

5.6 Tonabnehmer-Messgeräte

Wie misst man die elektrischen Tonabnehmer-Parameter? In den meisten Fällen vermutlich mit einem Messgerät, dessen Funktion dem Messenden nicht genau bekannt ist. Gerne verwendet: Sogenannte RLC-Messgeräte, die R (Widerstand), L (Induktivität) und C (Kapazität) messen können. Wäre der Tonabnehmer ein idealer Grundzweipol, könnte man gegen diese Messung nichts einwenden. Grundzweipole bestehen entweder aus einem (ohmschen) Widerstand, oder aus einer idealen Spule, oder aus einem idealen Kondensator. Beim Tonabnehmer wirken aber selbst im einfachsten Ersatzschaltbild alle drei Elemente zusammen, er ist folglich ein zusammengesetzter Zweipol (auch elektrisches Netzwerk genannt).

Im einfachsten Fall bildet man die Tonabnehmerimpedanz durch einen elektrischen Widerstand R nach, der in Reihe zur Wicklungs-Induktivität L geschaltet ist; parallel hierzu liegt die Wicklungs-Kapazität C . Der Widerstand R ist der weiter oben bereits beschriebene Gleichstromwiderstand des aufgewickelten Kupferdrahts, der auch Kupferwiderstand genannt wird. Im Kapitel *Magnetodynamik* wurde erläutert, dass der *Gleichstromwiderstand* einer idealen Induktivität null ist; der *Gleichstromwiderstand* einer Kapazität ist unendlich. Bei $f = 0$ Hz bleibt als Widerstand also tatsächlich nur der Beitrag von R , die anderen beiden Zweipole tragen bei dieser Frequenz nichts bei. Wenn man R messen möchte, sollte man folglich bei 0 Hz messen – eigentlich naheliegend. RLC-Messgeräte messen aber nicht bei 0 Hz, sondern bei einer anderen Frequenz, z.B. 1 kHz. Sie ermitteln dann für R den Realteil der komplexen Impedanz \underline{Z} , und der kann vom Kupferwiderstand abweichen.

Die formale Beschreibung der Impedanz geschieht am einfachsten mithilfe der komplexen Schreibweise [siehe z.B. 18, 20]. Die **komplexe Impedanz** \underline{Z} einer RL -Reihenschaltung (also zunächst ohne Kapazität C) ergibt:

$$\underline{Z} = R + j\omega L \quad \operatorname{Re}(\underline{Z}) = R; \quad \operatorname{Im}(\underline{Z}) = \omega L; \quad \text{komplexe Impedanz}$$

Als Realteil der komplexen Impedanz erhält man R , als Imaginärteil erhält man ωL ; (die imaginäre Einheit j gehört nicht zum Imaginärteil!). Wie man sieht, ist der Realteil von der Frequenz unabhängig, er kann somit *für diesen Zweipol* (!) bei jeder beliebigen Frequenz gemessen werden. Sobald aber eine Kapazität dazukommt, ändert sich diese Situation: Die Kapazität C liegt im einfachen Tonabnehmer-Ersatzschaltbild parallel zur RL -Reihenschaltung. Die komplexe Impedanz \underline{Z} für diese RLC -Schaltung ergibt sich zu:

$$\underline{Z} = \frac{R + pL}{1 + pRC + p^2 LC} = \frac{R + p(L - R^2 C) + p^3 L^2 C}{1 + p^2 (2LC - R^2 C^2) + p^4 L^2 C^2} \quad p = j\omega$$

Zerlegt man diese komplexe Impedanz in eine Summe aus einem Realteil und einem Imaginärteil, so erhält man den Wert, der von einem RLC-Messgerät als Verlust-Widerstand angezeigt wird, wenn eine Spule gemessen werden soll:

$$\operatorname{Re}(\underline{Z}) = \frac{R}{1 - \omega^2 (2LC - R^2 C^2) + \omega^4 L^2 C^2} \quad \text{Realteil der } RLC\text{-Schaltung}$$

