie unumstößlich verankert: Bei nichtlinearen Systemen darf die Reihenfolge nicht vertauscht werden. Die von der Endstufe abgegebenen elektrischen Signale können nur noch im Lautsprecher und im Gehäuse gefiltert werden, dann kommt der Raum mit seinen unendlichen Weiten. Der Lautsprecher filtert mechanisch mit seiner Membran, das Gehäuse filtert akustisch, und wie man sieht, nicht wenig. Der Konstrukteur hat mit den Gehäuseabmessungen somit wirksame Parameter, um den Frequenzgang letztmalig zu verbiegen – dann verlässt der Schall seine Produktionsstätte. Bei den ersten Gitarren-Combos war vermutlich die Größe des darin unterzubringenden Lautsprechers das Hauptkriterium für die Gehäuse-Abmessungen, und auch bei Jim Marshalls 4x12-Box war's nicht anders: Das Gehäuse war in erster Linie Halterung und Schutz für die Lautsprecher, akustisches Filterdesign war später – wenn überhaupt. Vielleicht ist es ja eine glückliche Fügung, dass die Abmessungen der zu Legenden verklärten frühen Klein-Combos gar nicht allzu weit von Gitarren-Abmessungen abweichen. Hohlraumresonanzen werden durch die Form des Hohlraums bestimmt – was bei der Gitarre gut klingt, könnte ja auch beim Lautsprechergehäuse für die richtige Klangfarbe sorgen.

Die tiefste Korpus-Resonanz (sog. Helmholtz-Resonanz^{*}) der Akustik-Gitarre liegt zwischen Fis2 und A2, also bei 92 – 110 Hz. Das ist genau der Bereich, in dem die meisten Gitarren-Lautsprecher ihre Hauptresonanz haben – wenn man sie nicht in ein kleines, dichtes Gehäuse einbaut. Denn damit kann, wie aus Abb. 11.17 ersichtlich, die Resonanz auf 160 Hz steigen, und das entspricht schon fast einem E. Aber nicht dem E2 der tiefen E-Saite, sondern dem eine Oktave höher liegenden E3. Kombiniert man nun diese hochabgestimmte Box mit einem der legendären Verstärker-Ahnen (z.B. Tweed Deluxe oder AC-15), entstehen ganz andere Frequenzgänge als in Abb. 11.18 abgebildet. Diese frühen Verstärker hatten nämlich Röhren-**Endstufen ohne Gegenkopplung**, und damit einen sehr speziellen Innenwiderstand: Im Kleinsignalbereich kann man fast schon von Stromeinprägung sprechen, bei Übersteuerung (Clipping) ist näherungsweise die Spannung eingepreßt. Alle bisher in diesem Kapitel dargestellten Schallpegel-Frequenzgänge wurden mit Spannungseinprägung gemessen; wechselt man zur Stromeinprägung, multipliziert sich der Impedanzfrequenzgang auf den Übertragungsfaktor. Wenn nun also die Impedanz bei 160 Hz von 7 Ω auf 50 Ω steigt, erhält man beim Schallpegel 17 dB Anhebung! Nicht alle Endstufen verzichten auf Gegenkopplung, bei Fender gehört sie z.B. ab den 60ern zur Standardausrüstung. Bei VOX indes nicht, der AC-30 wird auch heute noch ohne Gegenkopplung gebaut. Endstufen ohne Gegenkopplung sind hochohmig, 200 Ω Innenwiderstand sind damit leicht erreichbar. Mit Gegenkopplung sinkt der Innenwiderstand, aber nicht auf null, denn zum einen verringert ein zu hoher Gegenkopplungsfaktor die Verstärkung (und die steht bei Röhrenverstärkern nicht beliebig zur Verfügung), zum andern verursachen Phasendrehungen sehr leicht Instabilitäten. Somit kann eine gegengekoppelte Endstufe leicht 20 Ω Innenwiderstand aufweisen, und beim o.a. Beispiel zwar nicht mehr 17 dB, aber immer noch 9 dB Resonanzüberhöhung bewirken.

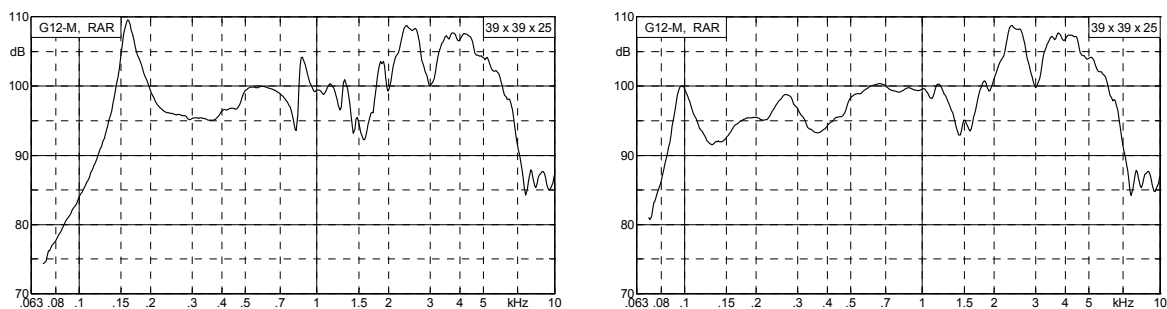


Abb. 11.22: Schallpegel-Frequenzgänge bei Stromeinprägung, 39x39x25-Gehäuse; geschlossen (li.), offen (re.)

Abb. 11.22 zeigt für das kleine Gehäuse Frequenzgänge, die bei **Stromeinprägung** entstehen. In dieser Betriebsart kann keine Rede mehr vom basschwachen geschlossenen Gehäuse sein, die (gegenüber dem offenen Gehäuse) tiefere Resonanzfrequenz sorgt für die nötige Tiefenanhebung. Im linearen Betrieb, muss man immer ergänzen, denn bei hoher Aussteuerung wird die Endstufe niederohmiger, und zusätzlich bewirken Nichtlinearitäten des Ausgangsübertragers eine ziemlich komplizierte Signalformung. Hier ist Raum für den Entwickler, der aus der Kombination Endstufe/Übertrager/Lautsprecher/Gehäuse ein überzeugendes Produkt schaffen kann, dessen Eigenschaften mit einigen wenigen Diagrammen sicher nicht vollständig beschreibbar sind. Frequenzgänge helfen, Übertragungsfunktionen objektiv zu dokumentieren. Nicht mehr, nicht weniger. Die endgültige Entscheidung fällt aber beim Hörtest, und nicht im Reflexionsarmen Raum. Und nicht vergessen: Auch die Augen "hören" mit! Nicht selten hat ein Combo seine finale Prüfung im Musikgeschäft nur deshalb nicht bestanden, weil der falsche Name drauf stand.

* Diese Resonanz wird nicht alleine vom Hohlraum, sondern auch von mitschwingenden Wänden definiert.

