

10.8 Effekte

10.8.1 Nachhall (Reverb)

In jedem (Innen-) Raum* reflektieren Boden, Decke und Wände Schall. Ist der zeitliche Abstand dieser einzelnen Reflexionen größer als ca. 50 ms, werden Einzelechos wahrgenommen, wohingegen in kurzem Abstand aufeinanderfolgende Reflexionen einen halligen Eindruck erzeugen. Da die Schallausbreitung im Raum (d.h. in Luft) in sehr guter Näherung ein linearer Prozess ist (LZI-System), kann das System "Raum" sowohl durch seine Impulsantwort (**Abb. 10.8.1**), als auch durch seine Übertragungsfunktion beschrieben werden.

Um die **Raum-Impulsantwort** darzustellen, regt man den Raum mit einem Schallimpuls an: Dies kann ein elektrisch erzeugter Funke sein (Zündkerze), oder ein zerplatzender Luftballon, oder Händeklatschen, oder Ähnliches. In der Realität ist das Anregungssignal also nicht der in der Systemtheorie verwendete Dirac-Impuls, sondern ein realer Schallimpuls, der eine Dauer größer null und eine Amplitude kleiner unendlich hat. Mit einem Mikrofon wird am Messpunkt der Schalldruck aufgenommen, und als Betrag über der Zeit dargestellt (**Abb. 10.8.1**). Da jeder Raum beliebig viele Anregungs- und Messpunkte hat, gibt es entsprechend viele Impulsantworten. Mit fortschreitender Zeit werden die Reflexionen immer schwächer, und folgen immer dichter aufeinander. Aus den ersten Reflexionen (frühen Reflexionen) kann das Gehör Informationen über die Raumgröße gewinnen, die Absorptionsfähigkeit des Raumes wird aus der Geschwindigkeit ermittelt, mit der die Reflexionen abnehmen. Langsames Abklingen ergibt einen *halligen* Eindruck, das Gegenteil hierzu wird *trocken* genannt.

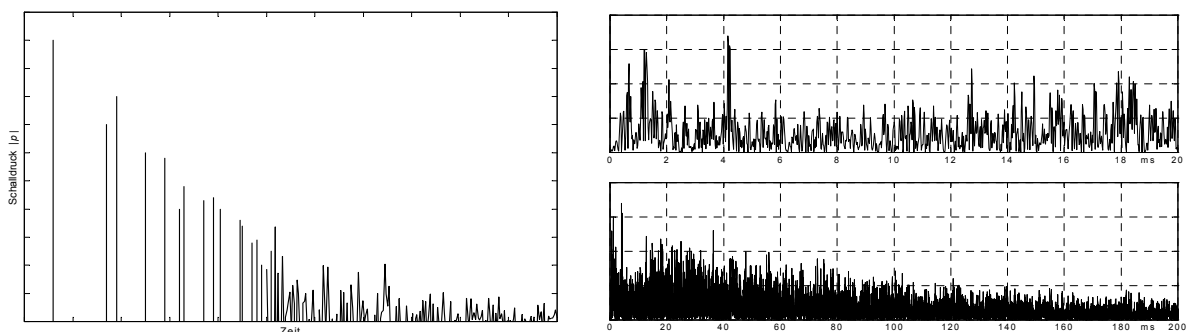


Abb. 10.8.1: Raum-Impulsantwort (Reflektogramm). Links: Modell, rechts: realer Raum.

Zur Nachbildung des realen Raumhalls verwendet man Hallfedern, Hallplatten, Magnetbandgeräte oder elektronische Laufzeitglieder (Delays). Im Gitarrenverstärker etablierte sich mit Beginn der Sechzigerjahre die Hallfeder als Standard. Zunächst nur als Zusatzgerät erhältlich, wird sie ab 1963 erstmalig serienmäßig in Fenders Vibroverb-Verstärker eingebaut. Als Verzögerungsleitung dienen hierbei zwei zu Schraubenfedern aufgewickelte Stahldrähte, in denen mechanische Wellen hin- und herlaufen. Die Grundlagen zu diesem Verzögerungsprinzip waren von den Bell Labs erforscht worden, das serienreife Produkt hatten Mitarbeiter der Hammond Organ Company entwickelt. Was gemeinhin als **Hallspirale** bezeichnet wird, ist in Wirklichkeit also keine Spirale, sondern eine Schraubenlinie (Helix). Im Falle der heute von Accutronics gefertigten "Reverb Can" sind ca. 0,4 mm dicke Stahldrähte zu Schraubenfedern aufgewickelt (4,2 mm Außendurchmesser). Auf der Aktorseite erregt ein Elektromagnet Kräfte in einem kleinen Dauermagnet, die den Stahldraht verformen; ähnlich arbeitet die Sensorseite: Bewegung eines Dauermagneten induziert Spannungen in der Sensorspule.

* Im Folgenden wird mit "Raum" immer der reflektierend begrenzte Raum (Zimmer, Saal) verstanden.

