

5.13 Tonabnehmer-Mikrofonie

"Mikrofonie" bezeichnet die Empfindlichkeit gegenüber Luft- und Körperschall. Eigentlich sollte ein elektromagnetischer Tonabnehmer nur auf Saitenschwingungen reagieren, bewusst oder unbewusst haben einige Entwickler aber effiziente Mikrofone in die Gitarren eingebaut: Spricht man zu seinem Instrument (ya fucking bitch ... out of tune ... burn ... Monterrey ...), so hört's jeder über die Lautsprecher mit. In den meisten Fällen wollte vermutlich ein übermotivierter Entwickler eine Abschirmung gegen Brummstörungen anbringen, tatsächlich hat er mit seinem **Blechgehäuse** aber eine Mikrofonmembran hinzugefügt. Die zu allem Überfluss gegen tieffrequente Magnetfelder vollkommen wirkungslos bleibt.

Man könnte das Ganze mit einem "ich spreche nie zu meiner Gitarre" übergehen, aber oft ver selbständigen sich derartige Probleme und enden in schrillen Pfeiftönen. Genau wie bei richtigen Mikrofonen kommt es zu **Rückkopplungen**, sobald die Schleifenverstärkung größer als eins ist. Besonders gefürchtet sind Abschirmhauben aus Stahlblech. Sogar Seth Lover, berühmter Gibson-Entwickler, wollte seinen PAF in ein Stahlblechgehäuse einbauen; hatte er doch ganz richtig erkannt, dass dessen relativ schlechte Leitfähigkeit wenig Wirbelstromverluste bedeutet. Die schlechte Lötbarkeit dieses Materials führte dann aber doch zu Neusilber, dem Standard im Premium-Bereich. Welche Stahlart Seth Lover verwenden wollte, ist nicht bekannt. Es gibt zwar auch unmagnetische Stähle, die meisten sind aber ferromagnetisch, und würden bei Anregung durch Luftschall wie die schwingende Saite große Spannungen in der Tonabnehmerspule induzieren. In den Anfangsjahren, als die Gitarrenverstärker noch nicht extrem übersteuert wurden, wäre das noch nicht zum echten Problem geworden, aber schnell nahmen Verstärkerleistung und Schleifenverstärkung zu, und plötzlich hatten Gitarren katastrophal pfeifende Tonabnehmer: *"Es gab einmal einen Tonabnehmer für Schallochmontage mit der Bezeichnung 'GM100', bei dem aus blanker Unwissenheit das ganze Gehäuse aus Eisenblech gefertigt war und der auf diese Weise hinsichtlich Mikrofonie sämtliche Rekorde gebrochen hat [Lemme]"*.

Aber selbst wenn man 'unmagnetisches' Messingblech verwendet hätte: Dessen gelbe, schnell oxidierende Farbe wäre absolut kontraproduktiv gewesen. Deshalb wurden derartige Gehäuse vernickelt (gelblicher Farbton) oder verchromt (bläulich). **Nickel** ist aber ferromagnetisch und leitet Magnetfelder ähnlich gut wie Dynamoblech. **Chrom** hingegen ist paramagnetisch, also praktisch unmagnetisch – gleiches gilt für Aluminium. Es reicht aber nicht, einfach nur unmagnetische Materialien zu verwenden: Bewegung eines elektrischen Leiters (Blech) in einem Magnetfeld induziert in diesem Leiter einen **Wirbelstrom** – und der erzeugt ein magnetisches Wechselfeld, das in der Tonabnehmerspule eine Wechselspannung hervorruft.

In einem stark vereinfachten Modell wird man das Abschirmblech mechanisch als Masse-Feder-System beschreiben. Unterresonant wirkt die Feder, überresonant die Masse. Schalldruck und Blechfläche ergeben zusammen eine flächennormale Kraft, die unterresonant (zusammen mit der Feder) eine frequenzunabhängige Druck-Auslenkungs-Funktion bewirkt. Überresonant ist das System massengehemmt, die Druck-Auslenkungs-Funktion ist hier proportional zu $1/f^2$. Bei einem ferromagnetischen Blech ist aber nicht die Auslenkung, sondern die Schnelle induktionsbestimmend, sodass insgesamt eine Bandpassübertragung entsteht; maximale Spannung ergibt sich bei der Blechresonanz. Ist die nur schwach bedämpft, was bei Metallen fast der Normalfall zu sein scheint, können gewaltige Verstärkungsfaktoren (Gütefaktoren) hinzukommen. Beim unmagnetischen Blech entsteht eine schnelleproportionale Wirbelspannung, die mit der Windungszahl hochtransformiert wird.

