

Federhall-Systeme: Theorie und Messdaten

Manfred Zollner

Vor gut 50 Jahren kamen die ersten Gitarren-Verstärker mit Federhall-Systemen auf den Markt. Und obwohl inzwischen die Digitaltechnik den Effektgerätemarkt weitgehend erobert hat, sind Hallfedern noch immer in Gebrauch. Die folgende Abhandlung erläutert, was den charakteristischen Federhall-Sound ausmacht, und wie er ggf. elektronisch erzeugt werden kann.

Das Federhall-System ist das Ergebnis zweier Entwicklungen: Des Telefon-Leitungsnetzes (Bell Labs) und der Heimorgeln (Hammond). Die Telefongesellschaften erkannten sehr bald, dass bei der Sprachübertragung über große Distanzen Amplituden- und vor allem Laufzeitverzerrungen und Echos auftraten, wodurch Sprachqualität und -verständlichkeit verschlechtert wurden. Um bei ihren Versuchen nicht immer kilometerlange Kabel parat haben zu müssen, suchten und fanden die Entwickler einen Ersatz: Statt einer elektrischen Leitung wurde eine mechanische, d.h. ein zur Helix aufgewickelter Draht verwendet. In dem 1928 von den **Bell-Labs** angemeldeten US-Patent 1,852,795 beschreibt der Erfinder R. L. Wegel die Schraubenfeder (helical spring) als Wellenleiter (transmission line) mit dispersiver Ausbreitungscharakteristik.

Ein paar Jahre später beginnt **Laurens Hammond** mit Arbeiten an einer elektromechanischen Orgel, die er 1934 zum Patent anmeldet. Als Generator verwendet er gewellte Stahlräder, die bei Rotation in einem Magnettonabnehmer eine elektrische Spannung erzeugen. Auf diesem Prinzip aufbauend entstand eine Alternative zur sehr großvolumigen Pfeifenorgel, und auf einmal konnte man auch zuhause, im kleinen Wohnraum, Orgel spielen. Nur hatte dieser kleine Raum gegenüber den großen Kirchen (und Tanzsälen) einen Nachteil: Der Klang war zu "trocken", es fehlte der Hall der großen Aufführungsräume. Und da vereinigten sich die beiden Ideen: Mit der von den Bell-Labs entwickelten mechanischen Leitung konnten Signalverzögerungen wie in großen Sälen erzeugt werden. Da mechanische Wellen in Stahldrähten viel langsamer laufen als elektrische Wellen in Elektrokabeln, waren nur relativ kleine Hallsysteme erforderlich, der künstliche Nachhall wurde portabel. Das inspirierte ein paar Jahrzehnte später einen gewissen **Leo Fender**, auch für Elektrogitarren den Halleffekt anzubieten. Zunächst (1961) als eigene Stand-Alone-Einheit (6G15), dann (ab 1963) in den Gitarrenverstärker "Vibroverb" eingebaut. Zu dieser Zeit war die "Reverb-Can" auf nur mehr 43 cm Länge geschrumpft und konnte problemlos in ein Combo-Gehäuse eingebaut werden. In ihrem Innern sorgen zwei parallel liegende Schraubenfedern (aka "Spiralfedern") für eine Signalverzögerung von ca. 30 ms. Und weil die mechanischen Wellen an beiden Federenden reflektiert werden, für eine Vielzahl von Echos, die sich überlagern und zu einem speziellen Hall verschmelzen. Weil aber die Ausbreitungsgeschwindigkeit der mechanischen Wellen von der Frequenz abhängt, entsteht ein sehr spezieller Klangeindruck, der mit den zur selben Zeit verfügbaren Band-Echogeräten nicht produziert werden konnte.

Bei einem Federhallsystem regt ein Aktor eine Schraubenfeder zu Schwingungen an, die sich als Verformungswellen entlang des Federdrahts ausbreiten und in einem Sensor am Federende eine elektrische Spannung erzeugen. Die Feder ist an beiden Seiten so eingespannt, dass nur eine kleine Dämpfung entsteht – der größte Teil der Wellenenergie wird reflektiert, was zu einer Vielzahl zeitversetzter Reflexionen führt, die als Hall wahrgenommen werden. Zur Erhöhung der Reflexionsdichte setzt man mehrere Federn ein, die parallel und/oder seriell angeordnet sind. **Abb. 1** zeigt den Aufbau eines typischen Federhallsystems. Jeder Wandler besteht aus einem U-förmigen Joch, in dem ein kleiner Zylindermagnet drehbar gelagert ist. Auf je einem Jochschenkel steckt eine Spule. Beim Aktor erzeugt ein durch die Spule fließender Strom ein Magnetfeld und als Folge davon Torsionskräfte (Lorentz-Kraft), die eine Verdrehung des Aktor-Magnets bewirken. Beim Sensor induziert eine Drehung des Sensor-Magnets eine Spannung in der Spule (Induktionsgesetz). In **Abb. 2** sind die Magnetflüsse und die zugehörigen Magnetdrehungen stark vereinfacht dargestellt (Streuflüsse vernachlässigt).

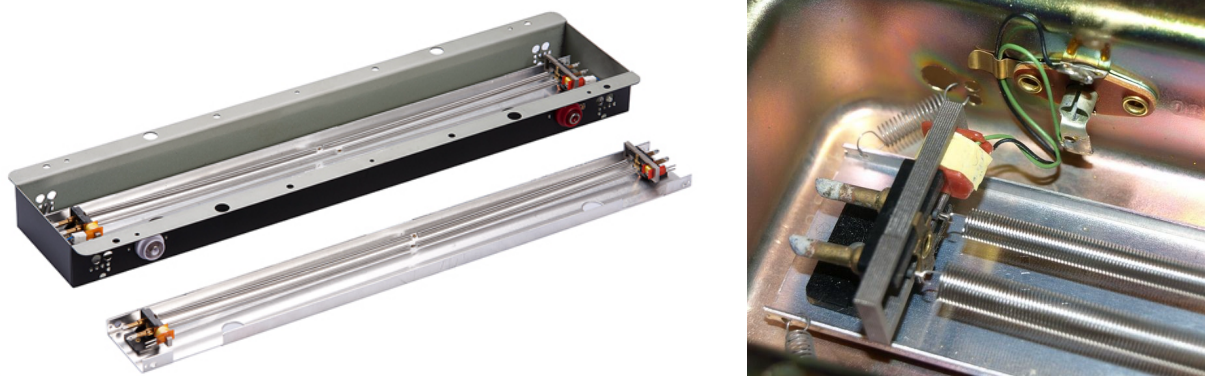


Abb. 1: Hallsystem mit zwei Federn [<http://www.accutronicsreverb.com>], [<http://fr.audiofancine.com>].

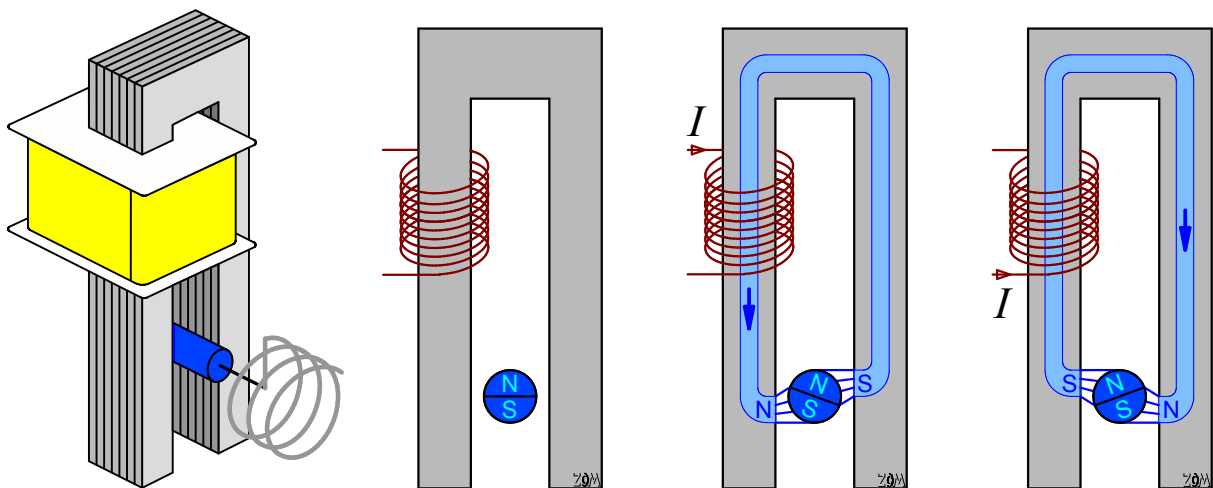


Abb. 2: Schematische Darstellung des Aktorsystems, Magnetflüsse stark vereinfacht. Stromfluss durch die Spule verdreht den Zylindermagnet und erzeugt eine mechanische Torsionsspannung.

