

11.2 Elektrische Zweipolcharakteristik

Jeder Lautsprecher ist ein elektroakustischer Wandler, d.h. ein Zweitor mit einem elektrischen und einem akustischen Tor [3]. Das elektrische Tor, also die beiden Anschlussklemmen, stellt einen relativ einfachen komplexen elektrischen Widerstand dar, der durch seine **Impedanz Z** beschrieben werden kann. In grober Näherung besteht Z aus der Reihenschaltung eines reellen Widerstandes R und eines imaginären Spulenwiderstandes pL , mit Induktivität L und imaginärer Frequenz $p = j\omega$. Beide Komponenten ergeben sich aus der **Schwingspule**, einem zylinderförmig aufgewickelten Kupfer- oder Aluminiumdraht, der im Luftspalt eines starken Magneten für die Antriebskraft der Membran sorgt. Die Membranbewegung bewirkt aber, dass in der Schwingspule eine (zusätzliche) Spannung induziert wird, und deshalb müssen in einem genaueren Modell auch die auf die elektrische Seite transformierten mechanischen Elemente berücksichtigt werden. Membranbewegung und -auslenkung sind ja Faktoren mechanischer Energie, die nicht aus dem Nichts, sondern nur von der elektrischen Seite des Wandlers kommen kann – deshalb müssen diese auch als Größen der elektrischen Impedanz erscheinen [3].

Das einfachste Wandler-Ersatzschaltbild berücksichtigt auf der mechanische Seite eine Masse (Membran incl. Aufhängung und Schwingspule), eine Feder (Membranaufhängung), sowie einen Reibwiderstand, der die durch Verformungen von Membran und -aufhängung entstehenden Energieverluste nachbildet; die Belastung durch die Strahlungsimpedanz kann im einfachen Zweipol-Modell vernachlässigt werden. **Abb. 11.6** zeigt den Impedanzfrequenzgang zweier typischer, nicht eingebauter 12"-Gitarrenlautsprecher.

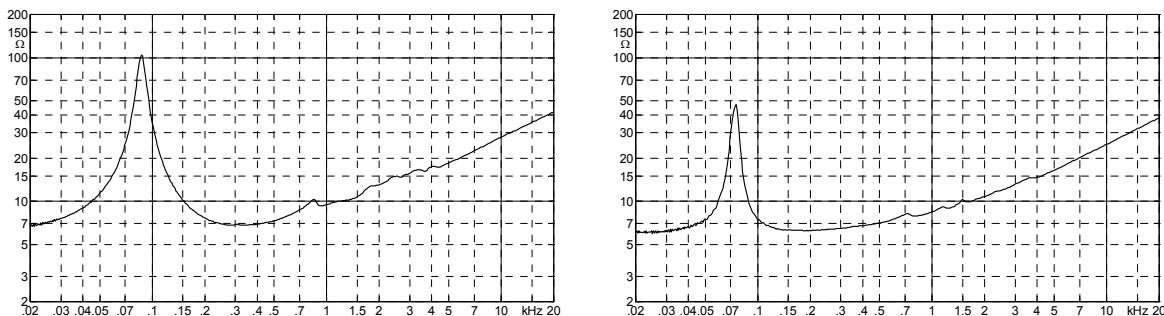


Abb. 11.6: Betragfrequenzgang der elektrischen Impedanz; links: Celestion blue, rechts: Eminence L122.