Resonanzfrequenz und Güte kann man mit einem einfachen Versuch abschätzen: Klopft man das Tonabnehmer-Gehäuse mit einem nichtmagnetischen Gegenstand (z.B. Plektrum) an, hört man einen Ton. Seine Tonhöhe entspricht der Resonanzfrequenz, seine Ausschwingdauer korreliert mit der Güte. Ein "Bing" deutet auf Resonanzen im 2 – 3-kHz-Bereich hin (→ Sprach-Formanten), das wäre der Bereich, in dem auch Tonabnehmer-Resonanzen liegen könnten – besonders fatal. Ein kurzes "Tuck" oder "Tock" wäre diesbezüglich günstiger: Tieffrequenter, und stärker bedämpft.

Nun hat aber alles mindestens zwei Seiten: So eine Gehäuseresonanz kann, so sie denn noch nicht für ungewollte Pfeiftöne sorgt, der Gitarre einen charakteristischen Klang verleihen, den der Gitarrist nicht missen möchte, wegen dessen er ja gerade dieses Instrument gekauft hat. Und da ein Tonabnehmer sogar sechs Seiten* hat, ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass nicht nur eine Resonanz, sondern deren mehrere wirken. Allseitig blechummantelte Tonabnehmer, als Abschirmwunder konzipiert, offenbarten plötzlich ungeahnte Klangqualitäten – falls man den Verstärker nicht zu laut aufdreht. Was anderes macht ein Wah-Wah-Pedal, als eine (per Pedalstellung veränderliche) Resonanzüberhöhung zu erzeugen? Und hier kommt nun wieder der "Vintage-Guru" zum Zuge: "Die originalen PAF-Pickups hatten keine gepotteten Coils, da waren die Resonanzen und all das eben viel stärker, viel authentischer, da konnten sich die Obertöne viel freier entfalten. Das lebt und singt, und ist nicht so clean wie bei den späteren Hightech-Replicas." Alles Quatsch? Ein Körnchen Wahrheit könnte dran sein (oder auch ein "grano salis"): Allein für die 58er und 59er-Les-Paul wurden ca. 3000 Tonabnehmer verbaut. Denen wird man Gehäuseresonanzen nicht generell absprechen können – es könnte durchaus einer mit optimalen Strukturresonanzen dabei gewesen sein. Ob sich die aber hörbar auswirken, bleibt Spekulation. Sicherheitshalber vergießt Gibson heute den '57 classic Humbucker mit Wachs. Der BurstBucker hingegen kommt mit "non-potted Coils", also wie damals mit nicht-gewachster Spule. Denn Wachs, insbesondere wenn zwischen Spulenträger und Metallgehäuse gegossen, kann Resonanzen bedämpfen.

Vermutungen über die Relevanz von Tonabnehmer-Resonanzen lassen sich durch Messungen ein gutes Stück weit untermauern bzw. widerlegen. Ein im reflexionsarmen Raum durchgeführter Versuch sollte objektive **Übertragungsdaten** liefern. Dazu wurden an verschiedene Tonabnehmern, die 1m vor der Mündung eines Hornlautsprechers befestigt waren, mittels Substitutionsmethode die Übertragungskoeffizienten ermittelt. Als Referenz zur Schallpegelmessung diente ein Brüel&Kjaer-Mikrofon (4190). Sehr schnell zeigte sich, dass einige Tonabnehmer nicht nur auf Luftschall, sondern auch auf die von Lautsprecher und Lautsprecher-Zuleitung verursachten elektromagnetischen Felder reagierten. Sicher auch eine beachtenswerte Eigenschaft, aber für diesen speziellen Versuch unerwünscht. Deshalb wurde zwischen Lautsprecher und Tonabnehmer ein geerdetes Gitter angebracht, sodass im Wesentlichen nur Luftschall den Tonabnehmer anregt.