Bei den anfänglich verwendeten Hallsystemen waren zwei unterteilte Federn montiert, neuere Systeme haben auch drei Federn (**Abb. 10.8.2**). Die Verbindungsstelle, die nicht exakt in der Mitte liegt, sorgt für zusätzliche Reflexionen. Fließt Strom durch die Aktorspule, erzeugt der Dauermagnet eine Verdrillung (Torsion) des Federdrahtes, die in eine Biegewelle umgeformt wird. Diese läuft mit ca. 200 m/s den Stahldraht entlang und erreicht das jenseitige Ende nach ca. 30 – 40 ms. Da die beiden Federn leicht unterschiedliche Abmessungen haben, sind die Laufzeiten verschieden (laut Hersteller 34 ms und 41 ms).

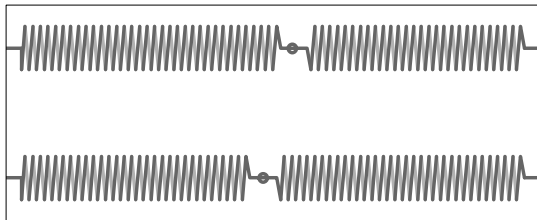


Abb. 10.8.2: Hallsystem mit zwei unterteilten Hallfedern (Accutronics). Alternativ sind auch Systeme mit drei unterteilten Hallfedern in Gebrauch. Die Verformungswellen laufen die Federn entlang und werden an beiden Enden reflektiert. Auch an der Verbindungsstelle findet eine Reflexion statt, die aber schwächer ausgeprägt ist.

Im Vergleich zum realen Raumhall zeigt der Federhall ein stark abweichendes Verhalten: Die Schallausbreitung im Raum ist dreidimensional und nicht-dispersiv, in der Feder eindimensional und dispersiv. Hätte man nur eine einzige (nicht unterteilte) Feder, es entstünde nur eine Echofolge (z.B. nach 30, 90, 150, 210 ... ms). Die Echos wären äquidistant, ihr Abstand entspräche einem Hin- und Rücklauf in der Feder. Demgegenüber nimmt beim Raumhall die mittlere zeitliche Reflexionsdichte mit t^2 zu. Jede der beiden Hallfedern besteht aber aus zwei Teilen, die an einem Ring zusammenhängen. Fasst man die Feder als mechanische Leitung auf (vergl. Kap. 2), so wirkt der Ring als Massenbelastung, der insbesondere höherfrequente Wellen teilweise reflektiert. Somit sind zwei Echosysteme in Kette geschaltet, und die Reflexionsdichte bekommt hochfrequent einen t -proportionalen Anteil. Die parallel angeordnete zweite (unterteilte) Feder verdoppelt hingegen lediglich die Reflexionsdichte, ohne aber den Exponent der Zeitabhängigkeit zu verändern.

In **Abb. 10.8.3** sind Spektrogramme der Impulsantwort dargestellt: Im linken Bild für ein Zweifedersystem; im rechten Bild für dasselbe System, dessen eine Feder aber festgeklemmt war, sodass keine Schwingung entstehen konnte. Man sieht deutlich, dass nicht von einer Verzögerungszeit pro Feder gesprochen werden kann. Stattdessen ergibt sich aufgrund der dispersiven Ausbreitung eine frequenzabhängige Gruppenlaufzeit: Hochfrequente Anteile brauchen ca. 50% länger als tieffrequente.

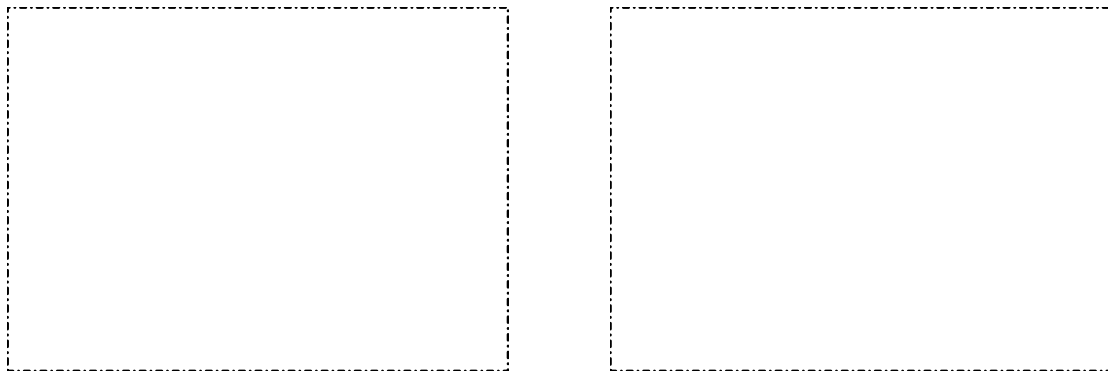


Abb. 10.8.3: DFT-Spektrogramme der Impulsantwort; 2 parallele Hallfedern (links), 1 Hallfeder (rechts).
Diese Abbildungen bleiben der Druckversion vorbehalten