Dieser Realteil ist nun nicht mehr konstant, sondern frequenzabhängig! Für Gleichstrom, d.h. für $\omega = 0$, erhält man immer noch den korrekten Gleichstromwiderstand R des Tonabnehmers,

aber für jede andere Frequenz ergibt sich ein abweichender, und damit falscher Wert. Die Abweichungen sind nicht immer dramatisch – sie sollten jedoch vor dem Hintergrund gesehen werden, dass ein 'Experte' z.B. wissen *muss*, dass der 'Texas-Special-Pickup' 6210 Ohm hat, während der 'Vintage-Reissue-Pickup' *nur* 6100 Ohm (d.h. satte 1,8 % weniger!) in die Waagschale wirft. Wobei der Experte hoffentlich auch weiß, dass 1,8 % Widerstandsänderung bereits durch nur 4,5°C Temperaturänderung hervorgerufen werden können ☺. Wie groß nun die messgerätebedingten Unterschiede sind, zeigt **Abb. 5.6.1**: Falls man zum Messen des Stratocaster-Spulenwiderstandes ein RLC-Messgerät verwendet, das bei 1000 Hz misst, erhält man einen Wert, der um 6 % zu groß ist. Was in etwa dem Unterschied zwischen einem '80s-Standard-Pickup' und einem 'Late-60s-Pickup' entspricht. Bei gleicher Temperatur ...

Tonabnehmer mit relativ niedriger Resonanzfrequenz (z.B. Gibson P90) zeigen indes wesentlich größere Abweichungen (Abb. 5.6.1). Auch das Anschließen eines Kabels ändert den Realteil, selbst wenn das **Kabel** als (rein imaginär wirkende) ideale Kapazität definiert wird. Beim P-90-Tonabnehmer bewirkt das Zuschalten eines 600-pF-Kabels, dass bei 1 kHz der Impedanz-Realteil um 40% vergrößert wird.

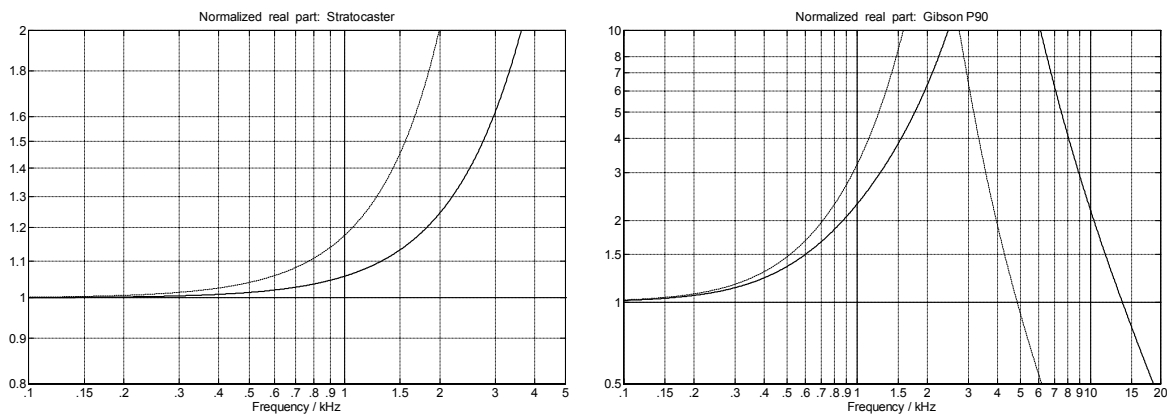
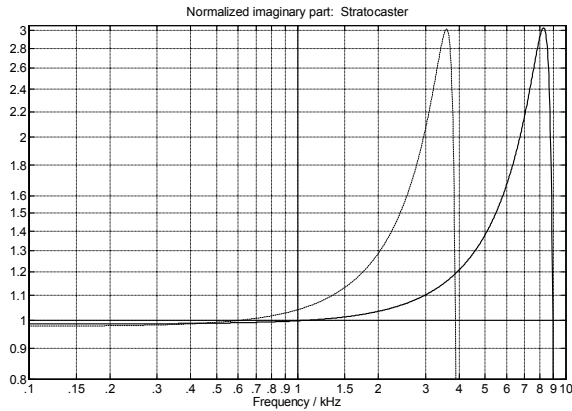


Abb. 5.6.1: Auf R_{Cu} normierter Realteil der Tonabnehmerimpedanz. Links Stratocaster, rechts Gibson P90. Bei $f = 1000\text{Hz}$ weicht der Realteil (ohne Kabel) um 6 % bzw. um 130 % vom 0-Hz-Wert ab (—). Dünne Linien: Mit 600-pF-Kabel. Um Klarheit zu erhalten, bei welcher Frequenz ein Impedanzmessgerät arbeitet, kann die Messfrequenz z.B. während der Messung mit einem Oszilloskop überprüft werden.