Eine Schraubenfeder ist (je nach Typ) 10 – 30 cm lang, ihr Durchmesser beträgt 4 – 12 mm. Der zur Helix aufgewickelte Stahldraht (\varnothing ca. 0.4 mm) hat eine Länge von mehreren Metern, woraus eine Wellenlaufzeit von (typisch) 10 – 20 ms resultiert. Das Besondere: Diese Laufzeit hängt stark von der Frequenz ab, hochfrequente Signale laufen deutlich langsamer als tieffrequente (**Dispersion**). Oder anders ausgedrückt: der zeitliche Abstand hochfrequenter Reflexionen ist größer als der tieffrequenter Reflexionen.

Die elektrischen Parameter der beiden Wandler­spulen bergen keine großen Geheimnisse, sie lassen sich durch ein einfaches Modell beschreiben: Zum Kupferwiderstand der Wicklung kommt die Wicklungsinduktivität, Wirbelstromverluste sind gering, kapazitive Auswirkungen treten erst bei sehr hohen Frequenzen auf.

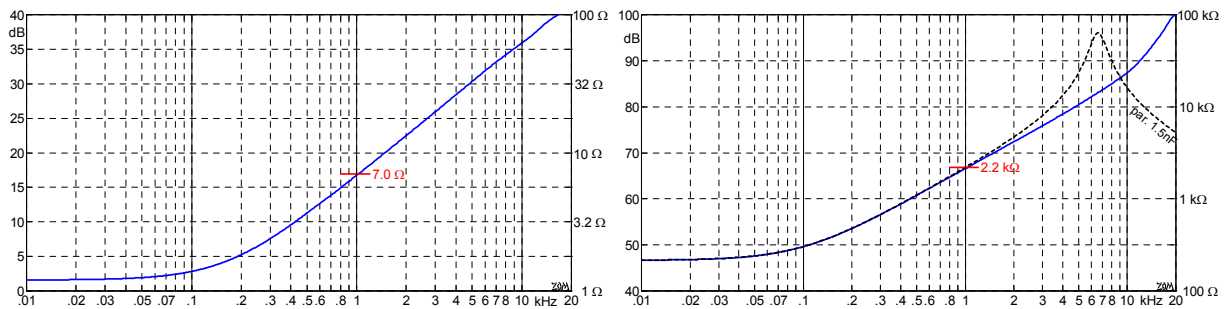


Abb. 3: Impedanzfrequenzgang; Eingangswandler (1.2 Ω , 1.1 mH, links), Ausgangswandler (215 Ω , 340 mH, rechts). Gestrichelte Kurve = Impedanz mit Parallel-C = 1.5 nF.

Abb. 3 zeigt die Impedanzfrequenzgänge der Spulen eines Accutronics-Systems (4AB3C1B). Die Aktorspule hat 0.8 Ω , zzgl. 0.4 Ω Kabel- und Steckerwiderstand. Sie wird im Datenblatt mit 8 Ω (1 kHz) spezifiziert, was die Messung in etwa bestätigt. Accutronics stellt verschiedene Hallssysteme her, mit Aktorimpedanzen von 8 Ω bis 1.9 k Ω , und Sensorimpedanzen von 500 Ω bis 12 k Ω . Die Sensor­spule des analysierten Systems hat einen Kupferwiderstand von 215 Ω , die 1-kHz-Impedanz beträgt 2.2 k Ω (das Datenblatt gibt hierfür 2250 Ω an). Eine häufig geübte Praxis ist, parallel zur Sensor­spule einen Kondensator (1 – 3 nF) zu schalten; die hierdurch entstehende Resonanz verbessert die Höhenwiedergabe.

In **Abb. 4** ist ein Übertragungsfrequenzgang dargestellt. Zur Messung wurde die Aktorspule mit eingepprägtem Wechselstrom (20 mA_{eff}) betrieben, der Ausgang war mit 100 k Ω // 1.5 nF belastet. Im Mittel ergibt sich ein Übertragungskoeffizient von 0.18 mV/mA. Accutronics gibt für dieses System einen nominellen Betriebsstrom von 28 mA_{eff} an. An anderer Stelle wird die Kernsättigung mit 2.5 Ampere-Windungen spezifiziert ("the core saturation level is approximately 2.5 Amper-Turns"). Wieder an anderer Stelle findet man "nominal 3.5 Amper-Turns", was ziemlich genau den 28 mA entspricht (für die Spule werden 124 Wdg. angegeben). Eine Flussdichtemessung im Luftspalt offenbart aber nur 4 mT bei 0.1 A, das passt nicht.

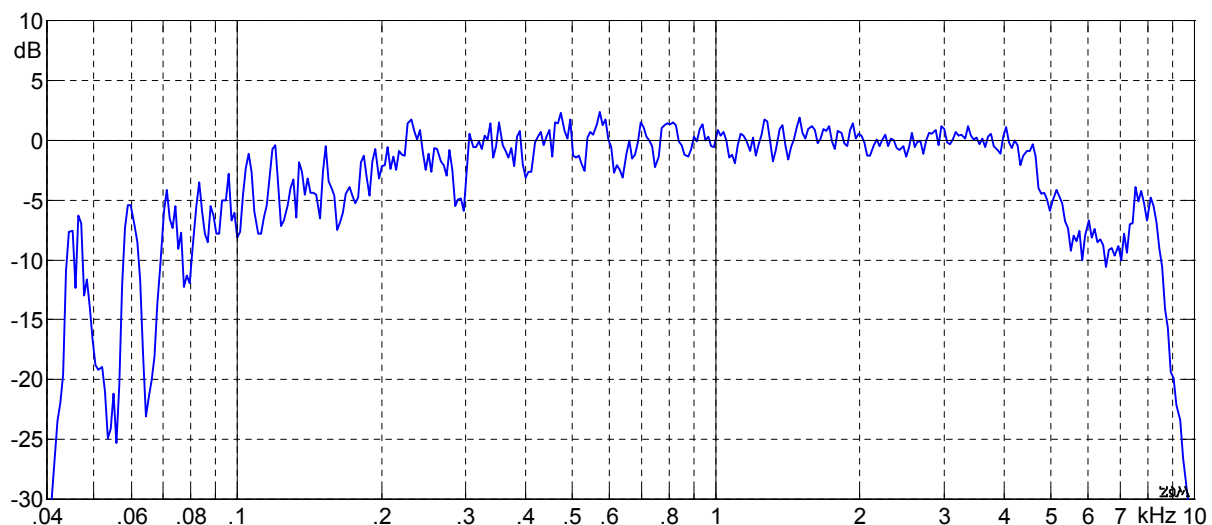


Abb. 4: Übertragungsfrequenzgang eines Accutronics-Federhallsystems (4AB3C1B). 0 dB entspricht einer Spannung von 3.6 mV, bei 20 mA Stromeinprägung (ausführliche Analyse in [1]).