Der nutzbare Übertragungsbereich des Federhalls beträgt ca. 5 kHz, für Gitarrenverstärker voll ausreichend. In **Abb. 10.8.4** ist eine Terzanalyse dargestellt, wie sie bei Anregung mit Rosa Rauschen ermittelt wird [3]. Die unterschiedlichen Verläufe im Hochtonbereich sind auf unterschiedliche kapazitive Belastung der Sensorspule zurückzuführen: Die induktive Quellimpedanz bildet zusammen mit der Lastkapazität einen Tiefpass zweiter Ordnung, der bei geeigneter Dimensionierung für eine leichte Resonanzüberhöhung bei 4,5 kHz sorgt (---). Die Messung mit Gleitsinus (Sweep) ermöglicht einen genaueren Blick auf die Feinstruktur, wobei aber die extrem langen Ein- und Ausschwingzeiten zu berücksichtigen sind. Selbst bei einer Sweepdauer von 2 Minuten kann noch nicht vom "eingeschwungenen Zustand" gesprochen werden, die genaue Lage der Maxima und insbesondere der Minima ist von den Messparametern (Punkteaflösung, Sweepdauer) abhängig.

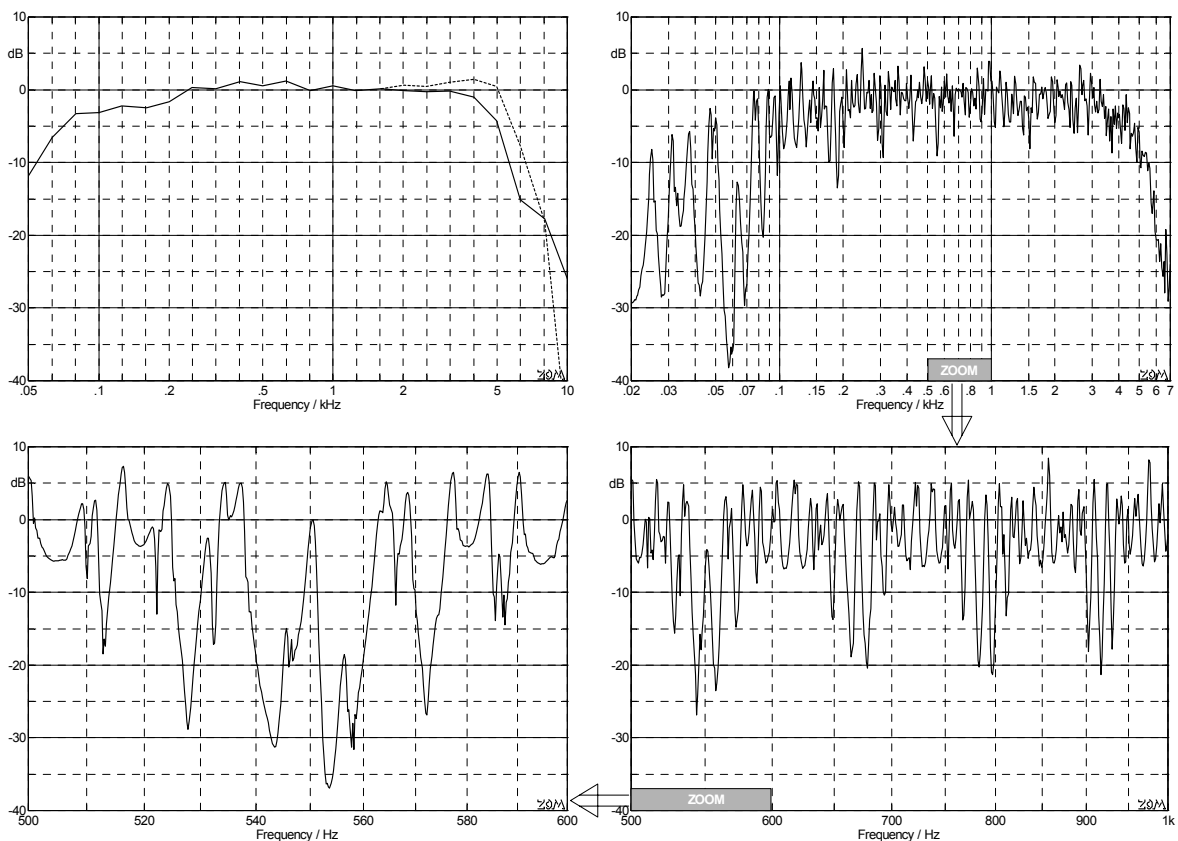


Abb. 10.8.4: Accutronics-Hallfeder 4AB3C1B, Stromeinprägung. Terz-Analyse (links oben), Sweep-Analysen.