Abb. 5.13.1 zeigt die Freifeldübertragungsmaße einiger ausgewählter Tonabnehmer. Die geringste Luftschallempfindlichkeit findet man beim **Gibson Tony Iommi**, der ganz offensichtlich für Highgain-Einsätze, also stark übersteuerte Gitarrenverstärker, konzipiert wurde. Das ganze Tonabnehmer-Gehäuse ist mit einer harten Vergussmasse ausgegossen, ungedämpfte Blechschwingungen gibt es praktisch nicht. Der **Gibson '57-classic** ist schon etwas empfindlicher, bei 3,4 kHz ergeben sich ca. 50 nV/Pa. Bei 1 Pa Schalldruck (= 94 dB_{SPL}) erzeugt der Tonabnehmer 50 nV. Ohne Kappe! Mit Kappe erhöht sich die Luftschallempfindlichkeit (je nach Kappen-Befestigung) ganz gewaltig, die Hauptresonanz (1,35 kHz) ist sehr stark von

* Da unterscheidet er sich orthografisch noch von der Gitarre

der individuellen Montage abhängig. Gut vorstellbar, dass über die Jahrzehnte hinweg fast allen Frequenzen die Ehre zuteil wurde, Tonabnehmergehäuse-Hauptresonanz einer Les Paul zu sein. Was die Frage nach der **Tonabnehmergehäuse-Hauptresonanz-Relevanz** aufwirft.