Beide Frequenzgänge weisen tieffrequent ein charakteristisches Maximum auf: Hier bildet die Masse m zusammen mit der Federsteifigkeit s eine schnelle-Resonanz, die über die Wandler-Kopplung ($U = \alpha v$, [3]) eine große Gegenspannung erzeugt – der Strom nimmt ab, der Lautsprecher ist bei dieser Frequenz hochohmig. Bei den meisten Gitarren-Lautsprechern liegt diese Resonanz zwischen 70 und 110 Hz; bei Bass-Lautsprechern auch noch etwas tiefer. Aus dem Impedanzanstieg bei hohen Frequenzen erkennt man die induktive Komponente der Schwingspule, allerdings nicht in einfacher, frequenzproportionaler Art, sondern flacher. Die Schwingspulen-Induktivität wird nämlich zum wesentlichen Teil vom Magnetkreis verursacht, und darin fließen induzierte Wirbelströme, die eine \sqrt{f} -Charakteristik bewirken. Aus diesem Grund kann bei genauer Modellierung der induktive Anstieg nicht mit einer einzigen Induktivität nachgebildet werden, vielmehr ist ein RL-Netzwerk erforderlich. Bei geringen Anforderungen reicht allerdings eine Induktivität, die häufig mit ca. 1 mH angesetzt wird. Die kleinen Impedanzschwankungen um 1 kHz kommen von Partialschwingungen der Membran, also stehenden Wellen, die dafür sorgen, dass die Membran nicht mehr formstarr schwingt. Bei HiFi-Lautsprechern versucht man dieses Verhalten zu vermeiden, bei Gitarren-Lautsprechern ist es nicht unerwünscht.

In **Abb. 11.7** ist eine Ersatzschaltung für eine Lautsprecherimpedanz dargestellt. Der mit R_{Cu} bezeichnete Widerstand steht für den ohmschen Schwingspulenwiderstand, das LR-Array bewirkt den hochfrequenten Impedanzanstieg, und der Parallelschwingkreis bildet die drei mechanischen Membranelemente nach. Bei Bedarf kann die Schaltung ohne großen Aufwand erweitert oder modifiziert werden. Bei Resonanz ist die Impedanz des mechanischen Membran-Resonators reell (W), sie wird mit $(Bl)^2$ in den entsprechenden reellen Widerstand des Parallelschwingkreises abgebildet: $R_W = (Bl)^2 / W$. Hierbei ist Bl die Wandlerkonstante, gebildet aus der Magnetflussdichte B und der Schwingspulen-Drahtlänge l . Das Resonanzmaximum der Lautsprecherimpedanz wird somit vor allem von zwei Parametern bestimmt: Der Membranbedämpfung, und der Wandlerkonstante. Aus diesem Grund findet man große Resonanzwiderstände häufig bei Lautsprechern mit starken Magneten.

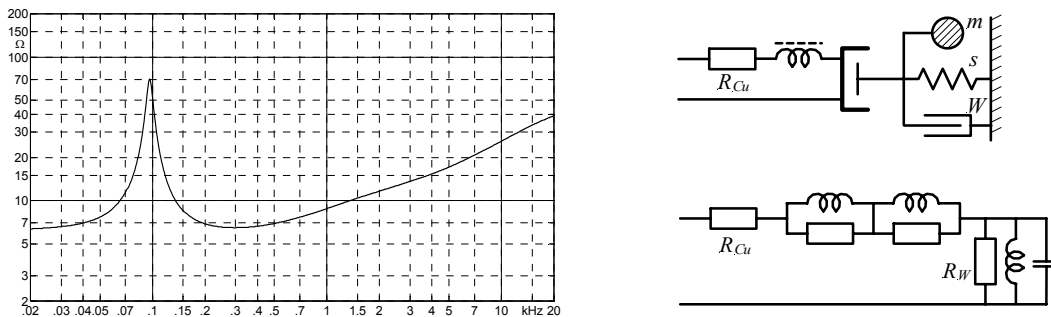


Abb. 11.7: Impedanz-Frequenzgang und Schaltbild einer Lautsprecher-Ersatzschaltung [3].