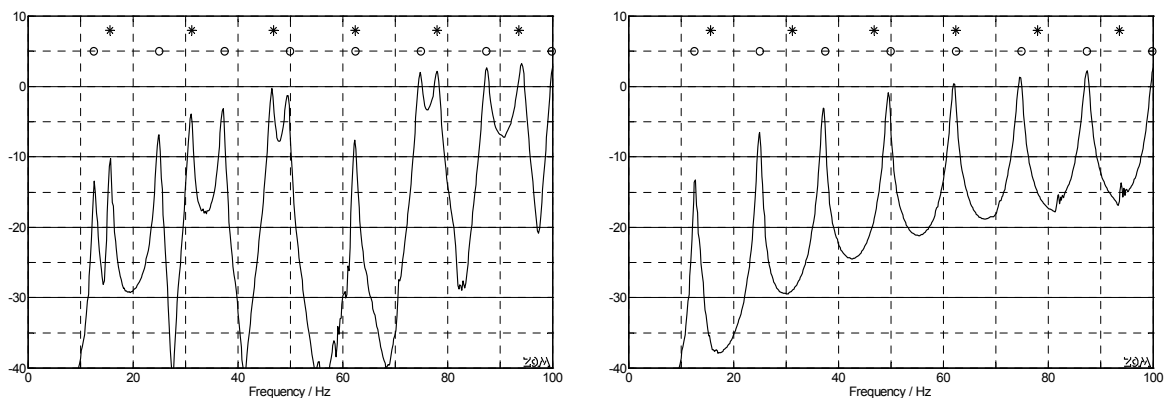


Abb. 10.8.5: 4AB3C1B, Sweep-Analysen; 2 Federn parallel (links), eine dieser Federn abgedämpft (rechts).

In **Abb. 10.8.5** sind die Eigenfrequenzen niedriger Ordnung vergrößert dargestellt. Die beiden parallel liegenden Federn haben ihre tiefste Eigenfrequenz bei 12,5 bzw. 15,6 Hz, die höheren Eigenfrequenzen sind ganzzahlig vielfach hierzu (im Bild Kreise bzw. Sterne). Bei 62,5 Hz interagieren die 5. bzw. 4. Eigenfrequenz, es entsteht eine Schwebung mit sehr langer Periode. Dass die Minima durch destruktive Interferenz gebildet werden, erkennt man im rechten Teilbild: Wenn nur eine Feder schwingt, ist die Kammstruktur wesentlich regelmäßiger. Diese Regelmäßigkeit bestätigt auch die aus der Leitungstheorie gefundene Hypothese, dass der in Saitenmitte sitzende Ring nur hochfrequent als Streukörper wirkt.

Das Abklingen des Nachhalls wird zumeist über die **Nachhallzeit** T_{60} ausgedrückt: Das ist die Zeit, in der der (Terz-) Pegel nach Abschalten des Anregungssignals um 60 dB abnimmt. Im Bereich hoher Frequenzen liegt ein lehrbuchmäßiges Abklingverhalten vor (**Abb. 10.8.6**), der Pegel nimmt linear über der Zeit ab, die hieraus ermittelte Nachhallzeit beträgt 2,5 s. Bei tieferen Frequenzen sind zwei überlagerte Abklingprozesse zu erkennen: Ein früher schneller Abfall, und daran anschließend ein langsamer Abfall. In solchen Fällen wird die für das Gehör wichtige **Early Decay Time** T_{10} spezifiziert, d.h. das sechsfache der Zeit, in der der Pegel von -5dB auf -15dB abgefallen ist; Bezugswert ist der gemittelte Pegel im stationären Anregungssignal. Im Bild ist zu erkennen, dass diese EDT (T_{10}) für das gewählte Terzband ebenfalls 2,5 s beträgt, dem daran abschließenden langsamen Pegelabfall kann man eine Nachhallzeit von ca. 12 s zuordnen. Besondere Bedeutung hat der unter ca. 300 Hz liegende Frequenzbereich im Gitarrenverstärker aber nicht: In aller Regel sorgen Hochpässe für eine wirkungsvolle Tiefendämpfung, um störendes Dröhnen zu eliminieren.