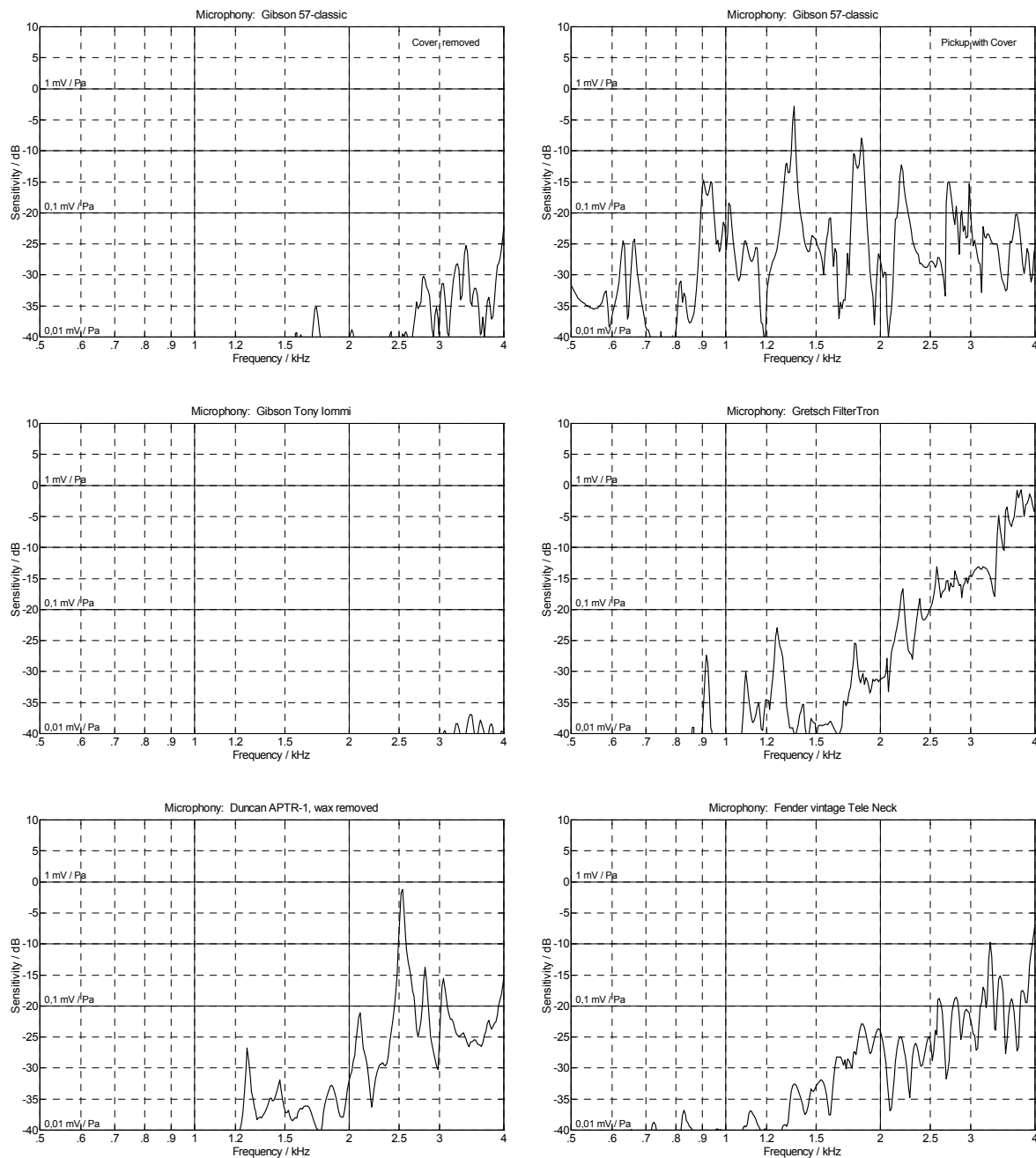


Abb. 5.13.1: Luftschallübertragungsmaße (Freifeld). Die Kurven charakterisieren individuelle Tonabnehmer; die interindividuellen Abweichungen bei Tonabnehmern desselben Typs sind sehr groß.

Tonabnehmer erzeugen im normalen Betrieb – je nach Saitenart, Saitenlage und Spielweise – Induktionsspannungen bis zu etwa **2 V**. Typische Gitarrenlautsprecher werden von den Herstellern mit ca. 100 dB (1W, 1m) angegeben, woraus man in erster Näherung Schallpegel von z.B. 114 dB und hierdurch induzierte Spannungen von **10 mV** ansetzen kann. Das bedeutet, dass die durch Luftschall induzierten Tonabnehmerspannungen nur 1/200 der durch Saiten-

schwingungen induzierten Spannungen betragen. Daraus zu schließen, dass Tonabnehmer-Gehäuseresonanzen nun prinzipiell unbedeutend sind, ist aber vorschnell: Je nach Spiel-Situation könnten sich auch ganz andere Relationen ergeben. Bei Gitarristen ist häufig die Meinung zu hören, Tonabnehmerpfeifen sei nur bei Gitarrenanlagen, die einen sehr hohen Schallpegel erzeugen, ein Problem: "Vor zwei Marshall-Stacks muss es ja pfeifen". Das stimmt so nicht. Bestimmende Größe ist die **Schleifenverstärkung**, also die Verstärkung, die das Signal erfährt, wenn es einmal "im Kreis" gelaufen ist: Von der Gitarre durch Gitarrenverstärker und Lautsprecher, und durch den Raum (als Luftschall) zurück zur Gitarre.

Ein Zahlenbeispiel: Die Gitarre erzeugt z.B. eine Spannung von 0,1V, die vom Verstärker auf 2V verstärkt wird. Für den 8- Ω -Lautsprecher bedeutet dies 0,5W, woraus in 1m Abstand vor dem Lautsprecher ein Schallpegel von 97dB resultiert. Trifft dieser Schall auf den Gitarren-Tonabnehmer, erzeugt dieser aufgrund seiner Luftschallempfindlichkeit z.B. 1,4mV. Zusätzlich zu den 0,1V. Die Schleifenverstärkung ist hierbei 0,014, also deutlich kleiner als eins. Dreht der Gitarrist nun die Verstärkung auf, um einen lautereren und/oder verzerrteren Klang zu bekommen, oder erzeugt mit Klangfiltern selektive Verstärkungen, so nähert sich die Schleifenverstärkung dem Wert eins und kann ihn u.U. auch überschreiten – dann pfeift's. Sehr theoretisch betrachtet muss auch noch eine spezielle Phasenbedingung eingehalten sein, was aber (wegen vielgestaltiger Schallwege) immer möglich ist.