Es wurde schon erwähnt, dass die Membranbewegung eine Gegenspannung induziert, und deshalb muss in einem genaueren Modell der mechanischen Impedanz, und hier insbesondere der Strahlungsimpedanz, größere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Tieffrequent ist die Membran hauptsächlich durch eine **mitschwingende Luftmasse** belastet, die beim (ohne Schallwand betriebenen) 12"-Lautsprecher ungefähr 7 g ausmacht. Nicht viel, aber in Relation zur Membranmasse (20 – 50 g) beachtlich. Ändert man die Einbaubedingung, ändert sich diese Luftmasse, und verstimmt die Resonanz (**Abb. 11.8**). Wenn man nur eine Schallwand hinzufügt, ist dieser Effekt wenig ausgeprägt (die Luftmasse verdoppelt sich in etwa); baut man den Lautsprecher aber in ein **Gehäuse** ein, ändert sich die Impedanz wesentlich. Natürlich ändert sich hierbei nicht nur die Impedanz – auch das Abstrahlverhalten wird erheblich verändert. Prinzipiell muss jegliche Änderung des elektroakustischen Wirkungsgrades ihr Abbild im elektrischen Impedanzfrequenzgang finden, in der Praxis wird man aber vor allem im hochfrequenten Bereich hiervon nichts mehr bemerken, weil die diesbezüglichen Änderungen der Strahlungsimpedanz klein gegenüber der Membranmasse werden. Und auch der ohmsche Schwingspulenwiderstand sorgt dafür, dass diese kleinen Laständerungen im Impedanzfrequenzgang praktisch nicht mehr zu sehen sind.

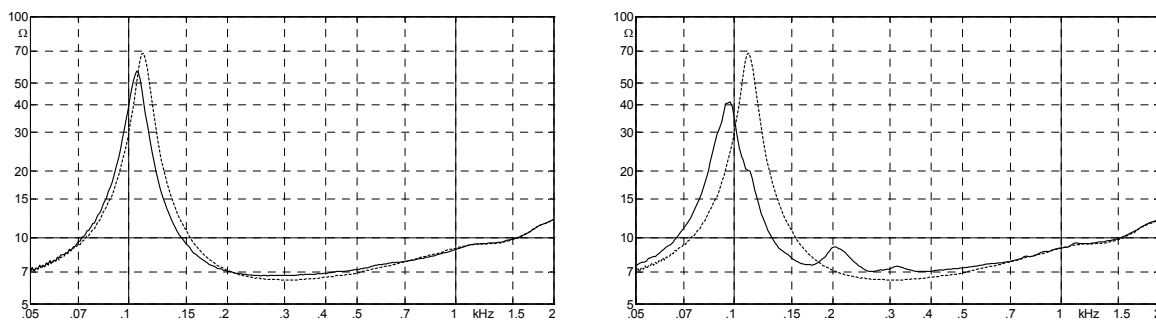


Abb. 11.8: Impedanz: Lautsprecher ohne (----) bzw. mit Schallwand (—); rechts: mit offenem Gehäuse.

Aus dem *elektrischen* Impedanzfrequenzgang lassen sich leicht die wichtigsten Membranparameter ableiten – ohne mechanische Messungen. Der Resonator besitzt mit s und m zwei Freiheitsgrade, mit f_{Res} aber nur eine bekannte Größe. Beim Verstimmen der Resonanz durch das Auflegen einer kleinen Zusatzmasse erhält man aber zwei weitere bekannte Größen, und nur eine zusätzliche Unbekannte – das System ist somit lösbar [3]. Allerdings können sich in der Praxis Schwierigkeiten ergeben, wenn (z.B. wegen einer großen Kalotte) ein relativ großer Massering auf die Membran gelegt werden muss; die zwischen Schwingspule und Zusatzmasse liegende Membransteifigkeit wirkt dann u.U. bereits störend, sodass sich im Impedanzfrequenzgang nicht einfach ein verschobenes Maximum zeigt, sondern zwei Maxima. In diesem Fall muss das Ersatzschaltbild erweitert werden, gegebenenfalls hilft es auch, mit zwei verschiedenen Zusatzmassen zu arbeiten. Typische **Membranmassen** (incl. Luft) liegen beim 12"-Lautsprecher im Bereich 20 – 35 g, typische **Steifigkeiten** (ohne Gehäuse) bei 5000 – 10000 N/m; in Einzelfällen auch etwas darüber.

Um die **Wandlerkonstante** (Bl) zu ermitteln, ist die Messung einer Übertragungsgröße erforderlich. Relativ gut kann die Membranbeschleunigung für $\ddot{x} = g$ ermittelt werden: Übersteigt \ddot{x} die Erdbeschleunigung auch nur geringfügig, beginnen kleine, auf die Membran gelegte Partikel (Sand) zu tanzen. Typische Wandlerkonstanten liegen im Bereich $Bl = 10 - 20 \text{ N/A}$.