Einen Eindruck von der Vielfalt der Gestaltungsmöglichkeiten, die sich alleine mit dem Lautsprecher-Gehäuse bieten, gibt **Abb. 11.23**. Der G12-M wurde hierzu in 5 verschiedene typische Gehäuse eingebaut, deren Rückwand entweder offen, halboffen oder geschlossen war. Die verschiedenen Zacken, die je nach Gehäuse bei unterschiedlichen Frequenzen entstehen, sind Auswirkungen der geometrie-spezifischen Hohlraumresonanzen. Die Holzart des Gehäuses spielt demgegenüber keine Rolle, solange dieses nicht untypisch fragil gebaut ist.

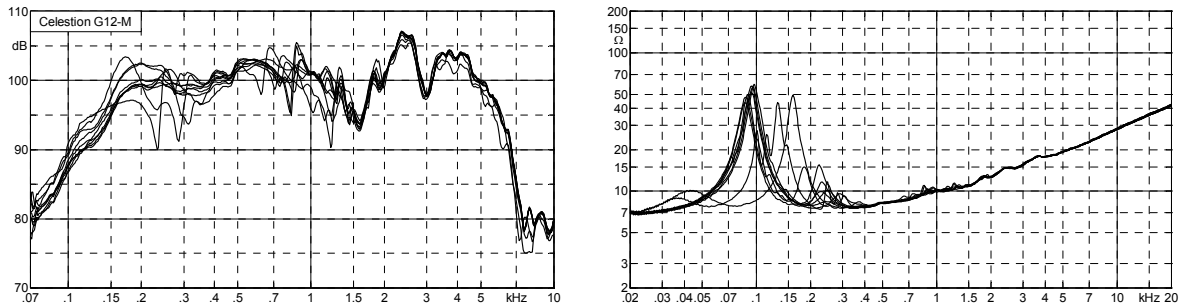


Abb. 11.23: Schallpegel-Frequenzgänge bei Spannungseinprägung, RAR, auf Achse, diverse Gehäuse. 1W/1m. Im rechten Bild sind die hierzu gehörenden Impedanz-Frequenzgänge dargestellt.

Um nochmals die **DSP-Filterung** aufzugreifen: Natürlich können die in dieser Abbildung dargestellten Frequenzgänge per Software approximiert werden. Die Verstärker/Lautsprecher-Schnittstelle verbindet aber zwei nichtlineare, interagierende Systeme – mit einfachem Pol-Nullstellen-Design kommt man da nicht ans Ziel. Und nicht zu vergessen: Der Lautsprecher filtert richtungsabhängig, das kann ein DSP-bestückter Modeling-Amp nie simulieren. Denn die vom DSP berechnete Filterung wirkt für alle Abstrahlrichtungen in gleicher Weise, wohingegen jedes Gehäuse seine geometrie-spezifische Richtcharakteristik hat (Kap. 11.4).

Die beiden für **Abb. 11.21** verwendeten Gehäuse waren ganz bewusst mit speziellen Abmessungen gebaut worden, um deutliche Resonanzeffekte zu erzeugen – direkt genretypisch sind sie aber nicht. Deshalb folgen nun Messungen in einem VOX-Gehäuse. Nicht im AC-30, denn hier interferieren *zwei* Lautsprecher, sondern im AD60-VT, einer modernen Behausung für einen VOX-typischen Celestion-12-Zöller. Seit den späten 50ern war Celestion bei VOX Hoflieferant, trotz aller Versuche von Goodmans und Fane. In dieses AD60-VT-Gehäuse eingebaut wurden: G12-80, G12-M, G12-H, G12-S, Vintage-30, G12-Century, Celestion blue, und der Original-Lautsprecher dieses Verstärkers. **Abb. 11.24** zeigt die gemessenen Frequenzgänge, wieder auf 1W / 1m normiert.

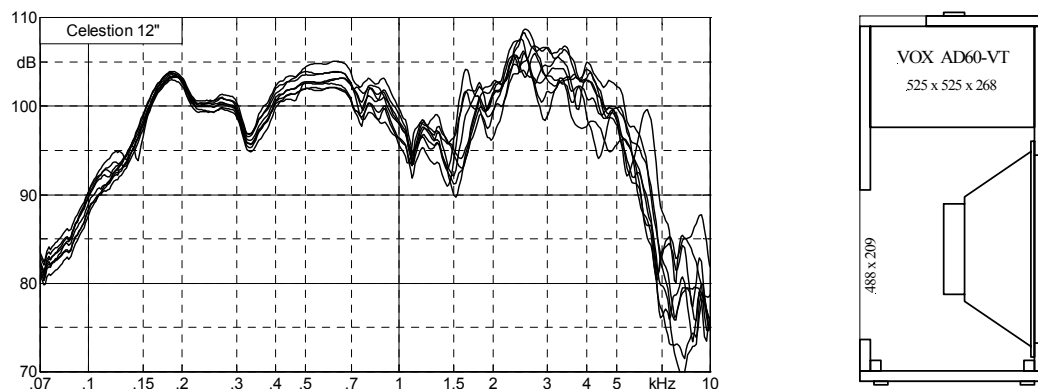


Abb. 11.24: Schallpegel-Frequenzgänge, diverse Celestion-12"-Lautsprecher im AD60-VT-Gehäuse; 1W / 1m.

Die in Abb. 11.24 dargestellten Kurven haben viele Gemeinsamkeiten, aber auch selektive Abweichungen, die im relevanten Frequenzbereich schon mal 5 dB überschreiten. Es sind ja auch sehr unterschiedliche Lautsprecher, mit Belastbarkeiten von 15W – 80W, und Preisen von 127 – 584 Euro (Anno 2000, offensichtlich ernst gemeint). Details zeigt **Abb. 11.24**, und plötzlich ist man sich nicht mehr so sicher, ob nicht irrtümlich derselbe Lautsprecher zweimal vorkommt. Doch nein, das sind alles unterschiedliche, bei genauer Betrachtung der kleinen Zacken sieht man die Abweichungen. Die den ganzen Aufwand rechtfertigen, denn es muss ja einen Grund geben, dass Celestion so viele verschiedene 12-Zöller baut. Wobei *vielen* irreführend sein könnte, denn dieser kleine Ausschnitt ist ja erst ein winziger Bruchteil der angeblich weit über 100 verschiedenen Varianten. Wenn Dir der Vintage-30 Deines Amps nicht gefällt: Hol Dir den Celestion blue, inzwischen ist der Preis auf leckere 349 Euro gefallen.