Schon bei Verstärkungen, die noch kein Rückkopplungspfeifen erzeugen, macht sich die Luftschallempfindlichkeit des Tonabnehmers durch **Klangverfärbungen** bemerkbar. Neben dem gewünschten Signalweg ergibt sich sozusagen eine Signalauskopplung in einen zusätzlichen Effektkanal, und wenn dieser ausreichende Pegel liefert, beginnen Klangveränderungen hörbar zu werden. **Abb. 5.13.2** zeigt an einem Modell eine Signalschleife mit Signalführung in Vorwärtsrichtung (Schalldruck gibt Spannung, \underline{H}_{Up}) und einer Rückführung (Spannung gibt Schall, \underline{H}_{pU}). Die Rückführung enthält 5 Resonanzstellen, im Bild gestrichelt gezeichnet; in der darüber liegenden Kurve ist deren Auswirkung auf den Gesamtfrequenzgang zu sehen. Man erkennt, dass bei einer maximalen Schleifenverstärkung von 0,1 ($\hat{=} -20$ dB) kein hörbarer Effekt auftritt, während bei nur 5 dB Schleifendämpfung (entspr. -5 dB Verstärkung) schon ein deutlicher Effekt entsteht. Wie deutlich hörbar sich die Resonanz im Einzelfall auswirkt, kann allerdings nicht pauschal bestimmt werden, da in dem entsprechenden Frequenzbereich natürlich genügend Signalenergie vorhanden sein muss – womit wieder Raum für Spekulationen verbleibt.

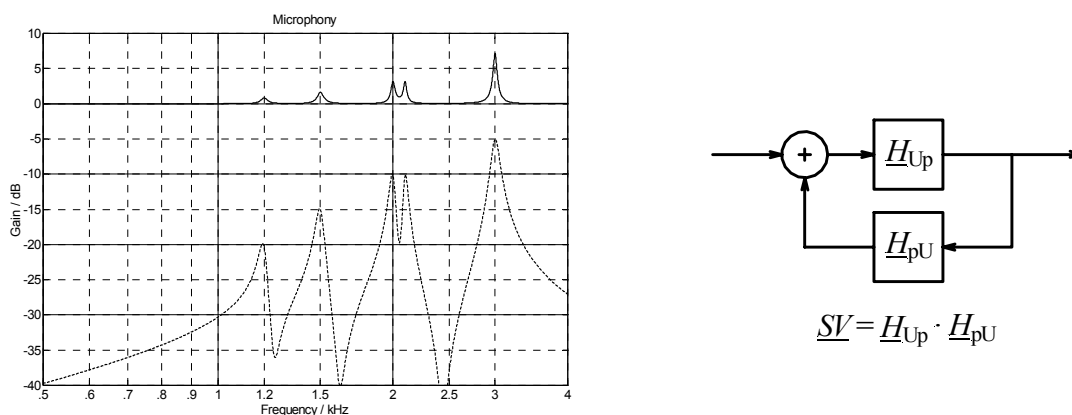


Abb. 5.13.2: Modell einer Signalschleife, und Auswirkungen von Resonanzen auf die Gesamtübertragung. Die Schleifenverstärkung \underline{SV} ist das Produkt von Vorwärts- und Rückwärtsverstärkung.

Um zumindest ungefähre Daten von üblichen Betriebsbedingungen zu erhalten, wurde ein Gitarrenverstärker (**VOX AD-60-VT**) im reflexionsarmen Raum analysiert. Ein Gitarrist hatte den Verstärker so eingestellt, dass sich mit einer Les Paul (Historic Collection) ein "leicht angezerrter, crunchiger Sound" ergab; hierbei waren alle Vox-Effekte deaktiviert. Ein Messmikrofon (B&K 4190) erfasste 1 m vor dem eingebauten Lautsprecher den Schall, der bei Ansteuerung mit $1 \text{ mV}_{\text{eff}}$ (Input: "High") entstand (**Abb. 5.13.3**). Bei 2,5 kHz wird gerade 1 Pa erzeugt (94 dB SPL), bei einer Spannungsverstärkung von ca. 500 (54 dB). Der Spannung-Schalldruck-Übertragungskoeffizient beträgt für 2,5 kHz $H_{pU} = 1 \text{ Pa/mV}$. Zusammen mit dem in Abb. 5.13.1 beschriebenen Duncan APTR-1, dessen 2,5-kHz-Zacke fast an $H_{Up} = 1 \text{ mV/Pa}$ heranreicht, würde die Schwingbedingung ($H_{Up} \cdot H_{Pu} = 1$) schon fast erfüllt. Fairerweise muss nochmals erwähnt werden, dass das in diesem Tonabnehmer enthaltene Wachs entfernt worden war – mit Wachs wäre die Luftschallempfindlichkeit geringer.