Neben dem Gleichstromwiderstand R ist die **Induktivität** L der zweite wichtige elektrische Parameter. Würden beim Tonabnehmer nur R und L zusammenwirken, man könnte L problemlos als Imaginärteil der Impedanz messen – bei jeder Frequenz, außer bei 0 Hz. Die parallel geschaltete Kapazität bewirkt aber, dass unterhalb der Resonanzfrequenz der normierte Imaginärteil ansteigt; oberhalb der Resonanzfrequenz wird er negativ. Ein RLC-Messgerät, das in Stellung "Spule messen" lediglich den durch $2\pi f$ dividierten Imaginärteil der Impedanz als "Induktivität" anzeigt, folgt der in **Abb. 5.6.2** dargestellten Kurve. Bis zu 1000 Hz sind die Abweichungen für den Stratocaster-Tonabnehmer noch gar nicht so groß; für höhere Frequenzen wächst aber der Fehler – wie auch für Tonabnehmer mit niedriger Resonanzfrequenz.

So richtig problematisch werden Induktivitätsmessungen, wenn die Tonabnehmerimpedanz durch mehr als eine Induktivität beschrieben werden müsste. Wie in dem Kapitel über Ersatzschaltbilder gezeigt wird, ist dies vor allem bei nicht zu vernachlässigenden Wirbelstromverlusten der Fall, also z.B. bei Tonabnehmern mit Weicheisen- oder Nickelstiften, oder/und bei metallenen Abschirmhauben. Ganz analog könnte ja auch ein mechanisches System, bei dem drei unabhängige Massen über zwei unabhängige Federn verbunden sind, nicht für Schwingungen jeder Frequenz durch ein und dieselbe Federsteifigkeit beschrieben werden.



Impedanz-Imaginärteil der *RLC*-Schaltung:

$$\text{Im}(\underline{Z}) = \frac{\omega(L - R^2C) - \omega^3 L^2C}{1 - \omega^2(2LC - R^2C^2) + \omega^4 L^2C^2}$$

Abb. 5.6.2: Auf ωL normierter Imaginärteil der Tonabnehmerimpedanz (Stratocaster).
Dünne Linie = zzgl. 600-pF-Kabel.

In so einem Fall bietet sich an, zuerst ein geeignetes **Ersatzschaltbild** zu definieren, und anschließend die Bauteilwerte dieses Ersatzschaltbildes messtechnisch zu ermitteln. *RLC*-Messgeräte gehen diesen Weg ja auch, in einigen Fällen sogar mit Wahlmöglichkeit: Zur Spulenmessung werden dann zwei Ersatzschaltbilder angeboten, eine *RL*-Reihenschaltung, und eine *RL*-Parallelschaltung – die aber untereinander nicht kompatibel sind. Beispielsweise kann die Reihenschaltung aus einem 6861- Ω -Widerstand und einer 2-H-Spule bei 1 kHz als äquivalente Parallelschaltung eines 30-k Ω -Widerstandes und einer 2,6-H-Spule dargestellt werden. Diese Äquivalenz gilt aber nur für 1 kHz; bei jeder anderen Frequenz ergeben sich andere Bauteilwerte. Sowohl die o.a. *RL*-Reihenschaltung, als auch die *RL*-Parallelschaltung sind aber für Tonabnehmer zu einfach; deren Ersatzschaltbild sollte zumindest eine Kapazität enthalten (siehe auch das Kapitel über Ersatzschaltbilder).

Alternativ zur Induktivitäts-Messung mit einem *RLC*-Messgerät kann auch der Frequenzgang des Impedanzbetrages in doppellogarithmischer Darstellung gezeichnet werden. Da die Impedanz über Potenzfunktionen von der Frequenz abhängt, ergeben sich hierbei abschnittsweise durch Geraden approximierbare Verläufe. Sagt die Bode-Theorie. Allerdings nur für einfache Netzwerke wie z.B. eine *RL*-Reihenschaltung (**Abb. 5.6.3**). Sagt der Autor.