Der Magnetkern der Aktorspule besteht aus ferromagnetischem Blech, das mit zunehmender Feldstärke immer mehr gesättigt wird. Auch wenn die Sättigungs-Flussdichte nicht bekannt ist: nur einige Milli-Tesla können es nicht sein, übliche Sättigungen liegen über 1 T. Mag sein, dass im Datenblatt die Luft-Feldstärke (4 kA/m) unbeschrieben der Kern-Feldstärke gleichgesetzt wurde (obwohl diese ja viel kleiner ist), oder dass der Begriff "core saturation" eine andersartige Bedeutung hat, der o.a. Grenzwert bleibt rätselhaft. Die Messung der Luftspalt-Flussdichte war für die vorhandene Hallsonde aus Platzgründen schwierig, die Berechnung kann ohne Kenntnis der Streuflüsse auch nur ungefähre Ergebnisse liefern, aber in etwa stimmen die Werte doch überein: 4 mT (Messung), 5.2 mT (Rechnung) jeweils für 100 mA. Der angegebene Grenzwert von 28 mA ist entweder falsch, oder hat andere Ursachen. **Abb. 5** zeigt kubische Spannungs-Verzerrungen, mit Stromeinprägung an der Aktorspule gemessen. Mit 28 mA ergibt sich ein kubischer Klirrfaktor von nur 1.6% – wäre hier die Sättigungsgrenze, müsste der Klirrfaktor wesentlich größer sein.

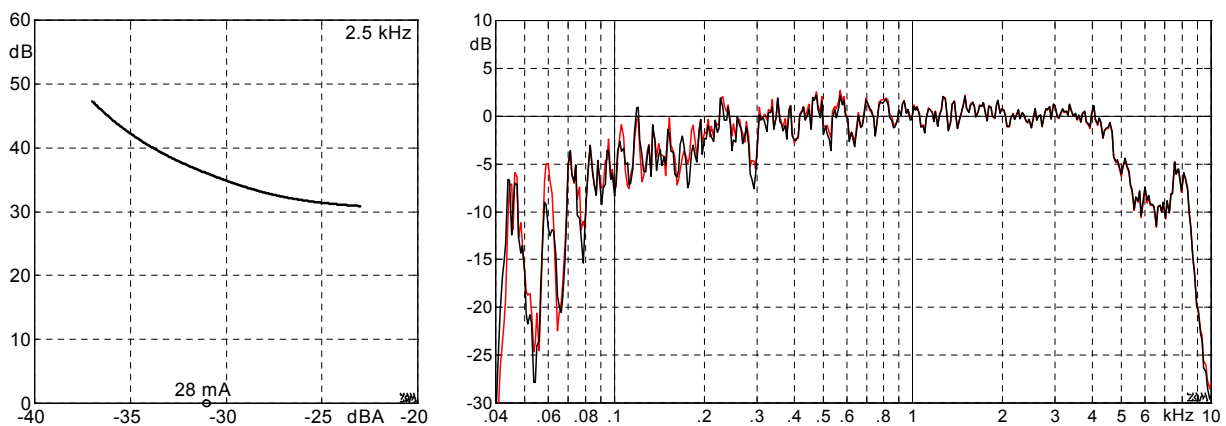


Abb. 5: Links: Kubische Klirrdämpfung der Aktorspannung bei Stromeinprägung (0 dBA = 1 A). Rechts: Übertragungsfrequenzgang, kleine Aussteuerung (rot, 17 mA), große Aussteuerung (schwarz, 136 mA). Die unterschiedlichen Sendepiegel wurden durch vertikale Verschiebung ausgeglichen. ! dBA \neq dB(A) !

Es gibt bei einem Federhallsystem mehrere **Nichtlinearitäten**: Da ist erstens die Induktivität der Aktorspule, die wegen ihrer feldstärkeabhängigen Permeabilität aussteuerungsabhängig ist – und damit ist auch die Luftspalt-Feldstärke nichtlinear verzerrt. Da ist zweitens das Antriebsdrehmoment: seine Abhängigkeit von der Luftspalt-Feldstärke ist degressiv, mehr als 90° Drehung des Magnetzylinders (Abb. 2) sind nicht möglich. Und eine entsprechend degressive Kennlinie findet man – drittens – auch beim Sensor. Die elektrische Eingangsimpedanz des Hallsystems wird nur von den elektrischen Parametern der Spule bestimmt; wegen der relativ schlechten elektromagnetischen Kopplung haben die mechanischen Parameter der angekoppelten Federn hierauf keine Auswirkungen. Die mechanische Eingangsimpedanz einer Feder ist, wie die vielen Resonanzspitzen der Übertragungsfunktion offenbaren, sehr stark von der Frequenz abhängig. Will man nicht alle Resonanzspitzen (und die damit verbundenen Wechsel von Feder- und Massenbelastung) einzeln erfassen, nimmt man die mechanische Eingangsimpedanz als im Mittel resistiv an (Reibwiderstand). Einem frequenzunabhängigen Erregerstrom entspricht dann eine (im Mittel) frequenzunabhängige Schnelle, und damit am Ausgang eine (im Mittel) frequenzunabhängige Spannung (Induktionsgesetz). Diese Annahme wird bis etwa 4.5 kHz durch Abb. 4 gut bestätigt. Eine frequenzkonstante Schnelle bedeutet, dass die Auslenkung mit $1/f$ abnimmt, dass also zu tiefen Frequenzen hin immer größere Auslenkungen und damit Nichtlinearitäten zu erwarten sind. Der Vergleich zweier Messungen bestätigt diese Annahme: Im rechten Bild von **Abb. 5** sind tieffrequent deutliche Unterschiede zu erkennen, die auf Nichtlinearitäten zurückzuführen sind.

Eine pauschale Klirrfaktorangabe ist bei Federhall-Systemen wegen der stark frequenzabhängigen Übertragungsfunktion nicht möglich. **Abb. 6** vermittelt einen Eindruck der Verzerrungen, die bei einer leichten Veränderung der Generatorfrequenz entstehen können.