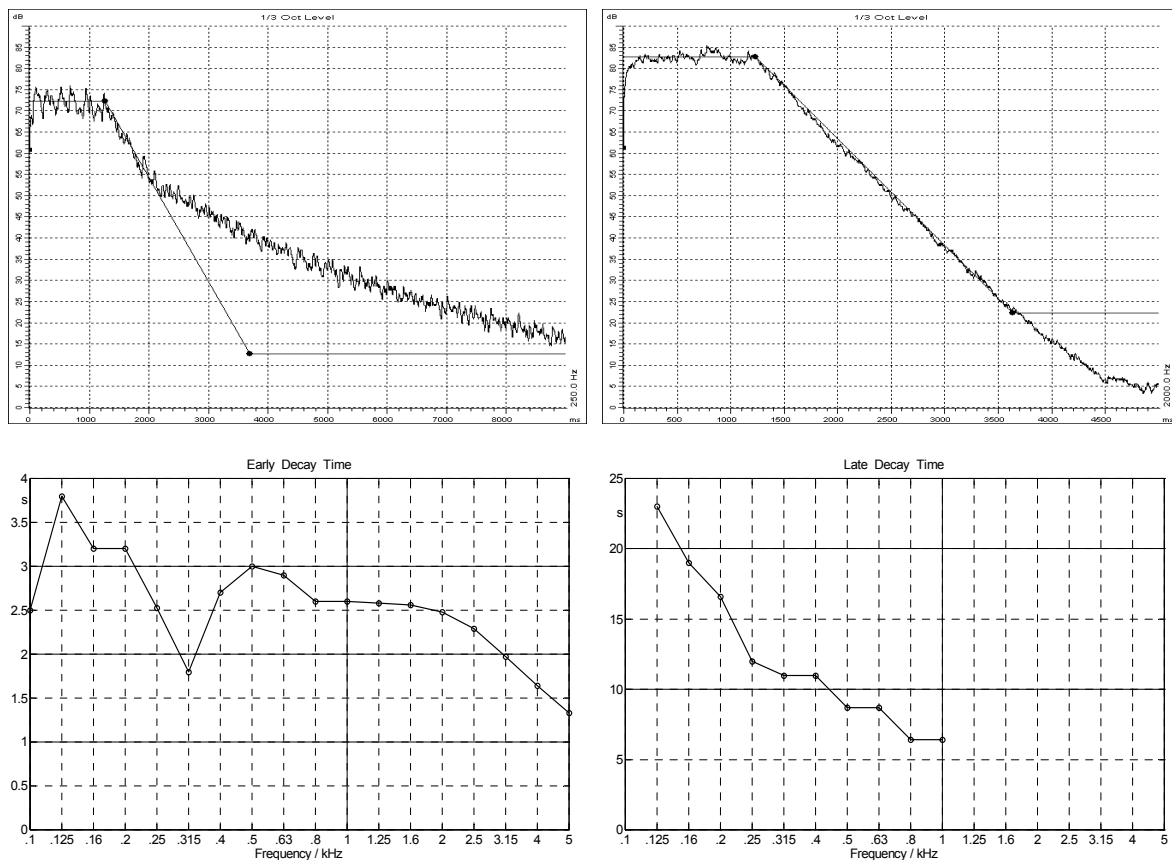


Abb. 10.8.6: Terzbreite Abkling-Analyse, Accutronics Federhall 4AB3C1B. 250 Hz (links), 2000 Hz (rechts). In der unteren Bildzeile sind die Frequenzabhängigkeiten der Nachhallzeiten dargestellt.

Der **Knick** in der Nachhallkurve ist vermutlich auf die in Federmitte sitzende Streumasse zurückzuführen. Die hieran reflektierten Wellen erreichen (im Gegensatz zu den darüber hinweggehenden Wellen) doppelt so oft das (teilweise) absorbierend gelagerte Federende, und somit gibt es zwei verschiedene Arten stehender Wellen. Ausführliche Untersuchungen zu dieser Hypothese wurden nicht durchgeführt, durch vollständiges Bedämpfen einer Feder konnte aber nachgewiesen werden, dass der Knick sicher nicht auf die unterschiedliche Absorption der beiden Federn zurückzuführen ist, denn auch *eine* (unterteilte) Feder zeigt beim Ausschwingen das in Abb. 10.8.6 dargestellte Knick-Verhalten.

Um eine einigermaßen frequenzunabhängige Übertragung zu erreichen, ist bei dem untersuchten Accutronics-Hallsystem (4AB3C1B) **Stromeinprägung** zweckmäßig (Abb. 10.8.4). Da die Eingangsimpedanz der Aktorspule im Wesentlichen induktiv ist, würde bei Spannungseinprägung ein starker Höhenabfall eintreten. Eine hochohmige Quellimpedanz wird von Röhren in Katoden-Basis-Schaltung automatisch zur Verfügung gestellt, das o.a. Accutronics-System ist mit ca. $8\ \Omega$ bei 1 kHz aber so niederohmig, dass eine extreme Fehlanpassung entsteht. Optimale Stromeinprägung entsteht bei einer Quellimpedanz von ca. $100\ \Omega$, dies ist an einer Röhrenanode nur mittels Übertrager erreichbar. Da die Impedanz mit dem Quadrat des Übersetzungsverhältnisses \ddot{u} transformiert wird, ergibt ein 25:1-Übertrager bei einem Röhren-Innenwiderstand von $62,5\ \text{k}\Omega$ gerade eine sekundäre Quellimpedanz von $100\ \Omega$. In Fenders Standalone-Reverb-Unit **6G-15** treibt eine 6K6-GT den Hall-Transformator; diese Kleinleistungs-Pentode hat $90\ \text{k}\Omega$ Innenwiderstand* (die 6V6-GT hat $50\ \text{k}\Omega$). Im Gitarrenverstärker eingebaut kommt zur Hallansteuerung aber fast immer eine **12AT7** zum Einsatz, und deren Innenwiderstand beträgt nur ca. $40\ \text{k}\Omega$ pro Triode*. Und weil beide Trioden parallelgeschaltet (!) sind, ergeben sich nur noch ca. $20\ \text{k}\Omega$. Weil außerdem der Halltransformator 125A20B mit $\ddot{u} = 50$ übersetzt, wird das Hallsystem ab 1 kHz mit Spannungseinprägung betrieben – mit entsprechendem Höhenverlust.