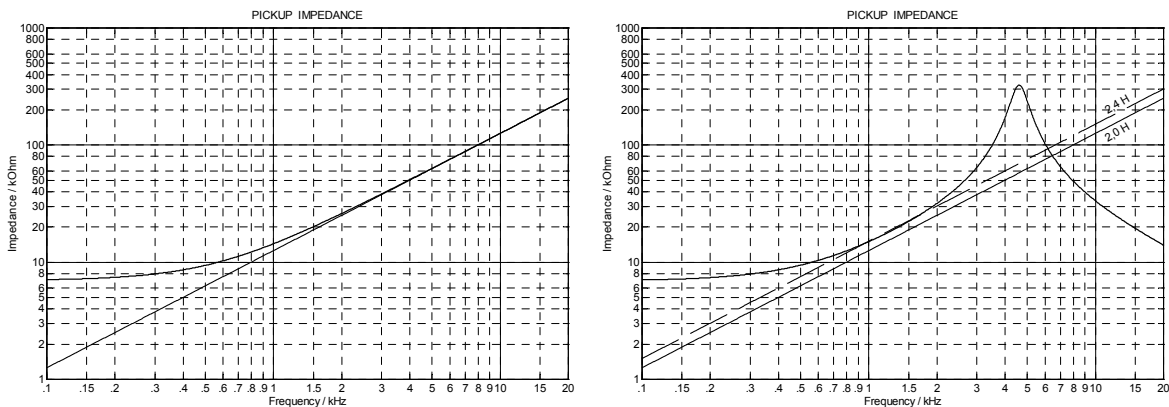


Abb. 5.6.3: Betrag der Impedanz einer *RL*-Reihenschaltung (links), bzw. eines *RLCR*-Ersatzschaltbildes (rechts).

In **Abb. 5.6.3** ist im linken Bild der Impedanz-Betragsfrequenzgang einer *RL*-Reihenschaltung gezeichnet ($R = 7 \text{ k}\Omega$, $L = 2 \text{ H}$). Die Kurve nähert sich für tiefe Frequenzen einer horizontalen Geraden ($Z = 7 \text{ k}\Omega$), zu hohen Frequenzen hin erfolgt ein Anstieg gemäß der schräg eingezeichneten Geraden ($Z = 2\pi fL$). Die Induktivität L ist bei dieser Messung grafisch bestimmbar: Hierzu verschiebt man die schräge Näherungsgerade so, dass sie bei hohen Frequenzen bestmöglich den Messkurvenverlauf approximiert; der Proportionalitätskoeffizient L

dieser Geradengleichung ist die gesuchte Induktivität. Sobald aber eine Kapazität C (600 pF) und ein parallel liegender Dämpfungswiderstand R_p (1 M Ω) hinzukommen, ist diese hochfrequente Näherung nicht mehr möglich (Abb. 5.6.3 rechts). Man kann die Approximation bei mittleren Frequenzen versuchen (z.B. 1,5 kHz), wird aber einen ca. 20% zu großen Wert für die Induktivität bekommen. Dies ist kein dramatischer Fehler – es kommt immer auf die gewünschte Messgenauigkeit an. DUCHOSSOIR spezifiziert z.B. *Late-60s-Strat*: 2,2 H, *Vintage-Reissue*: 2,3 H, *1980s-Standard*: 2,37 H, *Texas-Special-Neck*: 2,47 H, *Texas-Special-middle*: 2,50 H. Wenn derart kleine Unterschiede (– so sie denn überhaupt signifikant sind) gemessen werden sollen, wären 20% Messfehler inakzeptabel. Sicherheitshalber wird darauf hingewiesen, dass eine Schnittpunktbestimmung mit der bei hohen Frequenzen abfallenden (kapazitiv bedingten) Geraden auch nur theoretisch eine Verbesserung bringt: In der Praxis findet man oberhalb von 10 kHz parasitäre Störeffekte, die den theoretisch erwarteten $1/f$ -Abfall verfälschen.