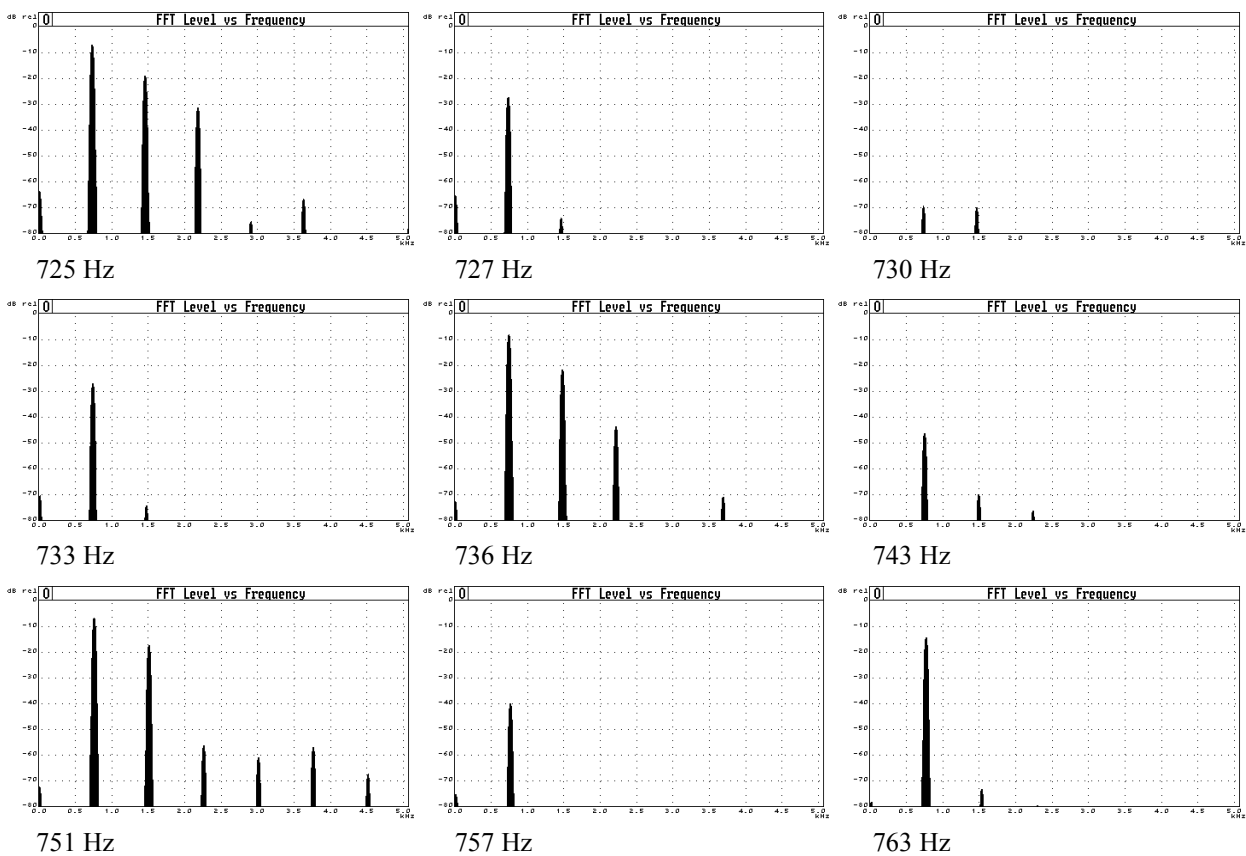


Abb. 6: Verzerrungsspektren. Die Erregerstromstärke ist bei allen Messungen die gleiche, variiert wurde nur die Generatorfrequenz. Analysiert wurde die Spannung der Sensorspule (Accutronics 4AB3C1B).

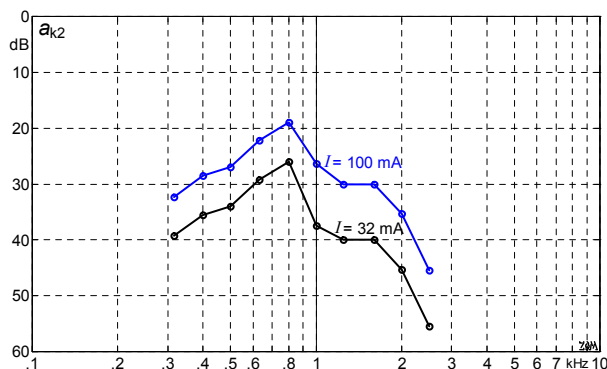


Abb. 7: Quadratische Klirrdämpfung, mit Terz-Rauschen bei zwei verschiedenen Erregerströmen gemessen. 40 dB entspricht 1% Klirrfaktor.

Weil bei Sprache nie und bei Musik nur sehr selten ein reiner Sinuston vorkommt, sind ergänzende Messungen mit größerer Bandbreite zweckmäßig. Gut geeignet ist hierfür terzbreites Rauschen (**Abb. 7**). Die hiermit durchgeführten Messungen offenbaren ein Verzerrungsmaximum im Frequenzbereich um 800 Hz. Als Ursache ist eine Longitudinalresonanz vorstellbar, erhärtet wurde diese Vermutung allerdings nicht. Die nichtlineare Modellierung ist aufwändig, wie auch die dreidimensionale Messung mit einem Laser-Vibrometer. Orientierende Hörversuche ergaben, dass bei der Verhallung von Gitarrentönen (dem Haupteinsatzgebiet) ein Betrieb mit maximal ca. 30 mA keine störenden Verzerrungen produziert.

Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass Federhall-Systeme mit sehr unterschiedlichen Aktor- und Sensorspulen ausgestattet werden. Der hier angegebene Stromgrenzwert darf nicht unbesehen auf andere Systeme übertragen werden. Generell gilt: Die Aktorspule sollte aus einer hochohmigen Quelle (d.h. mit Stromeinprägung) betrieben werden, und auch für die Sensorspule ist ein hochohmiger Abschluss erforderlich (ggf. mit Resonanz-Kondensator).

Neben den Nichtlinearitäten treten im Betrieb drei weitere Stör-Effekte auf: Erschütterungen des Hallsystems, Stör-rauschen, und durch Magnetfelder induzierte Störungen. Federhall-Systeme sollten in guten Schwingungsisolatoren gelagert werden, um die Übertragung von Körperschall zu erschweren. Das von den resistiven Anteilen der Spulen erzeugte Stör-rauschen ist in der Regel von untergeordneter Bedeutung, magnetische Störfelder können aber ein Problem darstellen – sei es, dass Trafos ein Brummen induzieren, oder Lautsprecherfelder zu Rückkopplungen führen. Einer Veröffentlichung (**Abb. 8**) ist zu entnehmen, dass Felder, deren Richtung parallel zur Federachse verläuft, maximale Störwirkung erzeugen – das ist nicht nachvollziehbar. Messungen im Parallelfeld einer Helmholtzspule (520 Hz, 130 μT) ergaben: 32 mV (a), 2 mV (b), 1 mV (c). Am stärksten stören magnetische Wechselfelder, deren Richtung parallel zu den Längsschenkeln der Spule verläuft (**Abb. 9**).

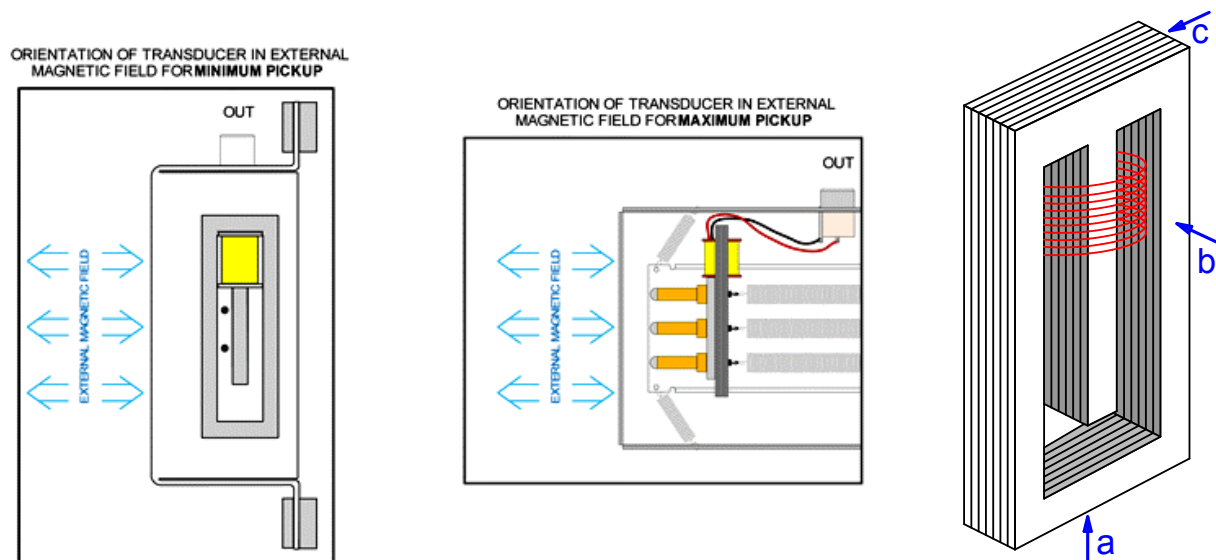


Abb. 8: Zur Richtungsabhängigkeit der Störwirkung externer Felder [www.amplifiedparts.com/tech-corner]. Die zum mittleren Bild angegebene Richtung für maximale Empfindlichkeit ist nicht nachvollziehbar; Messungen an einem Accutronics-Hallsystem ergaben hierfür die mit a bezeichnete Richtung (rechtes Bild).