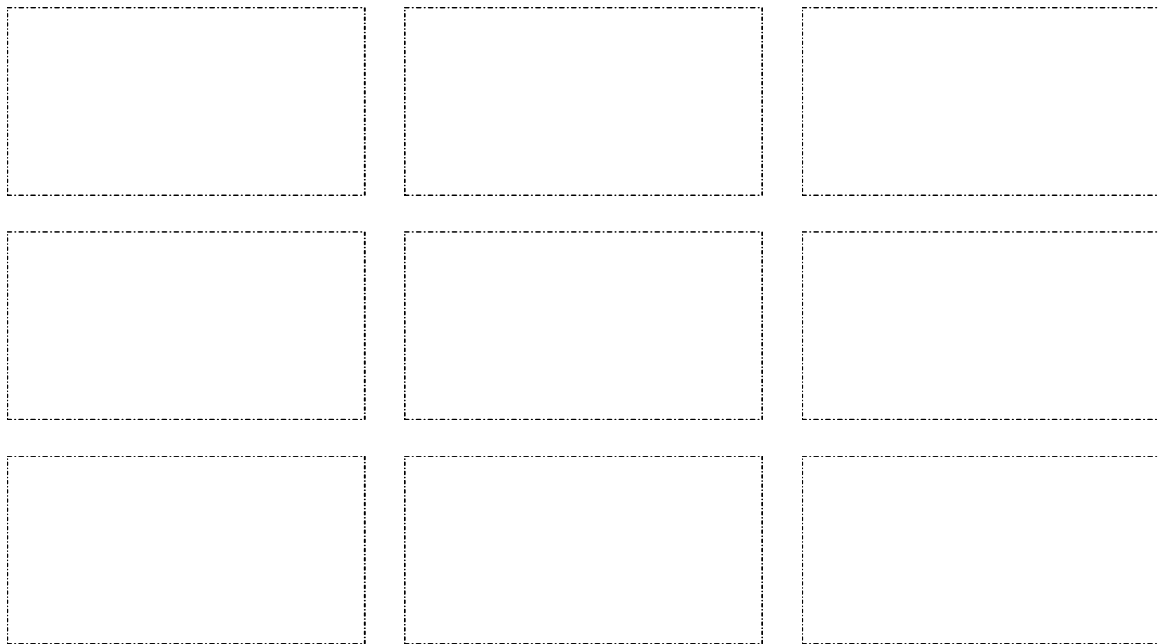


Abb. 11.25: Vergleich verschiedener Celestion-12"-Lautsprecher. RAR, AD60-VT-Gehäuse, 1W/1m.
Diese Abbildungen bleiben der Druckversion vorbehalten

In der oben erwähnten 2000er-Preisliste kostet der "blue" knapp viermal so viel wie der Vintage-30. Das macht irgendwie Sinn, denn der Vintage-30 ist mit 60 W ja auch viermal so hoch belastbar wie der "blue": Vertriebs-Mathematik kann ja so einfach sein: 155 Euro für 60W, 584 Euro für 15W. Das rechtfertigt einen genaueren Blick auf diese beiden Kandidaten: Tatsächlich gibt's neben vielen Gemeinsamkeiten auch Unterschiede (**Abb. 11.26**), aber: da ist (im rechten Bild) noch ein anderer Bewerber im Rennen – mit ähnlichem Pegelverlauf.

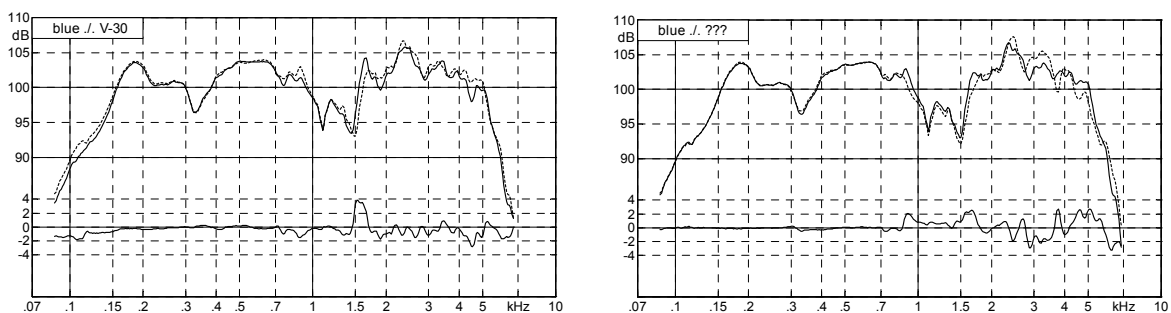


Abb. 11.26: Celestion "blue" (—), verglichen mit Celestion Vintage-30. RAR, AD60-VT-Gehäuse, 1W / 1m.

Aus der untersten Kurve des linken Bildes kann entnommen werden, dass zwischen dem "blue" und dem Vintage-30 die Betrags-Unterschiede zumeist kleiner als 2 dB sind; nur eine Stelle zeigt etwas größere Abweichungen. Bei den im rechten Bild dargestellten Kurven sind die maximalen Abweichungen etwas kleiner, die mittlere quadratische Abweichung ist aber sogar noch größer als beim linken Bild. Was ist das für ein Lautsprecher? Aus Sicht eines Herstellers mag es als Unverschämtheit gelten, wenn da jemand trotz des abschreckend hohen Preises gleich zwei blaue Celestion kauft – und miteinander vergleicht. Tja, es war einfach zu reizvoll. Natürlich stellen zwei Exemplare immer noch nicht die Menge dar, die man für verlässliche Varianz-Analysen bräuchte. Deshalb ohne abgesicherte Signifikanz: **Nach den vorliegenden Messergebnissen liegen die Unterschiede zwischen einem Celestion "blue" und einem Vintage-30 in derselben Kategorie wie die Unterschiede zwischen zwei Celestion "blue"**. Die Unterschiede zwischen "blue" und V-30 sind gerade eben hörbar, die zwischen den beiden Blauen aber auch. Wenn sich die Schallpegel zweier zufällig ausgewählter Celestion "blue" schon um ± 3 dB unterscheiden, muss angenommen werden, dass über die "handgefertigte Serie" hinweg sogar noch größere Toleranzen auftreten – die Aussage "der Vintage-30 klingt mittiger als der blaue Celestion" ist damit nicht mehr haltbar. Erweitert man den Begriff *intraindividuell* vom Individuum auf die typgleiche Gruppe (alle Blauen), lautet die Erkenntnis: Bei derartig großen intraindividuellen Toleranzen sind die interindividuellen Toleranzen nicht signifikant; der Vintage-30 klingt im Mittel wie der Celestion "blue". Gewiss, das ist spekulativ. Die Stichprobe ist viel zu klein, es könnte auch sein, dass einer der beiden gekauften Blauen zufällig aus der Art schlägt. Nun denn, der Autor hat in bodenloser Impertinenz noch weitere Paare einer vergleichenden Messung zugeführt: **Abb. 11.27**. Und um falschen Vermutungen gleich zu begegnen: Alle Lautsprecher waren paarweise gekauft worden, keiner war "reconed", keiner war mal überlastet worden.

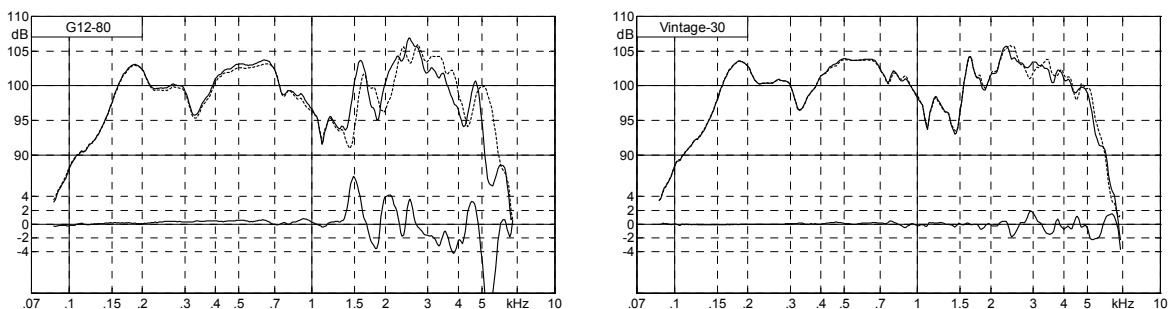


Abb. 11.27: Vergleich zweier typgleicher Celestion-Lautsprecher: 2 x G12-80 (links), 2 x Vintage-30 (rechts).