Wäre das Hallsystem linear im Sinne der Systemtheorie, man könnte an jeder Stelle der Verstärkerkette ein Korrekturfilter einfügen und die fehlenden Höhen anheben. Sowohl die Hallfeder als auch die Röhren sind aber **nichtlinear**, sie verzerren bei hoher Aussteuerung, und sie erzeugen Rausch- und Rumpelstörungen im Bereich kleiner Signale. Filterentwurf bedeutet deshalb auch immer Dynamikoptimierung. Im typischen Fender-Verstärker werden vor und nach der Hallfeder vor allem die Tiefen abgesenkt – die durch Stromeinprägung mögliche Höhenanhebung wird nur ansatzweise genutzt.

In **Abb. 10.8.7** ist der Übertragungsfrequenzgang von der Anode der ersten ECC 83 bis zur Anode der ECC 81 dargestellt. Zwei Teilsysteme bewirken die Filterung: der RC-Hochpass vor der ECC 81 ($f_g = 320\ \text{Hz}$), und die induktive Eingangsimpedanz des Halltrafos. Weil die beiden ECC 81 ziemlich niederohmig sind, wird Stromeinprägung nur bis ca. 1 kHz erreicht – im darüber liegenden Frequenzbereich ist die Spannung eingepreßt. Das Spannungsübertragungsmaß des Federhallsystems ist in **Abb. 10.8.9** dargestellt, im Gegensatz zur Stromeinprägung (Abb. 10.8.4) zeigt sich ein deutlicher Höhenverlust. Die Ankopplung des Reverb-Potis geschieht über einen 3-nF-Kondensator, was eine weitere Hochpassfilterung (350 Hz) ergibt. Der gesamte Hallzweig hat Bandpasscharakter, mit einem spektralen Schwerpunkt um 600 Hz, während das Direktsignal lediglich eine leichte Höhenanhebung erfährt. Die in **Abb. 10.8.8** dargestellte Schaltung ist für viele **Fender-Verstärker** typisch, in einigen Varianten liegt zum Hallausgang ein 2-nF-Kondensator parallel, um eine leichte Resonanzüberhöhung zu erreichen (Abb. 10.8.4).

* Datenblattangaben. *Die 12AT7 (= ECC81) wird bei einem untypischen Arbeitspunkt betrieben!

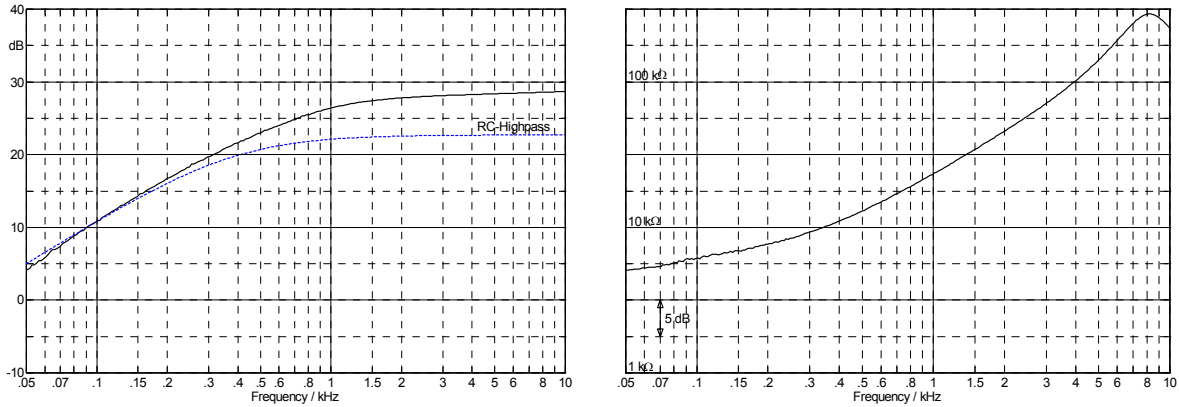


Abb. 10.8.7: Übertragungsmaß von der ECC83 bis zur ECC81 (links); Trafo-Eingangsimpedanz (rechts).

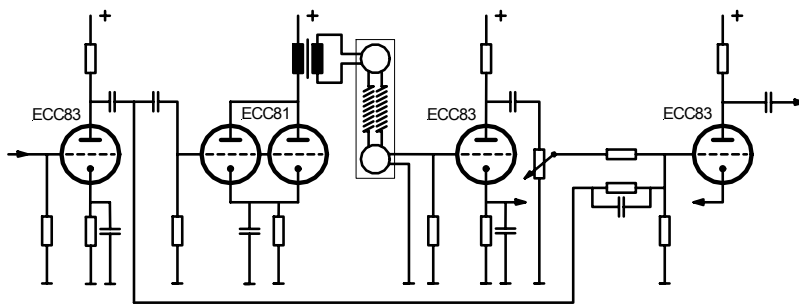


Abb. 10.8.8: Schaltung eines typischen Fender-Halls. Das Federhallsystem ist eingangsseitig niederohmig, der Halltrafo übersetzt mit 50:1.