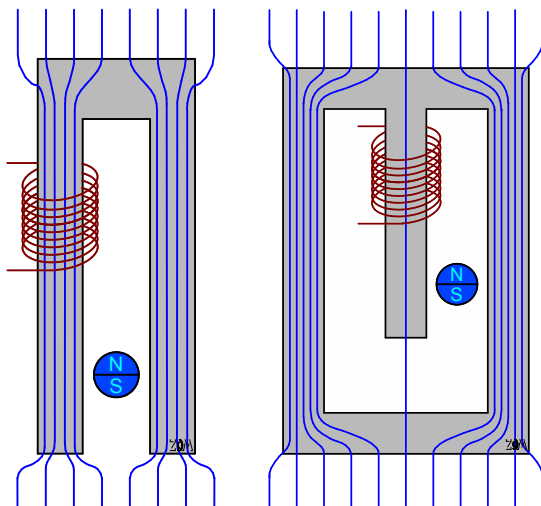


Abb. 9: Schematischer Feldlinienverlauf eines externen Störfeldes. Wäre die Sensorspule zweischenkelig wie die Aktor-Spule (links), würde das Störfeld eine große Störspannung induzieren. Deshalb ist die Sensorspule dreischenkelig (rechts); die äußeren Schenkel wirken als Abschirmung und leiten den magnetischen Störfeldfluss größtenteils an der Spule vorbei.

Eine Besonderheit der Hallfeder ist die bei der Wellenausbreitung auftretende **Dispersion** (die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist frequenzabhängig). Bilbao und Parker [2, 3] haben in ihren Arbeiten die analytischen Grundlagen ausführlich dargelegt: Entlang der Hallfeder laufen mehrere Verformungswellen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. Der wichtigste Wellentyp unterliegt einer rigiden Tiefpassbegrenzung, mit einer über der Frequenz abnehmenden Ausbreitungsgeschwindigkeit (**Abb. 10**). Er ist im Bild an den nach rechts gekrümmten Kurven erkennbar. Daneben existiert noch ein zweiter Wellentyp mit über der Frequenz zunehmender Ausbreitungsgeschwindigkeit, an den nach links oben laufenden Linien erkennbar. Die tieffrequente Delayzeit T_D hängt ab von den Federradien R , r , und der Windungszahl N (**Abb. 11**), üblich ist $R \approx 2$ mm, $r \approx 0.2$ mm.

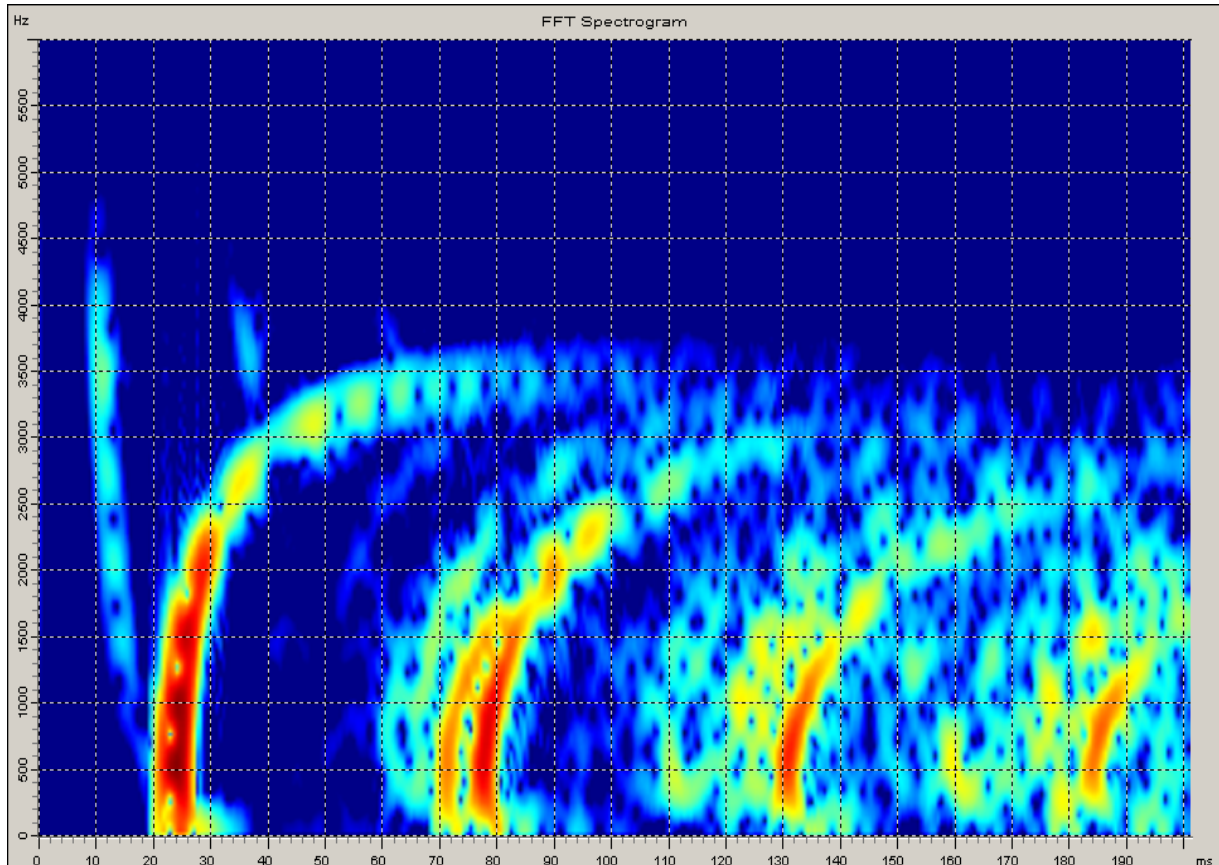
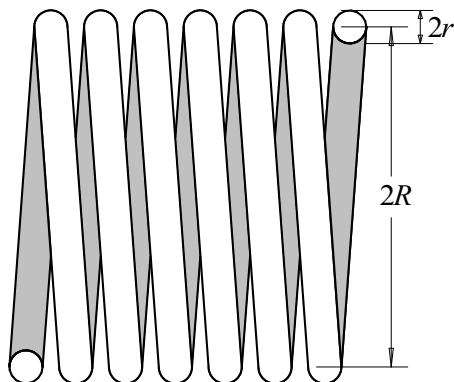


Abb. 10: Farbspektrogramm der Impulsantwort eines einfachen Federhall-Systems.



$$T_D = \frac{2L}{v_0} = \frac{N}{201 \text{ s/m}} \cdot \frac{R^2}{r}$$

$$f_G = 135 \text{ m/s} \cdot \frac{r}{R^2}$$

$$f_G = \frac{N}{1.5 \cdot T_D} \quad \frac{R}{r} \approx 10 \dots 14$$

Abb. 11: Geometrie der helikal gewundenen Hallfeder (links), charakterisierende Parameter (rechts). N = Windungszahl, T_D = tieffrequente Delayzeit, L = Drahtlänge, f_G = Tiefpass-Grenzfrequenz.

Die Formeln offenbaren das Dilemma beim Entwurf: Für eine hohe Grenzfrequenz muss das Verhältnis r/R^2 groß sein, damit wird aber die Delayzeit kurz. Als Ausweg bietet sich nur an, eine sehr lange Feder zu verwenden, die dann jedoch schon bei winzigen Erschütterungen zu schwingen beginnt. Am Markt haben sich hochwertige "lange" Systeme durchgesetzt, deren Gehäuse ungefähr 43 cm lang ist, und einfachere "kurze" Systeme (ca. 24 cm). Üblich sind 1 – 3 parallele Federn; bei den "langen" Systemen ist jede Feder ungefähr in der Mitte unterteilt, d.h. aus zwei ähnlich langen Teilfedern zusammengesetzt (Abb. 1). Liegen im Hallsystem zwei oder drei Federn parallel, sind diese auf unterschiedliche Resonanzfrequenzen bzw. unterschiedliche Delayzeiten abgestimmt.