Was passieren kann, wenn ein Lautsprecher "reconed" wird, vulgo eine Austauschmembrane bekommt, zeigt **Abb. 11.28**: Da hatte jemand einen alten AC-30-Lautsprecher "reconed", aber mit der falschen Membran! So viel zum legendären Vintage-Sound.

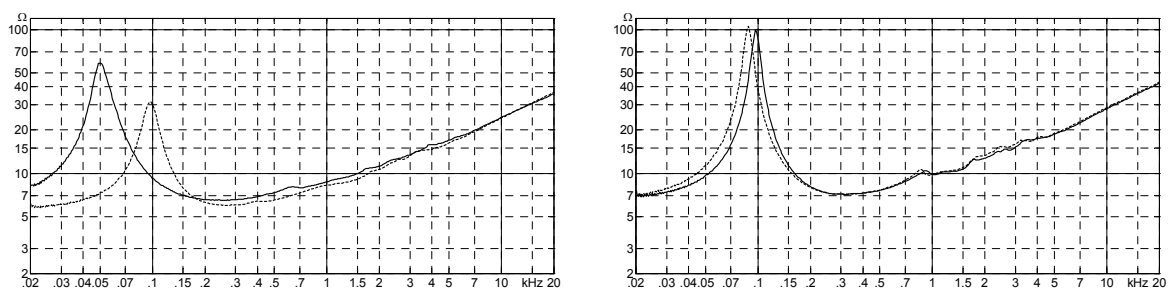


Abb. 11.28: Links: Impedanz-Frequenzgänge der beiden Celestion-Lautsprecher eines 60er-Jahre AC-30. Rechts: Impedanz-Frequenzgänge der beiden Celestion "blue" aus Abb. 11.26 (ohne Gehäuse gemessen).

Die Messergebnisse typ- bzw. bauartgleicher Lautsprecher mahnen zur Vorsicht: Auch wenn man unterstellt, dass Lautsprecher aus moderner Fertigung vernachlässigbare Toleranzen aufweisen – bei den heiligen Kühen der 60er oder gar der 50er sind diesbezüglich Zweifel angebracht. Klingt der für schlappe 4000 \$ angebotene AC-30 (copper panel) so gut, weil seine Lautsprecher inzwischen lange genug "eingespielt" sind? Oder weil zwischenzeitlich mit No-Name-Membranen "reconed" wurde? Auf die der hilfsbereite Glang-Hi diskret T530 gestempelt hatte? Oder sind gar ungespielte NOS-Typen* drin?? Die sollen jetzt ja immer häufiger zum Vorschein kommen. Gut möglich auch, dass *neue Nachbauten* drinstecken; auf den alten, im Keller entdeckten Originalmaschinen von britischer Hand mit Liebe gewickelt. Das wäre allerdings uncool, weil: Selbst wenn die von Murphy persönlich "ge-aged" worden wären, nix geht über the real stuff. Nur: Was ist real, wenn 2 originale G12-80 um ± 5 dB differieren? Die Frage muss unbeantwortet bleiben, solange die Vita der meisten alten Lautsprecher im Dunkel der Geschichte liegt, und künstlich hochgehaltene Preise Mengenuntersuchungen erschweren.

Verweilen wir also bei den vorhandenen Lautsprechern, und gedenken der Beschränktheit des Seins im Allgemeinen und des Frequenzgangs im Besonderen. Eine RAR-Messung ist ein notwendiges, aber kein hinreichendes Kriterium. Natürlich muss auch die Bündelung berücksichtigt werden (kommt in Kap. 11.4), und die Nichtlinearitäten (Kap. 11.6). Um aber zumindest eine pauschale Aussage zur Richtcharakteristik machen zu können, stellt **Abb. 11.29** Hallraum-Messungen vor. Die keine Überraschung offenbaren: Einige dB Unterschied über alle gemessenen Celestion-Lautsprecher, und kleine Abweichungen zwischen dem Vintage-30 und dem Celestion "blue", die aber wieder nicht signifikant aus der (vermuteten) Produktionstoleranz herausragen. Es wäre sicherlich übertrieben, allen (gemessenen) Celestions denselben Sound zu attestieren; es gibt Unterschiede, und die sind hörbar. Bei aller Würdigung des einen oder anderen Dezibels, um das sich die Frequenzgänge hier und dort unterscheiden, darf aber nicht übersehen werden: Stellt man den Combo von den zwei übereinander gestapelten Bierträgern runter auf den Boden, gibt's Pegeländerungen in derselben Größenordnung. Gratis!

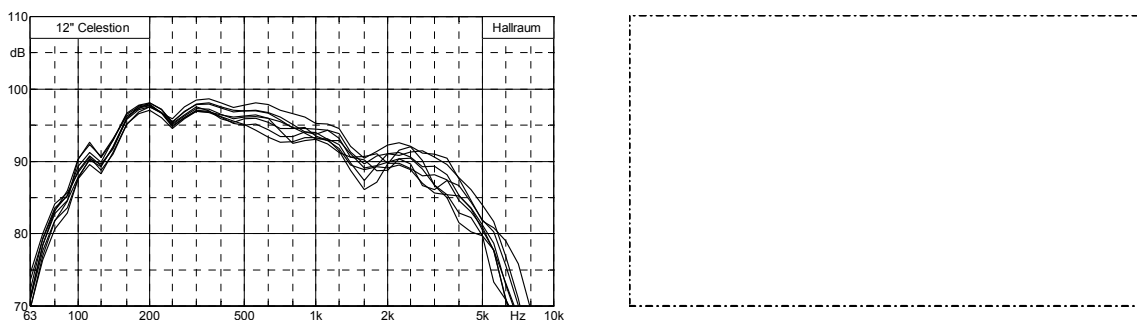


Abb. 11.29: Hallraummessung: Überlappende Terzanalyse, Rosa Rauschen, rotierendes Mikrofon. Im rechten Bild sind der Celestion "blue" (—) und der Vintage-30 (---) gegenübergestellt.

Damit sollte **Celestion**, dem Hersteller von *"the finest guitar loudspeakers that money can buy"* genügend Raum gewidmet worden sein – es gibt ja schließlich noch andere. Nein, nicht **Goodmans**, *"the largest UK manufacturer of loudspeakers"*. Auch nicht **Fane**, *"Home of the greatest high power speakers in the world"*. Und auch nicht **JBL**, *"the leading loudspeaker manufacturer in the world"*. Sondern **Eminence**, *"the world's largest loudspeaker manufacturing company"*, und **Jensen**, schlicht Erfinder des Lautsprechers. Was Celestion für VOX und Marshall ist, war Jensen für Fender. Von den 40ern bis in die 60er wurden bei Fender Jensen Alnico-Lautsprecher eingebaut, bis ca. 1967 Jensen Keramik-Lautsprecher. Als Alternative gab es zwar auch die D-Serie von JBL, aber Jensen war der Standard.