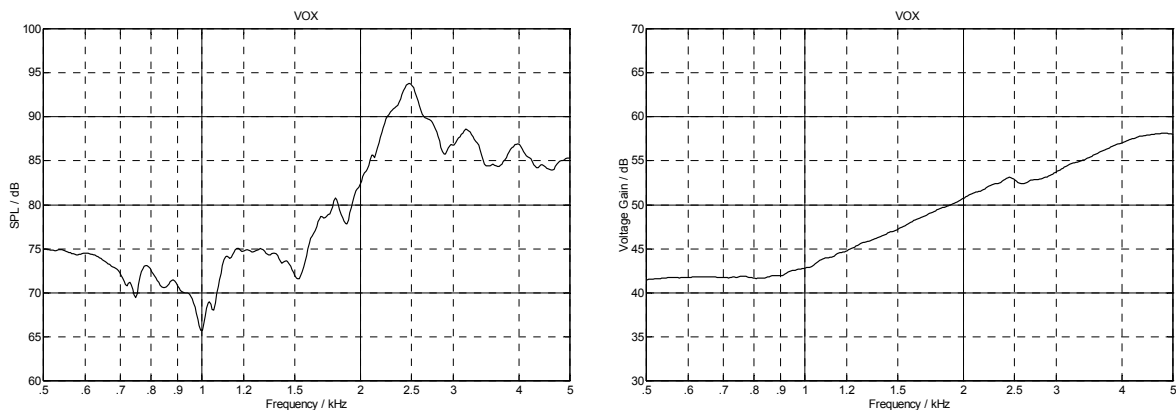


Abb. 5.13.3: Mit 1mV in 1m Abstand erzeugter SPL (links), Verstärkungsmaß bis zum Lautsprecher (rechts).

Die Luftschallempfindlichkeit der o.g. Les Paul wurde ebenfalls im reflexionsarmen Raum ermittelt: **Abb. 5.13.4**. Hierzu wurden alle Saiten entfernt und die Gitarre 1 m vor einem Hornlautsprecher aufgestellt. Die Gitarre war mit 670 pF (Kabel) und 1 M Ω (Verstärker) belastet, alle Gitarrenregler ("Steller") waren voll aufgedreht. Für den etwas sensibleren Steg-Tonabnehmer (**Gibson BurstBucker #2**) zeigt sich eine maximale Luftschallempfindlichkeit von knapp 0,1 mV/Pa (der Hals-Tonabnehmer war 5 dB unempfindlicher). Rückkopplungspfeifen tritt hier sicher noch nicht auf, die geringste Schleifendämpfung beträgt 27 dB. Klangbeeinflussungen sind aus demselben Grund aber auch nicht zu erwarten! (Vergl. Abb. 5.13.2).

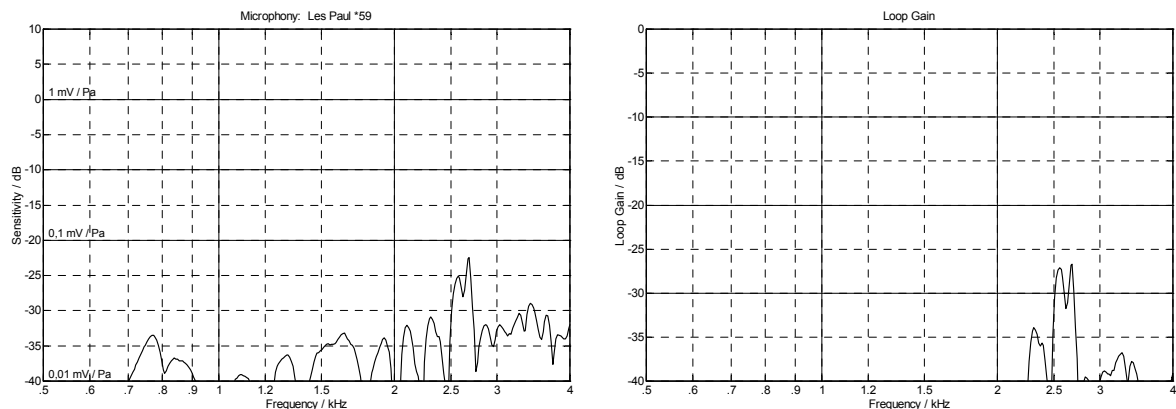


Abb. 5.13.4: Gibson Les Paul '59: Luftschallübertragungsmaß (links), Schleifenverstärkungsmaß (rechts).