Der Gleichstromwiderstand eines 8- Ω -Lautsprechers beträgt, wie die bisherigen Abbildungen zeigen, nicht 8 Ω , sondern weniger: ca. 6 – 7 Ω kann man als handelsüblich annehmen. Bei Zimmertemperatur! Im Betrieb **erwärmt sich die Schwingspule** auf u.U. über 200°C, und damit steigt der Widerstand um bis zu 80%, also z.B. von 6.5 Ω auf bis zu 12 Ω . Wird der Lautsprecher mit Spannungseinprägung betrieben, verringert sich im relevanten Frequenzbereich die Leistungsaufnahme, und entsprechend auch die -abgabe um ca. ein Drittel*! Auch beim nicht gegengekoppelten Röhrenverstärker, der ja eher einer Stromquelle ähnelt, nimmt die Leistungsaufnahme bei Erwärmung ab, wenn der Verstärker an der Aussteuerungsgrenze betrieben wird. Dieses erwärmungsbedingte Leiserwerden hochbelastbarer Lautsprecher ist systemimmanent, unerwünscht, aber unvermeidlich. Bei Keramikmagneten kann noch ein weiterer Effekt hinzukommen: Ihre Flussdichte nimmt mit steigender Temperatur u.U. merklich ab. Alnico-Magnete zeigen dieses Verhalten erst bei Temperaturen, die erheblich über dem Arbeitsbereich eines Gitarrenlautsprechers liegen, ihre Flussdichte ist praktisch temperaturunabhängig.

Es versteht sich von selbst, dass ein Verstärker nicht nur am reellen Nennwiderstand, sondern auch an der komplexen Lautsprecherlast stabil (d.h. ohne HF-Schwingungen) arbeiten muss. Messungen am Verstärkerausgang müssen also nicht deshalb unter echter Lautsprecherbelastung erfolgen, weil sonst Instabilitäten nicht erfasst würden, sondern, weil nur hierbei die typischen Ausgangssignale entstehen. Die elektrische Impedanz eines Lautsprechers ist, egal ob Spannungs- oder Stromeinprägung, für sein Übertragungsverhalten wesentlich. Die vom Verstärker an den Lautsprecher abgegebene Leistung ist von der tatsächlichen Lautsprecherimpedanz abhängig, der Nennwiderstand (z.B. 8 Ω) bietet hier nur einen Orientierungswert. Beim Röhrenverstärker, mit seiner ausgangsseitigen Übertragerkopplung, ergibt sich ein besonders kompliziertes System mit nichtlinear/komplexer Quell- und Lastimpedanz. Tauscht man den Lautsprecher aus, kann es vor allem im Bereich um 100 Hz zu erheblichen Veränderungen des Übertragungsverhaltens kommen, die bereits an der Schnittstelle Ausgangsübertrager/Lautsprecher entstehen. Hinzu kommen dann noch die abstrahlungsbedingten Charakteristika der individuellen Lautsprecher.