* NOS = New Old Stock = fabrikneue Lagerware. Angeblich seit Jahrzehnten gelagert.

Schon der erste Blick auf eine P12-R-Membran offenbart eine andere Bauweise, die vom Celestion-Standard deutlich abweicht: Kleinere Staubschutzkalotte, mehr und anders geformte Membran-Rillen (Corrugations). **Abb. 11.30** verdeutlicht die Unterschiede: Der Jensen ist etwas leiser als der Celestion, aber höhenbetonter. Zumindest die zweite Eigenschaft dürfte ganz im Sinne der Fender-Gemeinde sein, die "silbrig glänzenden Höhen" erwartet.

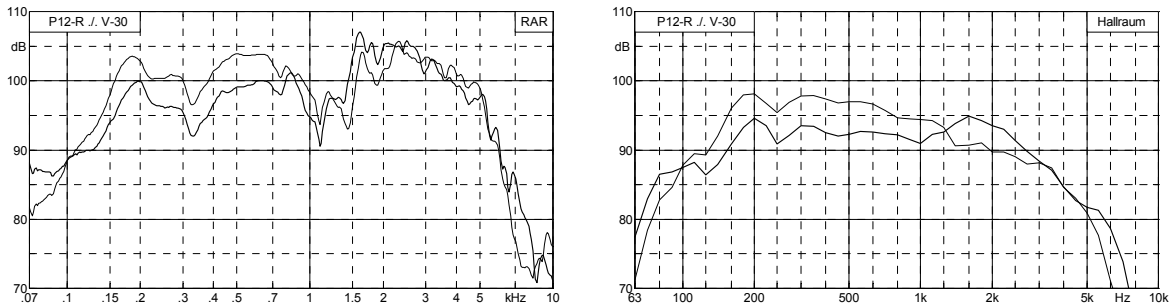


Abb. 11.30: Vergleich Celestion Vintage-30 (—) vs. Jensen P12-R (—) im AD60-VT-Gehäuse.

Man kann natürlich sofort die Frage stellen, wie sinnvoll es ist, einen typischen Fender-Lautsprecher in ein VOX-Gehäuse einzubauen. Nur: Wie sonst soll man vergleichen? Beide im Fender-Gehäuse? Das ginge dann aus denselben Gründen nicht. Jedem in seinem Gehäuse? Dann würde man nicht nur zwei Lautsprecher, sondern zusätzlich zwei unterschiedliche Gehäuse vergleichen. Jeden in der Schallwand? Das wäre absolut bühnen-untypisch. Aus der fast unendlichen Anzahl möglicher Gehäuse wurde sehr willkürlich der AD60-VT ausgewählt – irgendeiner musste es ja werden. Und um Vergleiche zu den bisher dargestellten Messungen zu ermöglichen, wurden auch alle anderen Lautsprecher in diesem Gehäuse analysiert.

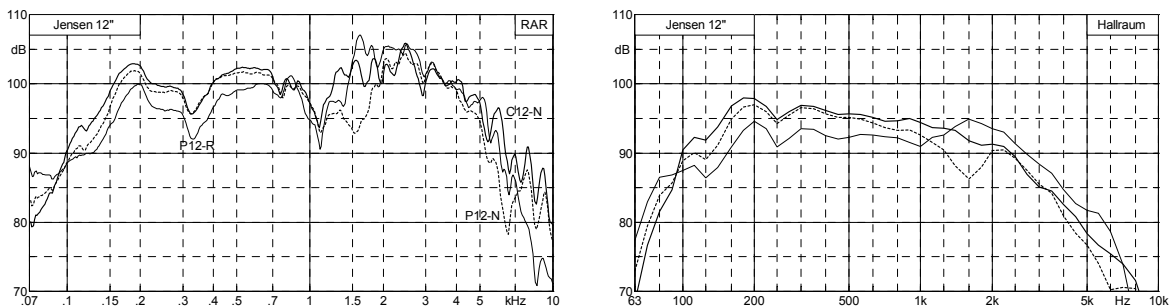


Abb. 11.31: Drei Jensen-Lautsprecher im Vergleich: P12-R, P12-N, C12-N im AD60-VT-Gehäuse.

In **Abb. 11.31** werden drei Fender-typische Jensen 12-Zöller verglichen. Anders als bei den untersuchten Celestions, deren Messkurven ja große Ähnlichkeiten zeigen, sind die Unterschiede bei den Jensens viel stärker ausgeprägt. Die unterscheiden sich nicht nur in der Belastbarkeit, da werden verschiedene Sound-Philosophien realisiert: Der höhenbetonte P12-R, der Celestion-ähnliche P12-N mit dem ausgeprägten 1.5-kHz-Loch, und der ausgeglichene C12-N. Sofern man bei ± 6 dB Schwankungen noch von Ausgeglichenheit sprechen möchte. Aber diese Frequenzgang-Zacken sind genretypisch, keinen dieser Lautsprecher sollte man nur wegen seines Schallpegel-Frequenzgangs als "besser" oder "schlechter" bezeichnen. Man könnte sich beim P12-R einen etwas höheren Wirkungsgrad wünschen, das ist es dann aber auch, der Rest ist Geschmackssache. Gitarristen, die einen wenig-verzerrten, brillanten Sound schätzen, greifen gerne zu Jensen, Distortion-Rocker eher zu Celestion. Und dann gibt es natürlich noch die Gitarristen, die einen wenig-verzerrten, nicht ganz so brillanten Sound ... das ist wie bei Loriots Hunden.

Nun zu **Eminence**, Fenders Lautsprecher-Wahl nach 1967. **Abb. 11.32** zeigt, dass auch diese Lautsprecher Eigenständigkeit beweisen, sowohl im Direktschall (RAR), als auch im Diffus-schall (Hallraum). Sowohl von Jensen als auch von Eminence gibt es ca. ein Dutzend gitarren-geeigneter 12"-Lautsprecher; nur je drei wurden ausgewählt und analysiert.

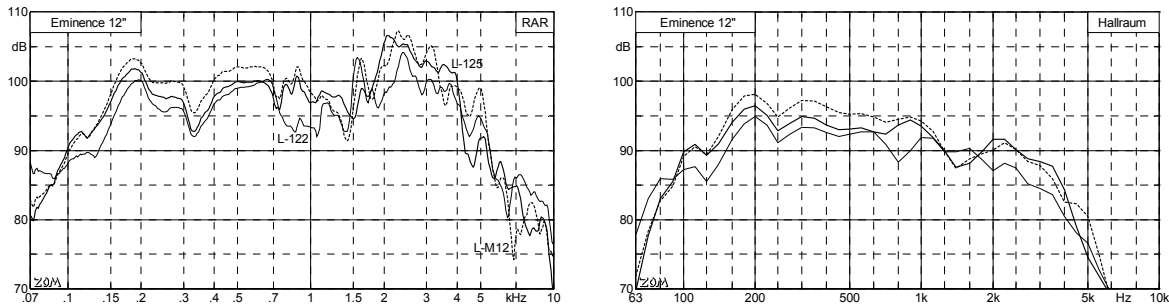


Abb. 11.32: Drei Eminence-Lautsprecher im Vergleich: L-122, L-125, L-M12 im AD60-VT-Gehäuse.