Bilbao/Parker [2, 3] legen ihren Arbeiten ein Differentialgleichungssystem zugrunde, das für Wellenausbreitungen 12 Lösungen besitzt. Diese reduzieren sich auf 6, wenn nur Ausbreitungen in eine Richtung betrachtet werden, und auf zwei Lösungen bei Beschränkung auf den hörbaren Frequenzbereich. In **Abb. 12** sind diese zwei Lösungen über der Wellenzahl β dargestellt. Der Steigungswinkel der Hallfeder, hier zu 8° angenommen, bestimmt, wie stark sich die beiden Lösungen unterscheiden. Zu einer bestimmte Frequenz, z.B. 3 kHz, gehören vier unterschiedliche Wellenzahlen.

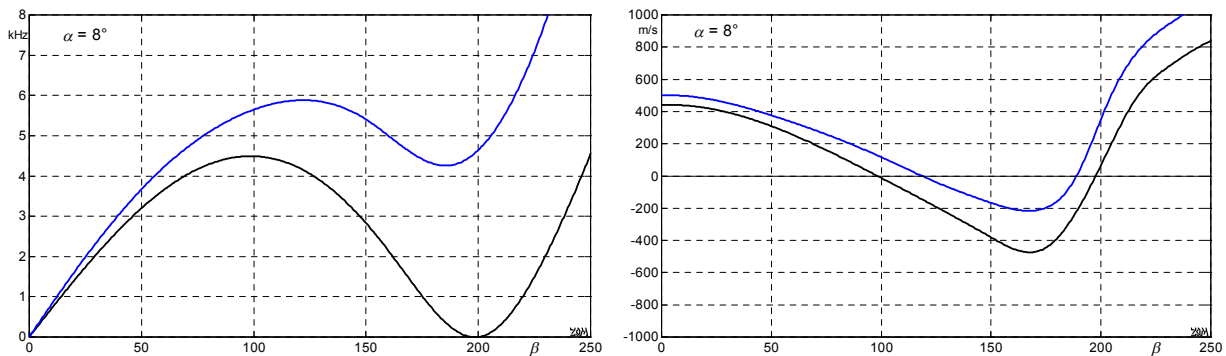


Abb. 12: Dispersion für 8° Steigungswinkel (pitch angle); rechtes Bild = Gruppenlaufzeit. Nach [2].

In **Abb. 13** ist das Spektrogramm der Impulsantwort eines Zweifeder-Systems dargestellt, und daneben eine einfache Simulation, die schon einen Teil der Reflexionen nachbildet. Bei den beiden parallelen Federn beträgt die tieffrequente Laufzeit 29 bzw. 36 ms. Beim Hin- und Herlaufen des Impulses entstehen ungerade Vielfache (87 bzw. 108 ms etc.). In der Simulation sind (bei 60 ... 80 ms) zwei zusätzliche Reflexionen eingezeichnet, die von der in Federmitte angebrachten Sperrmasse kommen. Jede der beiden Hallfedern besteht nämlich aus zwei (in Reihe liegenden) Teilfedern, die mit einer Klammer verbunden sind (**Abb. 14**).

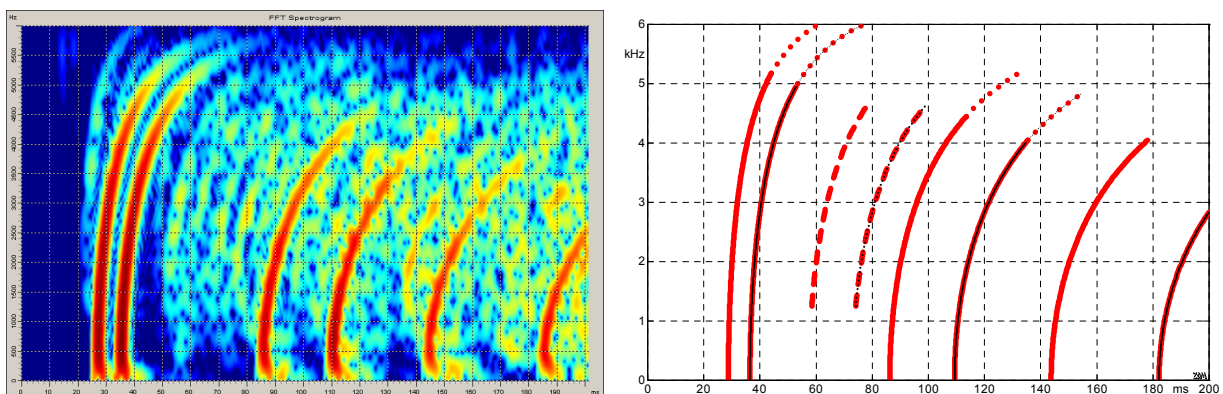


Abb. 13: Farbspektrogramm der Impulsantwort eines Zweifeder-Systems; rechts eine einfache Modellrechnung.

Diese Klammer lässt sich als Störelement auf einer Leitung interpretieren. Ihre Impedanz ($j\omega m$) ist tieffrequent klein, gewinnt mit wachsender Frequenz aber gegenüber dem mechanischen Wellenwiderstand an Bedeutung und verursacht somit Reflexionen [1].

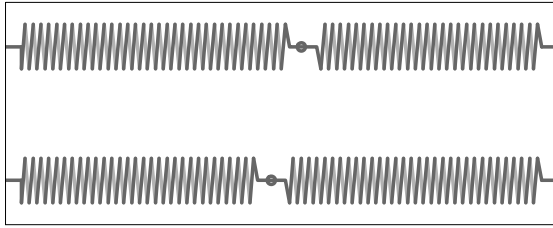


Abb. 14: Federhallsystem mit zwei unterteilten Hallfedern (Accutronics). Alternativ sind auch Systeme mit drei unterteilten Hallfedern in Gebrauch. Die Verformungswellen laufen die Federn entlang und werden an beiden Enden reflektiert. Auch an der Verbindungsstelle findet eine Reflexion statt, die aber schwächer ausgeprägt ist.

In **Abb. 15** sind weitere Anteile der Impulsantwort dargestellt. Eine noch genauere Analyse stößt jedoch bald an Grenzen, weil die einzelnen Wellen in ihrer Überlagerung zu Schwebungen führen, und eine Spektralanalyse nicht gleichzeitig eine hohe Frequenz- und Zeitauflösung liefern kann.

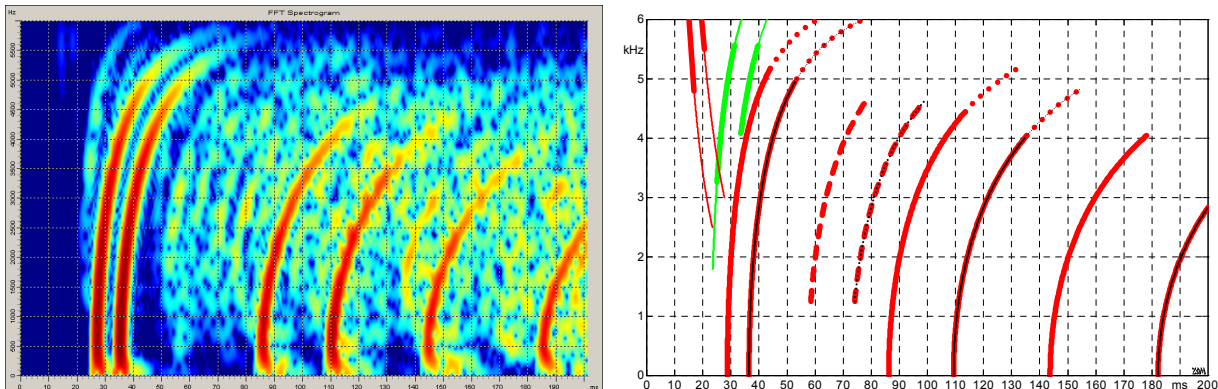


Abb. 15: Farbspektrum der Impulsantwort eines Zweifeder-Systems (links), Modellrechnung (rechts).

