

### 10.8.2 Vibrato / Tremolo

Systemtheoretisch betrachtet ist ein Vibrato- bzw. Tremolosystem ein Modulator, d.h. ein System mit zeitvarianten Übertragungseigenschaften, das die Signalamplitude bzw. -frequenz verändert. Seit **Leo Fender** diese Begriffe für seine Gitarren und Verstärker akquirierte, ist aber ein großes Durcheinander entstanden, und bis heute gibt es keine eindeutige Zuordnung zwischen Name und Funktion: Verändert der Vibratoeffekt die Tonhöhe oder die Lautstärke? Fenders Stratocaster, seit 1954 mit US-Patent Nr. 2741146 geschützt, enthält laut Patentschrift ein "*Tremolo Device*" zum Verändern der Tonhöhe. Auch 50 Jahre später wird dieser Begriff in den Fender-Prospekten in diesem Sinn verwendet. Aber: In einem Fender-Service-Manual von 1968 heißt die entsprechende Einheit der Mustang-Gitarre plötzlich *Vibrato* – obwohl auf derselben Seite vom *Tremolo* der Stratocaster und der Bronco die Rede ist. Ähnliches bei den Verstärkern: *Vibrato* steht hier ursprünglich für die Amplitudenmodulation (Lautstärkeänderung), und der *Vibrolux*-Verstärker enthält konsequenterweise eben diese Funktion. Und der *Tremolux*? Auch – der Effekt ist derselbe. Kompliziert? Schon! Denn es gibt sowohl einen Tremolux mit Tremolo-Pedal\*, als auch (später) mit Vibrato-Pedal. Und natürlich einen Vibrolux mit Tremolo-Pedal. Aber auch mit Vibrato-Pedal. Die Schaltung, die diese Effekte erzeugt, ist im Prinzip immer dieselbe: Ursprünglich eine zeitvariante Gittervorspannung, die die Röhrensteilheit und damit den Verstärkungsfaktor veränderte, später der mit Blinklicht beleuchtete Fotowiderstand (LDR) – eben der typische Amplitudenmodulator, im Prospekt zumeist *Vibrato* genannt. Aber nicht immer: Im Princeton-Reverb (mit Vibrato-Pedal) nennt der Fender-Prospekt (1968) den eingebauten Amplitudenmodulator: Tremolo.

Jedoch hatte Fender nicht nur diesen einen Modulations-Effekt im Angebot: 1959 erhielt der **Vibrasonic**-Verstärker eine spezielle Schaltung, die eine Mischung aus AM und FM erzeugte. Im mittleren Frequenzbereich vor allem FM, im Höhen- und Tiefenbereich eine gegenläufige AM: Wenn die Höhen lauter werden, werden die Tiefen leiser, und umgekehrt. Dieselbe Schaltung findet man Anfangs der 60er-Jahre auch im Concert, Bandmaster, Pro und Super, und leicht modifiziert im Showman und Twin. Aber nur für kurze Zeit, dann wurde sie durch den LDR-Amplitudenmodulator abgelöst. Mit einer Ausnahme heißen all diese Effekte bei Fender immer "*Vibrato*", nur beim Princeton Reverb heißt derselbe Effekt "*Tremolo*".

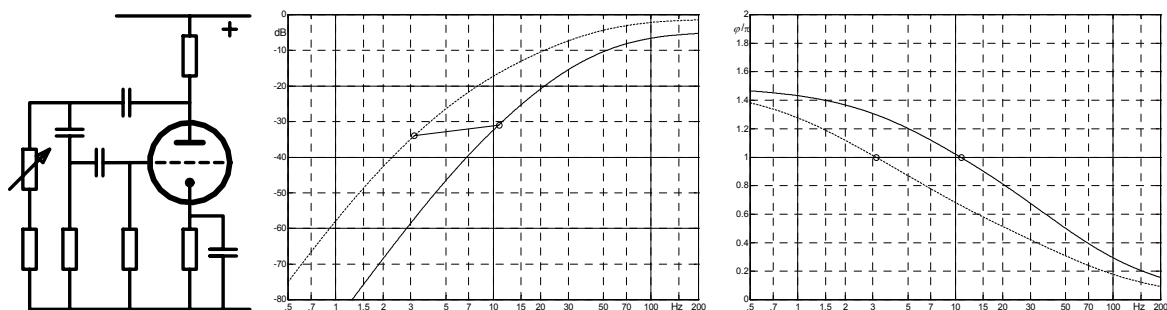
**Fazit:** Bei Fender steht Tremolo häufig (aber nicht immer) für Frequenzmodulation (FM), und Vibrato häufig (aber nicht immer) für Amplitudenmodulation (AM). Die klassische Definition lautet hingegen genau anders herum: Tremolo = AM, und Vibrato = FM.