Ergänzend soll nun doch noch ein **Fender-Gehäuse** zum Einsatz kommen, um zumindest einmal Jensen und Eminence in ihrer angestammten Umgebung zu betreiben: Ein Tweed Deluxe (**Abb. 11.33**). Der kleine 14-W-Verstärker des Tweed Deluxe (5E3) würde keinen dieser Lautsprecher überfordern, authentisch wäre ein Jensen P12-R. Die Messungen (wie immer nicht am Gitarrenverstärker, sondern mit Spannungseinprägung) offenbaren Unterschiede, die in ganz ähnlicher Weise auch im AD60-VT-Gehäuse auftraten – insofern also keine Überraschungen. Bis etwa 2 kHz sind signifikante, gehäusotypische Unterschiede zu erkennen, die man je nach Mentalität und Sendungsbewusstsein als "Welten" oder "Petitessen" bezeichnen kann. Zumindest dem 190-Hz-Maximum in Abb. 11.32, dem ein 320-Hz-Loch folgt, sollte man Bedeutung beimessen – das ist schon sehr VOX-typisch.

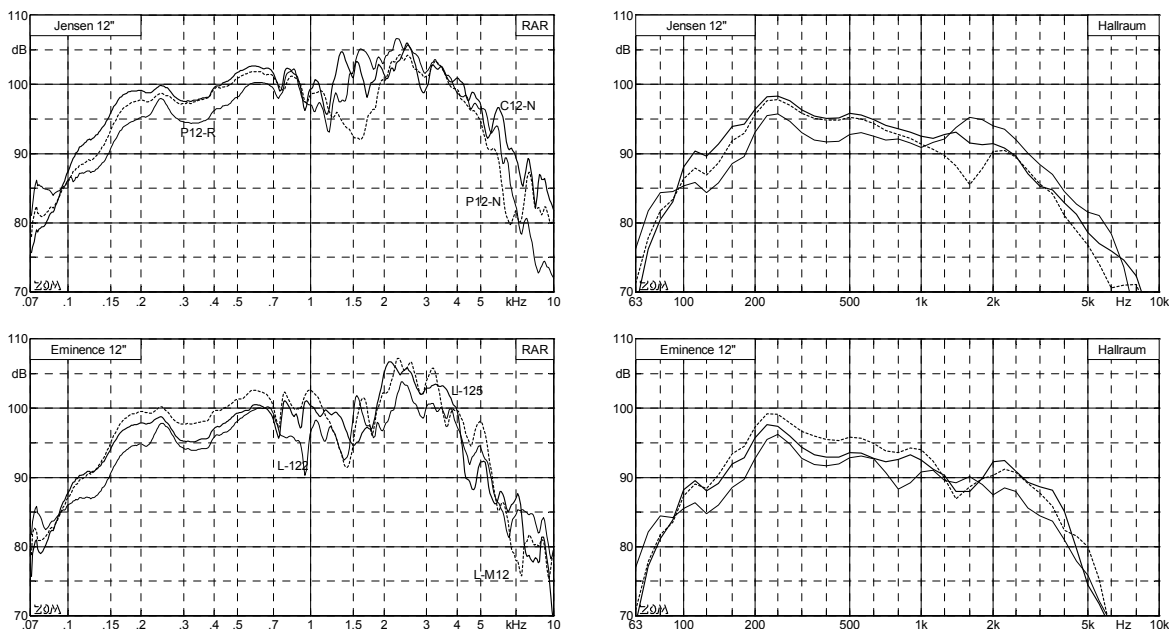


Abb. 11.33: Messungen im Tweed-Deluxe-Gehäuse: Jensen und Eminence 12"-Lautsprecher.

Den 12"-Lautsprechern war nun relativ viel Platz eingeräumt worden. Bevor jetzt etwas knapper die 10"- und 15"-Lautsprecher an die Reihe kommen, erst mal der Versuch einer Wertung, einer Klassifizierung signifikanter Unterschiede (**Abb. 11.34**):

In **Abb. 11.34** sind drei verschiedene Merkmale herausgestellt. Sie wurden nicht mit aufwändiger Faktorenanalyse erarbeitet, sondern – hoffentlich nicht allzu willkürlich – aus den Frequenzgängen nach visuellen Kriterien erstellt. Das erste Kriterium ist der bis etwa 1 kHz erreichte Wirkungsgrad, also die Höhe (der dB-Wert) des Schallpegel-Frequenzgangs. Bei den untersuchten 12"-Lautsprechern finden sich hier Unterschiede bis maximal 4 dB, was schon erwähnenswert ist: Eine Pegelerhöhung um 4 dB entspricht einer Leistungssteigerung um 150%, also z.B. von 10 W auf 25 W. Beziehungen zur **Lautheit**, die von Seiten der Psychoakustik gerne hergestellt werden, sind erlaubt, bedürfen aber besonderer Vorsicht: Die einfache Regel "Lautheitsverdopplung erst bei 10 dB Pegelerhöhung" gilt für (ausreichend laute) 1-kHz-Töne, die nicht verdeckt sind! Ein Gitarrenton, der sich gegen breitbandige Konkurrenzschalle durchsetzen muss, fällt nicht in diese Kategorie! (Mehr unter "Lautheitsdrosselung" in den Standardwerken der Psychoakustik). 4 dB, das ist im Bühnenalltag (im "Stage Business") der Unterschied zwischen "immer etwas zu leise" und "jetzt passt's".

Als zweites Kriterium wurde der Mittenbereich ausgewählt, der für diesen Vergleich von ca. 600 Hz bis ca. 4 kHz definiert wird (also incl. Präsenzbereich). Hier gibt es Lautsprecher mit und ohne **Mittenloch**: Bei den Celestions ist es generell stark ausgeprägt, beim Eminence L-125 eher wenig. Als letztes Kriterium soll zwischen einem eher glatten Pegelverlauf bei mittleren und hohen Frequenzen, und einem **resonanten Verlauf** unterschieden werden. Zur ersten Gruppe zählen z.B. der G12-H oder der P12-N, zur zweiten der G12-80 und der Originallautsprecher der AD60-VT. Die Hauptunterschiede aller gemessenen Celestions zeigen sich bei diesen Resonanzzacken: Ihre Ausprägung (Dämpfung bzw. Güte) und ihre Frequenzen sind klangformend – aber eben auch starken Fertigungsstreuungen unterworfen, wie Abb. 11.26 und 11.27 deutlich gezeigt haben.

Die Antwort auf die Frage: "Was ist denn nun der beste Lautsprecher"? muss aus zwei Gründen unterbleiben: Wenn fertigungsbedingte Streuungen bei typgleichen Lautsprechern größer sind als typspezifische Unterschiede, ist Klassifizieren problematisch. Und: Abgesehen vom Wirkungsgrad sind Klangbewertungen subjektiv. There are more speakers between ...