In **Abb. 16** sind Analysen von vier verschiedenen Federhall-Systemen gegenübergestellt.

- 1 = Accutronics, 2 lange, unterteilte Federn;
- 2 = Accutronics, 3 lange, unterteilte Federn;
- 3 = Hallsystem mit 2 kurzen, nichtunterteilten Federn;
- 4 = Sehr einfaches Hallsystem mit 2 kurzen, nichtunterteilten Federn.

Sehr gut zu erkennen sind hier die verschiedenen Laufzeiten, sowie die unterschiedlichen Grenzfrequenzen. Die Accutronics-Systeme erzeugen schon früh einen dichten Hall, bei den einfachen Systemen entwickelt sich der Hall langsamer aus Einzelreflexionen. Bei allen vier Systemen ist die dispersive Wellenausbreitung sehr ausgeprägt und hörbar. Erleidet ein Impuls Laufzeitverzerrungen mit über der Frequenz ansteigender Laufzeit, kommen höherfrequente Spektralanteile (Formanten) später als tieffrequente. Klanglich macht sich das als Sweep (Chirp) bemerkbar, mit ansteigender Tonhöhe ("uiii"). Diese Verfärbung ist, zusammen mit den leicht metallisch scheppernden Reflexionen, ein Charakteristikum aller derartiger Federhall-Systeme. Digital-Hallgeräte haben in ihrer Frühzeit oft nur die diskrete Reflexionsstruktur der Federhall-Systeme nachgebildet, ohne Dispersion. Erst nach und nach, mit zunehmender Prozessorgeschwindigkeit, entstanden Algorithmen, die (z.B. mit Allpässen) den typischen Federhall-Charakter in guter Qualität nachbilden konnten.

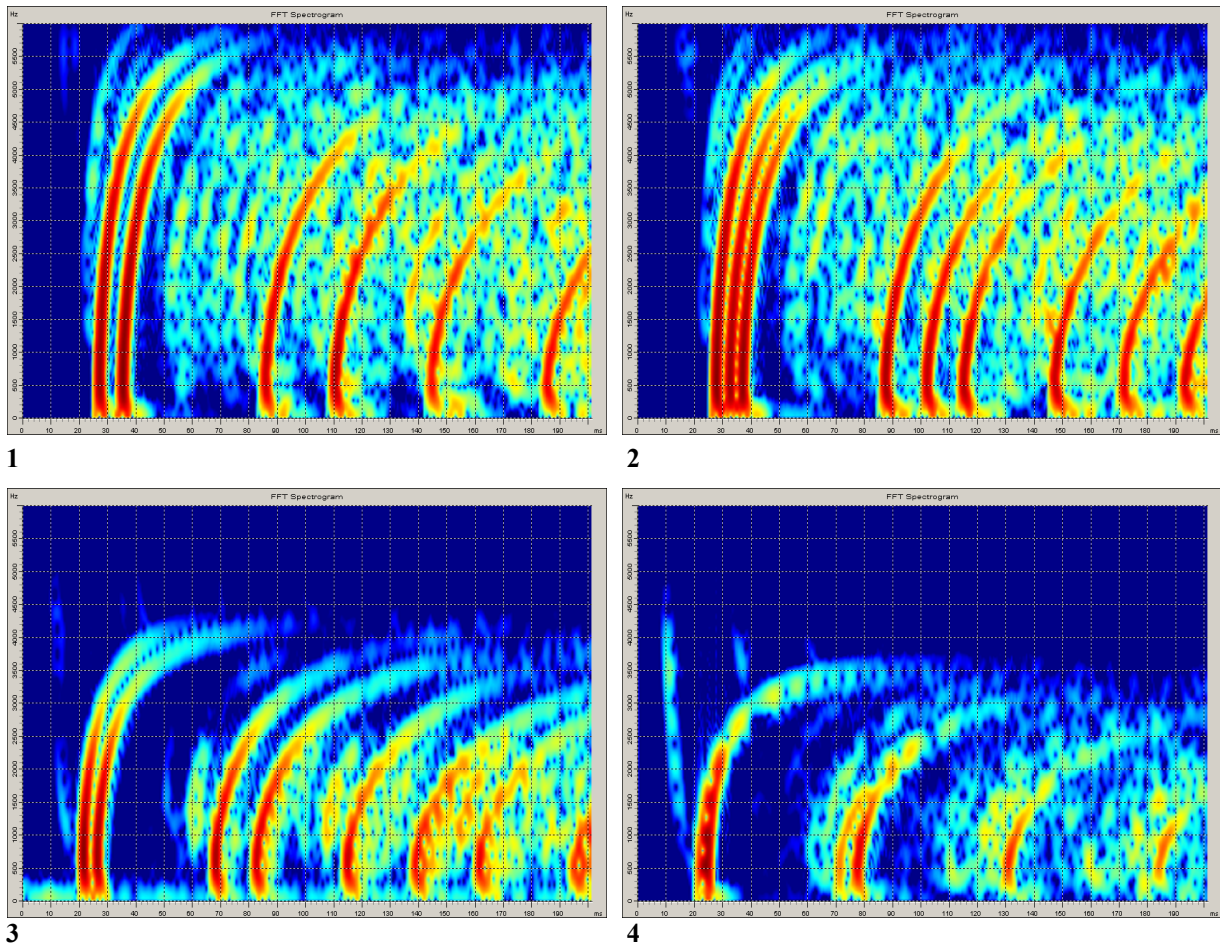


Abb. 16: Farbspektrogramme der Impulsantworten verschiedener Federhall-Systeme.

Die Dauer des Nachhalls, oder besser: die Abklinggeschwindigkeit, hängt von der Laufzeit und der dabei auftretenden Dämpfung ab. Als **Nachhallzeit** wird üblicherweise die Zeit spezifiziert, die vergeht, bis (nach dem Abschalten der Quelle) der Nachhallpegel um 60 dB abgenommen hat. Beim Accutronics-Hallsystem (Abb. 17) fällt der Hallpegel nach Rauschanregung in der 2-kHz-Terz linear über der Zeit ab (exponentielle Signalabnahme). In der 250-Hz-Terz findet man jedoch ein ganz anderes Verhalten: Erst eine schnelle Abnahme, dann eine viel größere Nachhallzeit. Für das Gehör ist hierbei der frühe Abfall bedeutend, die hierbei gemessene "Early-Decay-Time" entspricht der 2-kHz-Nachhallzeit. In Abb. 18 sind für dieselbe Hallfeder die Frequenzgänge der Early- und Late-Decay-Time dargestellt. Der Hersteller bietet drei verschiedene Nachhallzeiten an, die durch unterschiedliche Dämpfer-elemente realisiert werden. Sehr groß sind die Unterschiede allerdings nicht.

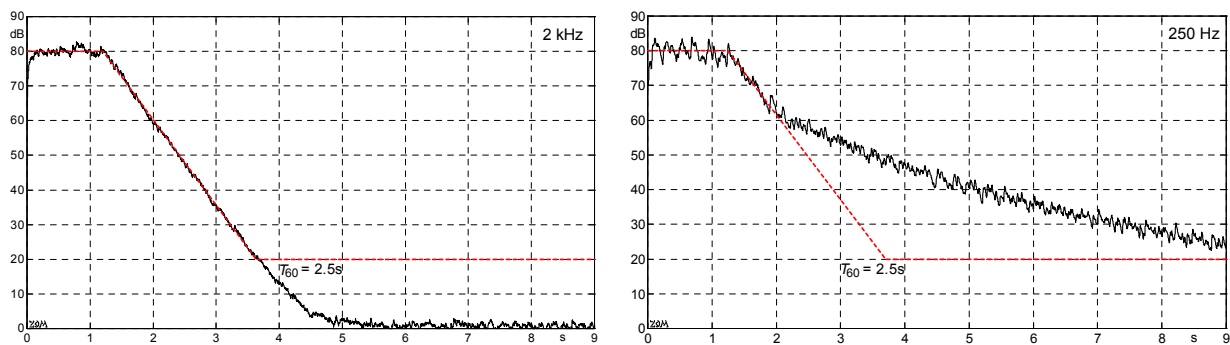


Abb. 17: Abklingvorgang einer Accutronics-Hallfeder (4AB3C1B).