Erhöht man die Verstärkung um 6 dB (gegenüber Abb. 5.13.3), entsteht bei normalem Spiel schon ein erheblich verzerrter Gitarrenton, gut brauchbar für *Lead-Sounds a la Beano Blues-Breaker**. Maximale Schleifendämpfung 21 dB, also immer noch gut im grünen Bereich. Erst wenn man am VOX alle drei Lautstärkepotis (Gain, Volume, Master) bis zum Anschlag aufdreht, was gegenüber Abb. 5.13.3 zusätzliche 26 dB bedeutet, produziert die Anlage nur mehr schrille Pfeiftöne. Hierbei ist es ziemlich egal, wo genau man sich hinstellt – Mission impossible. Man müsste schon die Gitarre aus dem Raum tragen – oder auf den Hals-Tonabnehmer umschalten: Dessen etwas geringere Luftschallempfindlichkeit[♦] ermöglicht es dem Gitarrist, ein paar rückkopplungsfreie Positionen zu finden. Aus Sicht eines konservativen Musikers ist der dann produzierte Klangbrei aber nicht wirklich erstrebenswert. Obwohl: Jetzt, sagt die Regelungstechnik, wirken sich die Gehäuseresonanzen auf den Gesamtfrequenzgang aus.

Aus den durchgeführten Messungen lassen sich die folgenden **Ergebnisse** ableiten:

1) Gut bedämpfte Metallgehäuse verändern durch ihre Resonanzen die Tonabnehmer-Übertragungscharakteristik bei verzerrungsfreier Wiedergabe (Clean Sound, Bühnenlautstärke) gar nicht. (Dass ein Gehäuse Wirbelstromdämpfungen erzeugt, wird hier nicht berücksichtigt, → Kap. 5.9.2.2). Selbst bei "normaler Verzerrung" haben sie keine Auswirkungen auf den Klang. Bei extremer Verstärkung (ultra-distortion) sind Auswirkungen vorstellbar, allerdings: Ein völlig verzerrter Gitarrenton ist nicht direkt prädestiniert, um subtile Klangunterschiede herauszuhören.

2) Gehäuse mit schwach bedämpften Resonanzen können sich – je nach Verstärkung – klangformend auswirken. Ein Auftritt mit derartigen Heulbojen gleicht aber dem Ritt auf der Kanonenkugel: Man weiß nie, wann die Sache hochgeht. Ist die Schleifendämpfung groß genug, merkt man nichts von den Gehäuseresonanzen, sobald sie aber hörbar werden, ist auch die Grenze zum Rückkopplungspfeifen in unmittelbarer Nähe. Dies gilt in verschärfter Form natürlich auch für Halb- oder Vollresonanzgitarren: Ihre Luftschallempfindlichkeit ist noch größer als die eines schlecht bedämpften Tonabnehmers. Einige Gitarristen suchen nun gerade diese Grenzsituation, und haben es im Kampf mit den ungezügelter Resonanzen zu wahrer Meisterschaft gebracht. Wenn also einer speziellen Gitarre ein besonderer, einzigartiger Klang nachgesagt wird, der seine Ursache in speziellen Tonabnehmerresonanzen haben soll: Unmöglich ist dies aus Sicht der Physik nicht. Alle vergossenen Tonabnehmer (mit einer Ausnahme: Gibson Tony Iommi) zeigten beim Öffnen des Gehäuses, dass die Wachsverteilung im Inneren – nun, wie sagt man da anwaltsicher – vielleicht: Dass die Wachsverteilung nach künstlerischen Gesichtspunkten erfolgt war. Und somit ist diesbezüglich jede Gitarre ein Unikat. Aber das wussten wir auch ohne Physik.

Der Rest ist Geschmackssache. *These: "Die Pickup-Kappen addieren auch eine material-spezifische Resonanz in den Sound. Wer diesen kehligen und nasalen PAF-Sound (Allman Brothers oder gar Peter Green) mag, sollte daher unbedingt Kappen verwenden."* [U. Pimper, G&B, 9/2005]. Das ist die eine Seite. *Antithese: "Sie haben vielleicht schon davon gehört, dass ich die Gehäuse von meinen Pickups entferne; die Verbesserung des Sounds ist ungläublich."* [Eric Clapton, in Bacon/Day]. Das ist die andere Seite des Glaubens.

* Im Original war das ein Marshall-Kofferverstärker.

♦ Alle diese Aussagen beziehen sich auf ein spezielles Gitarren-Exemplar.