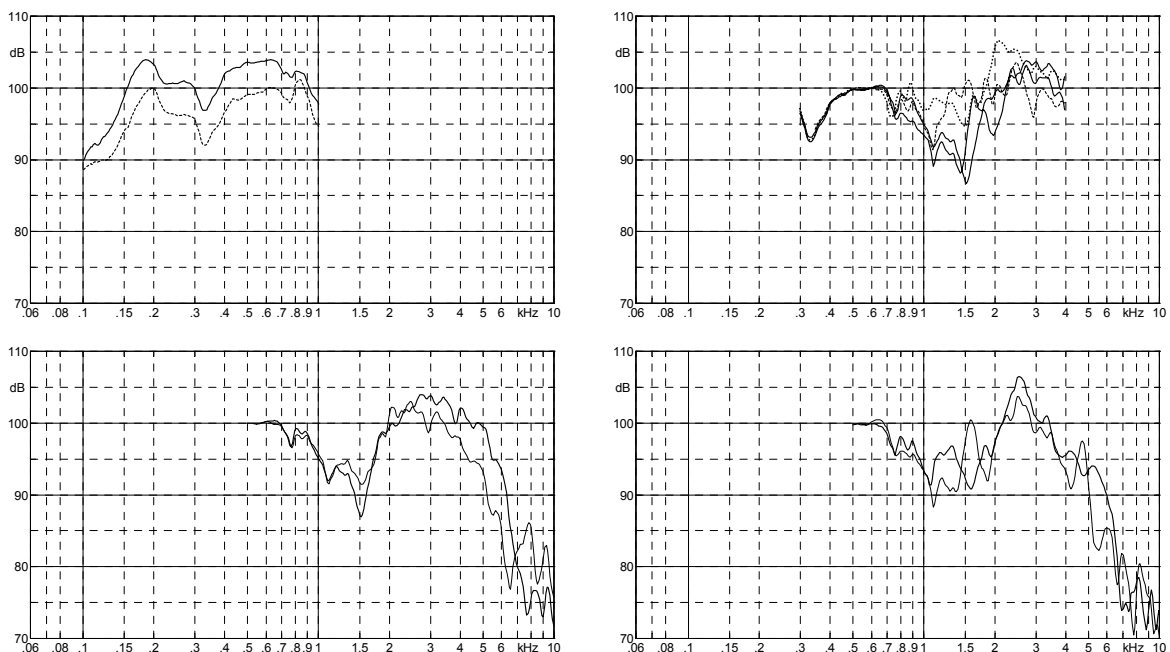


Abb. 11.34: Lautsprecher-Unterscheidungsmerkmale: 0.1 – 1 kHz (links oben), 0.6 – 4 kHz (rechts oben), relativ glatter Hochtonbereich (links unten), resonanter Hochtonbereich (rechts unten).

Nun zu den **10"-Lautsprechern**, die einzeln in kleinen Combos (z.B. Princeton), aber auch als 4x10"-Variante in erwachsenen Verstärkern (Super Reverb, Bassman) zu finden sind. Im Vergleich zum 12"-Lautsprecher ist die Membranfläche des 10-Zöllers um 30% kleiner; die Membran kann daher (bei gleicher Schwingungsamplitude) weniger Luft in Bewegung setzen. Etwas präziser: Bei gleicher Membranbewegung strahlt die kleinere Membran weniger Schallleistung ab. Ein 10-Zöller muss (bei gleicher Leistungsaufnahme) nicht in jedem Fall leiser sein als ein 12-Zöller – in vielen Fällen ist er's aber. Die "goldene Regel": *Je größer der Lautsprecher, desto lauter* hat eine bestechende Begründung: Wenn die Membranfläche gegen null geht, muss der Wirkungsgrad ebenfalls null werden. In der Realität ist der Membrandurchmesser aber auch nicht annähernd null, die Begründung ist irreführend. Außer von der Membranfläche hängt der Wirkungsgrad nämlich auch noch von der Membranmasse und vom Kraftfaktor (Wandlerkonstante Bl) ab, und die unterscheiden sich in der Regel von Lautsprecher zu Lautsprecher. Bei Eminence ist der L-B102 (10") mit 101 dB (1W @ 1m) spezifiziert, der KAPPA-18 (18") mit 97 dB (1W @ 1m). Ein Gegenbeispiel desselben Herstellers: Der L-102 (10") ist mit 97 dB spezifiziert, der L-151 (15") mit 100 dB.

Zum Unterschied zwischen 12"- und 10"-Lautsprechern gibt es nur eine sichere Aussage: Der 10"-Lautsprecher ist kleiner. Der 10-Zöller ist nicht generell weniger belastbar, er ist nicht generell leiser, er ist nicht generell leichter, und er bringt nicht generell mehr Höhen. Zur Belastbarkeit: Jensens P12-R (12") und P10-R (10") sind beide mit 25 W spezifiziert, der C10-Q (10") steht mit 35 W in der Liste, der C12-R (12") mit 25 W, der NEO-10 (10") mit 100 W. Zum Gewicht (bzw. Masse): L-122 (12") = 2.5 kg, L-B102 (10") = 5.5 kg. Zur Höhenwiedergabe: Hier wird's etwas schwieriger, weil einerseits die obere Grenzfrequenz der Leistungsabstrahlung tatsächlich vom Membrandurchmesser abhängt, andererseits hierfür eine ideal formstarre Membran Voraussetzung ist. Völlig falsch ist die immer wieder auftauchende Begründung, eine große Membran sei zu schwer, um mit hohen Frequenzen schwingen zu können. Ganz grundsätzlich: Vergrößert man die Membranmasse, sinkt der Wirkungsgrad im ganzen Bereich oberhalb der Resonanzfrequenz (z.B. 100 Hz), und nicht erst bei hohen Frequenzen [3]. Dass die große Membran in vielen Fällen nicht so brillant klingt wie die kleine, hat andere Ursachen: Sie bündelt hochfrequent stärker, und erzeugt dadurch weniger Diffusschall. Letztlich ist immer die Membran im wahrsten Sinn des Wortes ausschlaggebend: Ihre Form und Dicke, ihre Verrippungen, ihre Dämpfung und ihre Kalotte entscheiden über die Übertragungseigenschaften. Eminence spezifiziert 3.5 kHz als obere Grenzfrequenz für den DELTA-10, für den größeren GAMMA-15 hingegen 4.5 kHz. Diesen Angaben liegen jedoch Axialmessungen zugrunde – die Leistungsbandbreite ist vermutlich beim DELTA-10 größer (das Datenblatt macht hierzu keine Angaben).

In **Abb. 11.35** sind die im RAR gemessenen Frequenzgänge eines 10"- und eines 12"-Lautsprechers dargestellt. Beide waren zur Messung in ein dichtes 39x39x25-Gehäuse eingebaut. Der P10-R erzeugt im Mittel einen kleineren Pegel, aber relativ mehr Höhen als der P12-R.