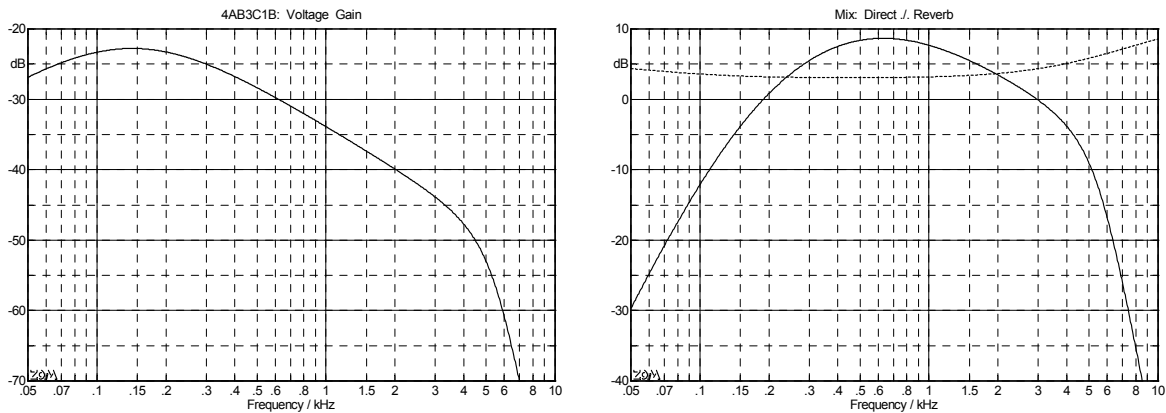


Abb. 10.8.9: Geglättetes Spannungsübertragungsmaß des Federhallsystems (links). Übertragungsmaß des gesamten Hallzweiges (rechts —), und des Direktsignals (rechts ----). Die beiden im rechten Bild dargestellten Kurven geben die Übertragung von der Anode der ersten ECC83 bis zur Anode der letzten ECC83 an (Abb. 10.8.8).

Die Accutronics-Federhallsysteme werden 7stellig codiert, z.B. 4AB3C1B. Die einzelnen Stellen bedeuten:

1. Stelle: Typ. Erhältlich sind z.Zt. Typ1, Typ 4, Typ 8, Typ 9.

Accutronics Hallfeder Typ 1 und Typ 4		Accutronics Hallfeder Typ 8 und Typ 9	
2. Stelle = Z_{in}	3. Stelle = Z_{out}	2.Stelle = Z_{in}	3.Stelle = Z_{out}
A = 8 Ω	D = 250 Ω	A = 10 Ω	D = 310 Ω
B = 150 Ω	E = 600 Ω	B = 190 Ω	E = 800 Ω
C = 200 Ω	F = 1475 Ω	C = 240 Ω	F = 1925 Ω
	C = 10 k Ω		C = 12 k Ω

4. Stelle = Nachhallzeit: 1 = kurz, 2 = mittel, 3 = lang.

5. Stelle = Gehäuse verbunden mit: A = Input + Output; B = Input; C = Output; D = Gehäuse isoliert.

6. Stelle = Arretierung: 1 = Keine Arretierung.

7. Stelle = Einbaulage: A = ; B = ; C = ; D = ; E = ; F = .



1



2



3



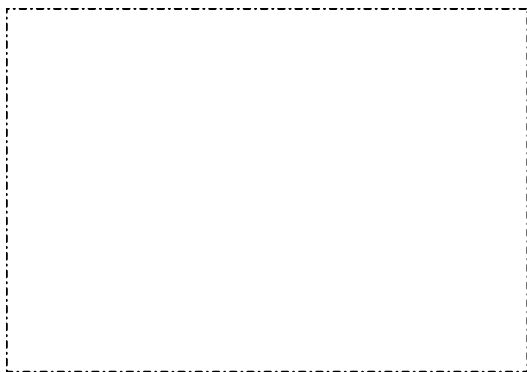
4



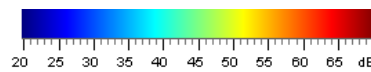
5



6



7



Diese Abbildungen bleiben der Druckversion vorbehalten

- 1: Accutronics (4AB3C1B), 2 Federn, unterteilt.
- 2: Accutronics (9AB2C1B), 3 Federn, unterteilt.
- 3: Billighall, 2 Federn (17 cm), nicht unterteilt.
- 4: Billighall, 2 Federn (14 cm), nicht unterteilt.
- 5: Digitalhall, "Spring-Reverb".
- 6: Digitalhall, "Spring-Reverb".
- 7: Digitalhall, "Room-Reverb".

Abb. 10.8.10: Verschiedene Hallspektren.