* Der genaue Wert hängt vom Netzteil-Innenwiderstand ab

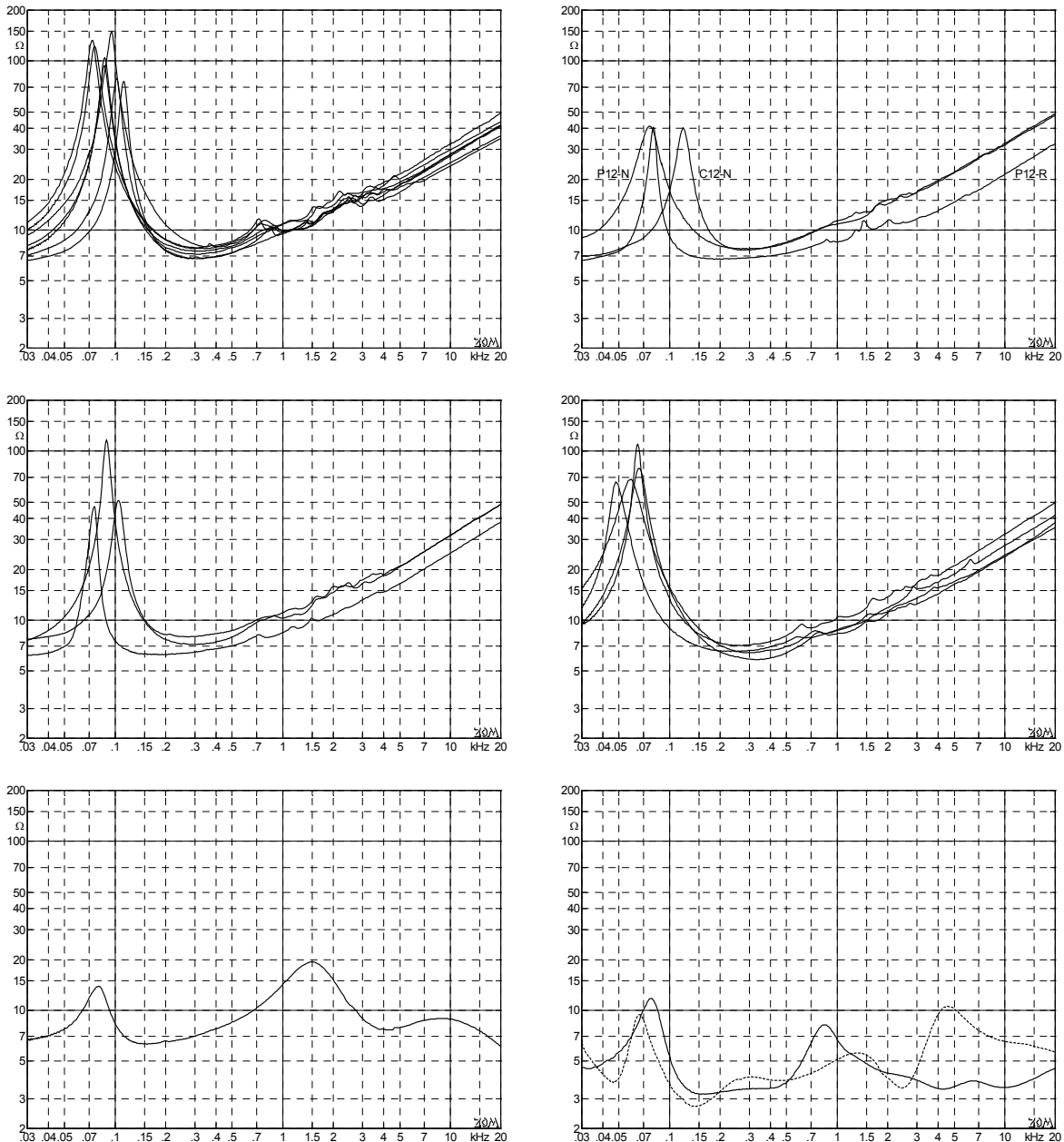


Abb. 11.9: Impedanzfrequenzgänge von 8- Ω -Lautsprechern. Oben links: Celestion, oben rechts: Jensen.
Mitte links: Eminence, Mitte rechts: 12"-Lautsprecher mit Resonanzfrequenzen unter 70 Hz.
Unten links: 2-Weg-Box (Canton, 8 Ω), unten rechts: 3-Weg-Boxen (Canton, 4 Ω).

In **Abb. 11.9** sind die Impedanzfrequenzgänge mehrerer 12"-Lautsprecher dargestellt. Alle Messungen erfolgten im Reflexionsarmen Raum am nicht eingebauten Lautsprecher. Der grundsätzliche Verlauf ist in allen Fällen ähnlich, im Detail sieht man vor allem im Bereich der Hauptresonanz Unterschiede. Die untere Bildzeile zeigt zum Vergleich die Impedanzfrequenzgänge von HiFi-Boxen. Alle diese Impedanzkurven wurden mit kleiner Spannung, d.h. im linearen Bereich, ermittelt. Dass der Strom/Spannungs-Zusammenhang auch nicht-linear sein kann, wird in Kap. 11.6 ausführlicher dargestellt.