Wie unterscheiden sich die beiden Effekte in der **Hörwahrnehmung**? Erstaunlicherweise gar nicht so stark, solange man keine allzu großen Modulationen erzeugt. Ein Grund hierfür ist, dass eine reine FM bei der typischen Wiedergabe gar nicht entstehen kann: Durch selektive Resonanzen im Lautsprecher und vor allem im Wiedergaberaum erzeugt eine FM auch immer eine zusätzliche AM [z.B. 3], die (bei kleinem Modulationsindex) vom Gehör vielleicht sogar noch eher entdeckt wird als die FM. Eine FM mit großem Modulationsindex zu erzeugen ist schwierig, das geht bei der AM viel einfacher – vielleicht ein Grund, warum sich Fender Anfang der 60er-Jahre von der FM verabschiedete und alle Verstärker mit dem preiswerten und leistungsfähigen LDR-Modulator ausrüstete. Die folgenden Schaltungsbeschreibungen orientieren sich vor allem an den gut dokumentierten und richtungsweisenden Fenderverstärkern, wohl wissend, dass auch andere Hersteller Vibrato-/Tremoloschaltungen entwickelt hatten und mit Erfolg vermarkteten.

---

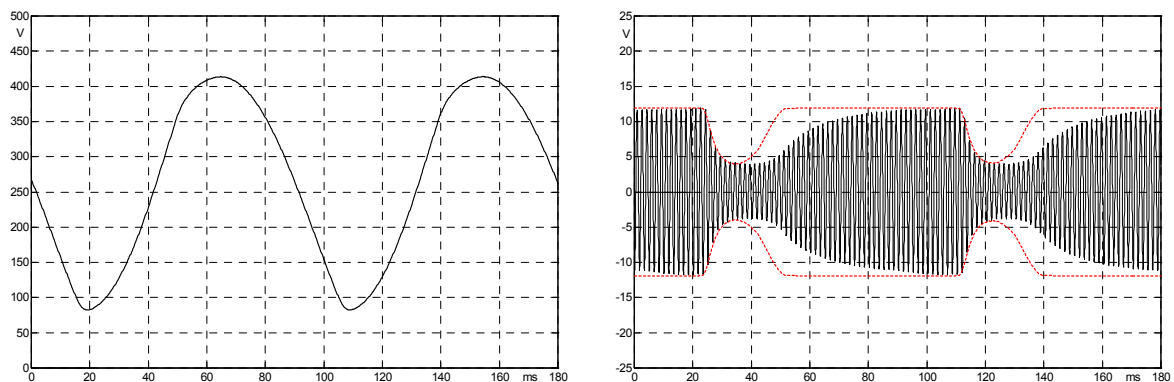
\* Bezeichnung beim Fußschalter-Anschluss

Beim typischen Röhrenverstärker erzeugt eine Triode das niederfrequente Generatorsignal (**LFO** = Low Frequency Oscillator), die eigentliche Modulation entsteht in einer weiteren Röhre (u.U. auch in mehreren), oder im **LDR** (Light Depending Resistor). Der Generator ist relativ einfach aufgebaut: Röhre in Kathoden-Basis-Schaltung mit frequenzabhängiger Rückkopplung. Vom Gitter zur Anode invertiert die Röhre, deshalb muss der Rückkoppelzweig ebenfalls invertieren; beide Inversionen ergeben zusammen eine Phasendrehung um  $2\pi$ , eine Voraussetzung für Selbsterregung. Außerdem muss der Betrag der Schleifenverstärkung  $> 1$  sein, was mit einer Triode leicht erreichbar ist. **Abb. 10.8.12** zeigt eine häufig verwendete Schaltung (Fender, VOX, u.v.a.). Der Rückkoppelzweig ist hierbei ein Hochpass dritter Ordnung, bei dem ein Widerstand einstellbar ist; hiermit kann die Schwingfrequenz zwischen ca. 3 Hz und 11 Hz variiert werden. Da keine Amplitudenregelung stattfindet, entsteht keine perfekte Sinusschwingung – das System ist nichtlinear, und streng genommen existiert damit gar keine Übertragungsfunktion. Das sollte allerdings nicht als Problem angesehen werden, die mit dem linearen Modell erreichbare Näherung ist vollkommen praxisgerecht.



**Abb. 10.8.12:** LFO-Schaltung beim Röhrenverstärker, Betrag- und Phasengang des Rückkopplungs-Netzwerkes.

Ab ungefähr 1963 wurde bei Fender-Verstärkern ein von einer **Glimmlampe** intermittierend beleuchteter **LDR** als Amplitudenmodulator eingesetzt. Das hierfür erforderliche Steuersignal wird der o.a. Schaltung hochohmig entnommen und über die zweite Hälfte der Doppeltriode (ECC 83) der Glimmlampe zugeführt. Bedingt durch den Arbeitspunkt dieser zweiten Triode fließt nur während eines relativ kurzen Abschnitts der LFO-Periode ein wesentlicher Strom durch die Glimmpampe, sie blinkt deshalb nur kurz auf. Der Widerstand des LDRs erniedrigt sich bei Beleuchtung und bewirkt dadurch im Querzweig eines Spannungsteilers eine Signal-Abschwächung (**Abb. 10.8.13**). Durch die relativ lange Erholzeit des LDRs kommt es zu erheblichen Verschleifungen der Hüllkurve, was für den Höreindruck aber eher förderlich ist.