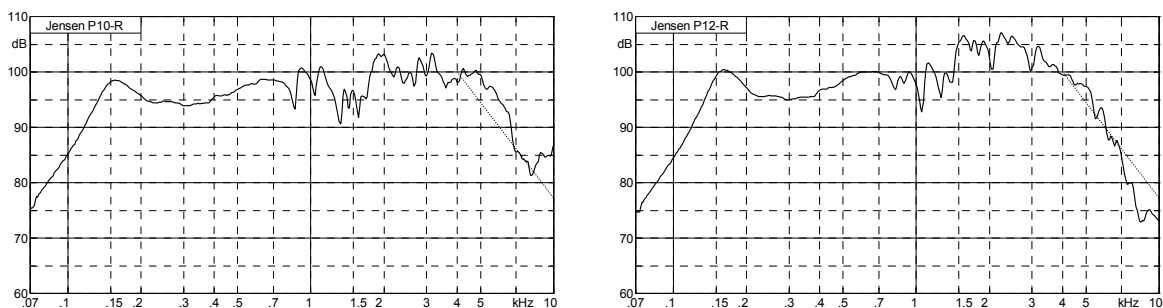


Abb. 11.35: Vergleich zwischen einem 10"-Lautsprecher (P10-R, links) und einem 12"-Lautsprecher (P12-R).

Abb. 11.36 vergleicht **15"-Lautsprecher** (alle im 106-l-Gehäuse, RAR, 1W/1m). Das Gehäuse wurde für diese Messung nicht bedämpft, die hierdurch verursachten Hohlraumresonanzen sind bei 230 Hz und 500 Hz klar zu erkennen. Ein 106-l-Gehäuse ist für einen 15"-Lautsprecher relativ klein, bei Gitarrenanlagen ist aber vieles möglich: So stellt der Vibroverb seinem 15-Zöller gerade mal 88 l brutto im offenen Gehäuse zur Verfügung, der Showman jedoch 163 l im Bassreflexgehäuse. Der Fokus soll aber hier nicht auf dem Bassbereich liegen, sondern sich auf den Bereich ab ca. 300 Hz richten: G15-100 und Fane zeigen (abgesehen von der Gehäuseresonanz) einen ausgeglichenen Pegel-Verlauf, unterscheiden sich aber um mehr als 6 dB. Zur Erinnerung: Um den Pegel um 6 dB zu erhöhen, muss die Leistung vervierfacht werden! Der Powercell hingegen ist nicht auf einen ausgeglichenen Frequenzgang ausgelegt, sondern zeigt die typische S-Kurve eines Instrumentallautsprechers. Die Messungen belegen, dass ein 15"-Lautsprecher im Vergleich zu einem kleineren Lautsprecher nicht generell einen höheren Schallpegel erzeugt, und sie dokumentieren, dass (auf Achse gemessen) die obere Grenzfrequenz ohne weiteres bei 5 kHz liegen kann – wie beim 12"-Lautsprecher. Die Unterschiede im Bündelungsverhalten werden in Kap. 11.4 untersucht.

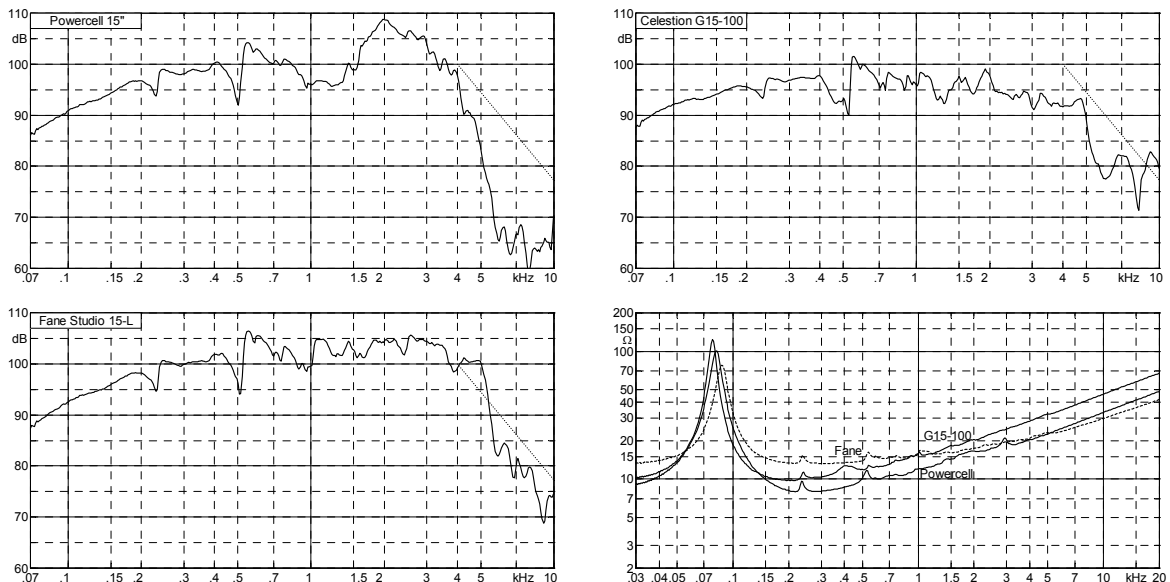


Abb. 11.36: Schallpegel- und Impedanzfrequenzgänge, 15"-Lautsprecher im abgedichteten 106-l-Gehäuse, RAR, 1W @ 1m. Alle drei Lautsprecher sind von den Herstellern als 8-Ω-Typen spezifiziert. Maximalleistung (Herstellerangaben): Celestion Powercell = 250 W, G15-100 = 100 W, Fane = 200 W.

Werden statt einem **zwei Lautsprecher** in ein Gehäuse eingebaut, verdoppelt sich theoretisch der axiale Schalldruck. Gegenüber der nun doppelten Leistungsaufnahme ist dies ein Gewinn von 3dB (**Abb. 11.37**). Der Wirkungsgrad steigt, allerdings nicht einfach proportional zur Anzahl der Lautsprecher, sondern in Abhängigkeit von der individuellen Geometrie.

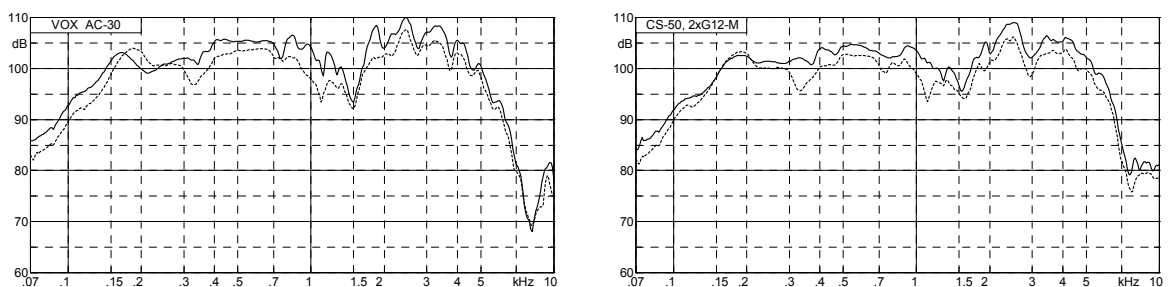


Abb. 11.37: Vergleich 1x12" (---) vs. 2x12" (—); Ordinatenwerte auf gleiche Leistungsaufnahme normiert.