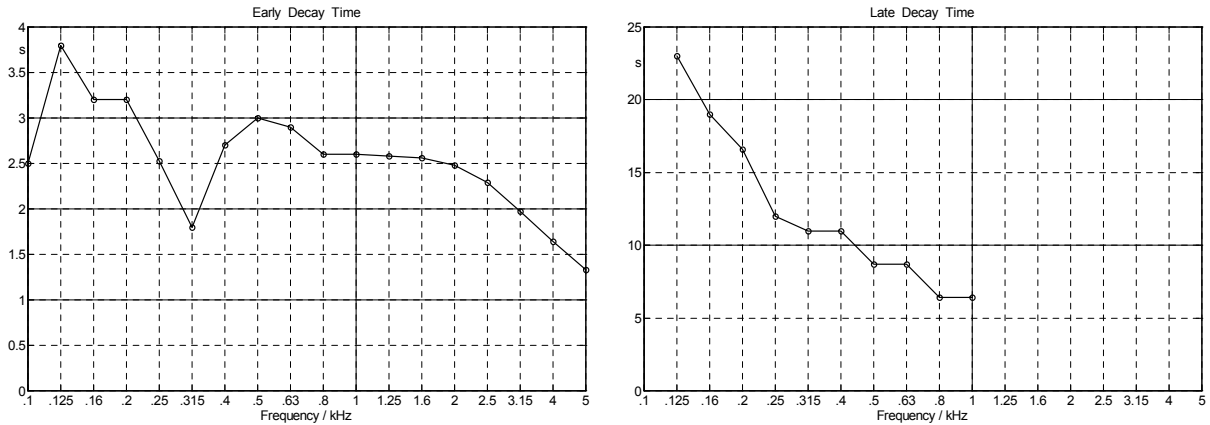


Abb. 18: Frequenzgang der Nachhallzeit einer Accutronics-Hallfeder (4AB3C1B).

Die nachfolgende Tabelle erläutert die Codierung der verschiedenen Modelle [www.amplifiedparts.com/tech-corner].

ACCUTRONICS® (USA & KOREA) AND MOD™ REVERB TANK PART NUMBERING SYSTEM			
Accutronics® part numbers consist of a seven character alpha-numeric code with each character of the part number representing a specification (For example, 4AB3C1B). MOD™ tanks add "MOD" in front of the part number (MOD-4AB3C1B).			
TANK TYPE (Length & Number of Transmission Springs)			
1	Short tank (9.25") with 2 transmission springs	8	Short tank (9.25") with 3 transmission springs
4	Long tank (16.75") with 2 transmission springs	9	Long tank (16.75") with 3 transmission springs
TYPE 1 & 4: INPUT IMPEDANCE (@ 1 kHz)		TYPE 8 & 9: INPUT IMPEDANCE (@ 1 kHz)	
A	8 Ω	A	10 Ω
B	150 Ω	B	190 Ω
C	200 Ω	C	240 Ω
D	250 Ω	D	310 Ω
E	600 Ω	E	800 Ω
F	1,475 Ω	F	1,925 Ω
<small>* Approximate DC resistance of transducer coils can be used as a reference for input and output impedance if the original reverb tank is not labeled. The actual resistance measured may vary.</small>			
TYPE 1 & 4: OUTPUT IMPEDANCE (@ 1 kHz)		TYPE 8 & 9: OUTPUT IMPEDANCE (@ 1 kHz)	
A	500 Ω	A	600 Ω
B	2,250 Ω	B	2,575 Ω
C	10,000 Ω	C	12,000 Ω
DECAY TIME			
1	SHORT	(1.2 to 2.0 s)	
2	MEDIUM	(1.75 to 3.0 s)	
3	LONG	(2.75 to 4.0 s)	
CONNECTORS (Non-Insulated or Insulated from Outer Channel)			
GROUNDED = 0 INSULATED = 1		INPUT	OUTPUT
	A	0	0
	B	0	1
	C	1	0
	D	1	1
E = No Outer Channel			
LOCKING DEVICES			
1 = NO LOCK			
MOUNTING PLANE (Predetermined Factory Adjustment of Transducer Magnets)			
HORIZONTAL (Least Desirable*)	VERTICAL (Best*)	ON-END (Next Best*)	
A = OPEN SIDE UP	C = CONNECTORS UP	E = INPUT UP	
B = OPEN SIDE DOWN	D = CONNECTORS DOWN	F = OUTPUT UP	
HORIZONTAL MOUNT OPEN SIDE DOWN (B) 	VERTICAL MOUNT CONNECTORS UP (C) 	ON-END MOUNT INPUT UP (E) 	
<small>*The ideal mounting plane for reverb tanks is one that allows the weight of the transmission springs to keep the transducer magnets centered along the air gap and not toward the lamination.</small>			

Literatur:

- [1] Zollner M.: Physik der Elektrogitarre, Kap. 10.8.1, www.gitarrenphysik.de
- [2] Bilbao S.: Numerical Simulation of Spring Reverberation; sbilbao@staffmail.ed.ac.uk
- [3] Parker J., Bilbao S.: Spring Reverberation, A Physical Perspective; julian.parker@tkk.fi
- [4] Fidi W.: Erzeugen hochwertigen künstlichen Nachhalls, Funkschau Heft 20 + 21, 1971.
- [5] AKG: Tragbares Zweikanal-Hallgerät BX-15 (ca. 1979)
- [6] AKG: Studio-Hallgerät BX-20 (ca. 1969)
- [7] AKG: Profi-Hallgerät BXM (ca. 1978)
- [8] www.amplifiedparts.com/

Patente:

- US 3,106,610 Hammond Organ Company
- US 2,437,445 Stack John D.
- US 2,230,836 Hammond Laurens
- US 1,852,795 Wegel R. L.

Fachartikel in www.gitarrenphysik.de	17 Studio- und Messmikrofone, Teil 1 – 5
1 Gitarren-Lautsprecher	18 Die Dummy-Load als Lautsprecher-Ersatz
2 Studio-Lautsprecher	19 Nichtlineare Modelle
3 Welche ECC83 darf's denn sein?	20 Wie misst man Elkos?
4 Reamping and Reguitaring	21 Der Lautsprecher-Phasengang
5 Gitterstrom bei Trioden	22 Negative Gruppenlaufzeit
6 Der Verzerrer	23 Der LDR als steuerbarer Widerstand
7 Der Range-Master rauscht	24 Steuerbare Allpässe – Uni-Vibe & Co.
8 Raumakustik	25 Der JFET als steuerbarer Widerstand
9 Saitenalterung	26 Messdaten eines Nahfeld-Monitors
10 Lautsprecherkabel	27 Bündelung: Studio- und Heimlautsprecher
11 Schaltungsvarianten für das Reguitaring	28 Bündelung: Hörner
12 Verzerrungen: gerade oder ungerade?	29 Bündelung: Instrumentallautsprecher
13 Die Basswiedergabe beim Studio-Monitor	30 Lautsprecher-Parameter: Datensammlung
14 Vom Sinn und Unsinn der CSD-Wasserfälle	31 Lautsprecher-Parameter: Messverfahren
15 Artefakte bei Wasserfall-Spektrogrammen	32 Lautsprecher-Parameter: Strahlungsimpedanz
16 Equalizer und Allpässe, Teil 1 – 3	33 Bundhöhen