In **Abb. 10.8.10** sind die Hallspektren verschiedener Hallsysteme gegenübergestellt. Die beiden Accutronics-Systeme repräsentieren den **Federhall**-Standard: Ca. 36 cm lange, ungefähr in der Mitte unterteilte Federn, deutlich sichtbare Einzelreflexionen, deutliche Dispersion. Die Systeme 3 und 4 sind nur halb so groß wie die Accutronics-Gehäuse, ihre Federn sind nicht unterteilt. Die Dispersion ist viel stärker ausgeprägt als bei 1 bzw. 2, die Bandbreite ist geringer, die Reflexionsdichte auch – der Preis natürlich ebenso. Die Bilder 5 – 7 zeigen die Spektren **digitaler Hallsysteme**. System 5 wird als "Spring-Reverb" vermarktet, hat mit einem Federhall aber kaum Ähnlichkeit. Beim System 6 kann man zumindest vermuten, dass der Entwickler die federtypische Dispersion nachbilden wollte, besonders authentisch ist's nicht gelungen. System 7 wird als "Room-Reverb" angeboten, und unterscheidet sich von den vorhergehenden Systemen immerhin insoweit, als die strenge Periodizität durchbrochen wurde. Die Bandbegrenzung auf 2.5 kHz ist vermutlich durch die Rechenleistung bedingt: Je größer die Bandbreite, desto höher die Anforderungen an den Signalprozessor. Das Hallspektrum eines realen Raumes (**Abb. 10.8.11**) weist im Vergleich zu den Nachbildungen eine viel größere Reflexionsdichte, und keine erkennbare Periodizität auf. Das Spektrogramm kann hierüber nur sehr begrenzt Auskunft geben, weil die zugrundeliegende DFT nicht gleichzeitig im Zeit- und Frequenzbereich hohe Selektivität zur Verfügung stellen kann. Die abgebildeten Spektren, die alle mit denselben DFT-Parametern ermittelt wurden, ermöglichen aber zumindest einen grundsätzlichen Einblick in die einzelnen Hallstrukturen.

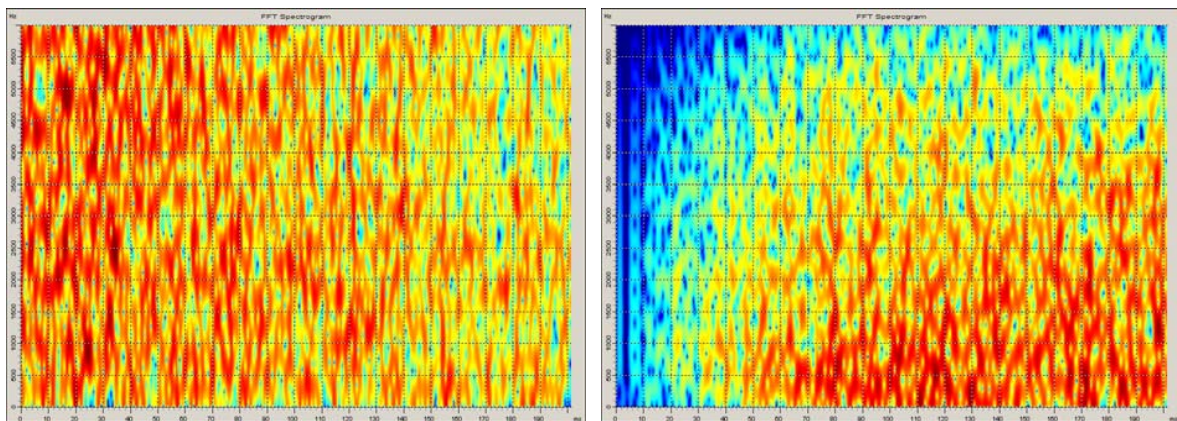


Abb. 10.8.11: Breitbandiges Hallspektrum eines realen Raumes (links). Digitalhall eines Studio-Hallgerätes, Programm "Großer Raum", mit Verzögerung ("Predelay") und leichter Höhenabsenkung (rechts).

Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass mit all den hier dargestellten Hallsystemen ein durchaus brauchbarer Gitarren-Hall erzeugt werden kann. Mögen auch die mit einem kurzen Impuls erzeugten Impulsantworten z.T. etwas eigenartig klingen – in einem Gitarrenverstärker tritt eine derart künstliche Anregung ja nicht auf. Nur wenn man den realen Raum als Maßstab nimmt, klingt das wabernde Geplätscher eines Federhalls im ersten Moment sehr ungewohnt. Entsprechend fremd klingt aber auch der "Room-Reverb", wenn man noch Fenders Spring-Reverb im Ohr hat. Nicht umsonst bieten professionelle Hallgeräte Zugriff auf eine Vielzahl spezieller Hallparameter, um den Klangeindruck nach den individuellen Wünschen zu gestalten. Zumeist sollen damit aber reale Räume (Zimmer, Saal, Kirche, Halle) nachgebildet werden, die authentische digitale Nachbildung eines Federhalls findet man nur selten. Vermutlich ein Grund, warum auch heute noch "echte" Federhallsysteme verkauft werden.