Die Messung der **Tonabnehmergüte** Q ist mit einem RLC-Messgerät noch irreführender als die Messung von R und L . Hierbei wird nämlich die **Spulengüte** Q_L gemessen, ein frequenzabhängiger Parameter: $Q_L = 2\pi fL/R$. DUCHOSSOIR setzt in seinen Fender-Büchern über die Stratocaster bzw. Telecaster für die Frequenz relativ willkürlich $f = 1000$ Hz. Zur Erläuterung schreibt er: *Ein Tonabnehmer mit einem größeren Q betont ein schmäleres Frequenzband, und umgekehrt hebt ein Tonabnehmer mit einem kleineren Q ein breiteres Frequenzband an.* Diese Aussage wäre zutreffend, wenn mit Q die Resonanzgüte gemeint wäre; aufgelistet sind bei DUCHOSSOIR aber nicht Resonanzgüten, sondern Spulengüten. Und deren Einfluss auf die Resonanzüberhöhung ist nicht als einfache Funktion darstellbar. Abb. 5.5.9 zeigt, dass Änderungen der Spulengüte Q_L nur geringe Auswirkungen auf die Resonanzüberhöhung haben. Ändert man aber R und L gleichartig, z.B. beide um +50%, so bleibt hierbei Q_L konstant; trotzdem sinkt die Resonanzüberhöhung bei der Stratocaster in diesem Fall um ca. 2 dB.

Als abschließendes Beispiel wird ein Tonabnehmer aus einer **Gretsch** Tennesseean untersucht. Sein Gleichstromwiderstand beträgt 3260 Ω , eine Impedanzmessung bei 1 kHz ergibt aber 7155 Ω in Reihe mit 1,2 H. Eine aus diesen beiden Bauteilen aufgebaute Ersatzschaltung zeigt bei 1 kHz tatsächlich dieselbe Impedanz (**Abb. 5.6.4**), offenbart bei anderen Frequenzen aber gravierende Unterschiede.

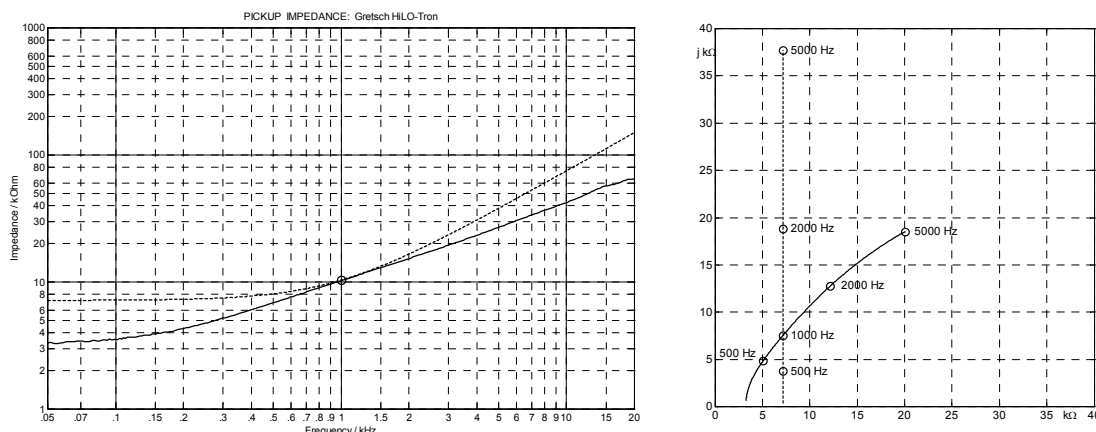


Abb. 5.6.4: Gemessener Impedanzbetrag eines Gretsch-Tonabnehmers (—). Ein RL-Messgerät mit 1000 Hz Messfrequenz zeigt 7155 Ω und 1,2 H an, Messungen an einer derartigen RL-Reihenschaltung (----) offenbaren aber gravierende Unterschiede. Im rechten Bild ist die Impedanz-Ortskurve dargestellt (50 – 5000 Hz). Ursache dieser großen Abweichungen ist die starke Wirbelstromdämpfung dieses speziellen Tonabnehmers.