**Abb. 10.8.13:** LDR-Modulator. LFO-Signal an der Anode der Oszillatrorröhre (links), vom LDR modulierter 600-Hz-Sinuston (rechts). Gestrichelt ist die Wirkung eines trägheitsfreien Modulators eingezeichnet.

Vor der LDR-Ära kamen bei Fender Röhrenmodulatoren zum Einsatz, wobei drei Schaltungstypen zu unterscheiden sind: Schirmgittermodulation in den Endröhren, Modulation im Phaseninverter, und bei Eintakt-Endstufen: Modulation in der Zwischenverstärkerröhre. Die Amplitudenmodulation wird einfach durch das Verschieben des Arbeitspunktes erreicht: Durch Überlagerung (Addition) einer sehr niederfrequenten Wechselspannung wird der Arbeitspunkt periodisch in die Randbereiche der Kennlinie verschoben. Hier ist die Kennliniensteigung, und damit auch die Signalverstärkung, kleiner als in der Kennlinienmitte, die Verstärkung wird somit zeitvariant. Dass hiermit auch nichtlineare Signalverzerrungen einhergehen, könnte man als Zusatzeffekt akzeptieren, dass gleichzeitig aber (auch ohne Gitarrensignal) ein niederfrequentes Störsignal entsteht, erfordert den Einbau zusätzlicher Hochpassfilter. Eleganter ist die Einkopplung in Gegentaktendstufen: Da der Ausgangsübertrager die Differenz der Gegentaktensignale bildet, fallen (wie bei jedem Differenzverstärker) Gleichtaktensignale weg – das LFO-Signal muss folglich gleichphasig in die beiden Hälften der Gegentaktendstufe eingespeist werden, das Gitarrensignal gegenphasig. Damit wird das Gitarrensignal verdoppelt, das LFO-Signal ausgelöscht.

Die "letzte Möglichkeit" zu einer derartigen Arbeitspunktverschiebung bietet sich bei den **Steuergitterspannungen\*** der Endröhren an (z.B. Tremolux 5G9). Verschiebt man beide Gitterspannungen synchron ins Negative, sperren beide Röhren, und das Audiosignal wird abgeschwächt. Offenbar wurde diese (gleich bei mehreren Fender-Verstärkern anzutreffende) Endröhrensteuerung als überlegen angesehen: Sie löste die ein paar Jahre vorher eingeführte **Treibersteuerung** ab (z.B. Tremolux 5E9-A), bei der das LFO-Signal in die Kathode des Phaseninverters eingespeist wird. In beiden Fällen entsteht (idealisiert) eine gleichphasige Ansteuerung eines Differenzverstärkers, die kein LFO-Signal im Lautsprecher erzeugen darf.

Bei Fenders Vibro-Champ (AA764) versagt diese LFO-Kompensation allerdings, er hat eine Eintakt-Endstufe. Bei ihm gelangt das LFO-Signal auf die **Kathode der Treiberröhre**, und wird mit dem Gitarrensignal als tieffrequentes Störsignal verstärkt – der direkt vor der Endröhre sitzende Hochpass hilft da nur bedingt.

Im Gegensatz zu den o.a. Amplitudenmodulatoren ist die um 1959 erstmals im **Vibrasonic** eingesetzte AM/FM-Schaltung nicht auf den ersten Blick zu verstehen. Hier durchläuft das Gitarrensignal eine **Frequenzweiche**, die es in einen Tiefpass- und einen Hochpasszweig<sup>♥</sup> aufteilt. Beide Signalzweige werden vom LFO gegenläufig amplitudenmoduliert, sodass die Verstärker-Übertragungscharakteristik zwischen Hoch- und Tiefpass wechselt. Die Folge sind vor allem Änderungen in den Teiltonlautstärken, aber (in geringem Maße) auch Phasen- und damit Tonhöhenänderungen. Die Momentan-Kreisfrequenz  $\omega$  ist ja das zeitliche Differential des Phasenwinkels  $\varphi$  [3]. Da ein Hochpass erster Ordnung die Signalphase um bis zu  $90^\circ$  dreht, und ein Tiefpass erster Ordnung bis zu  $-90^\circ$ , entstehen beim Wechsel von Hoch- auf Tiefpassfilterung Phasendrehungen, die bei der fendertypischen Schaltung maximal ca.  $120^\circ$  betragen. Hiermit lassen sich Frequenzmodulationen bis zu einem Frequenzhub von ungefähr  $\pm 10$  Hz erzeugen, die zu durchaus wahrnehmbaren Tonhöhenänderungen führen können: Die Schwelle für eben wahrnehmbare Frequenzänderungen liegt für FM-Töne bei ca.  $\pm 2$  Hz [12]. In **Abb. 10.8.14** sind Betrags- und Phasengänge der Vibrasonic-Schaltung (5G13) dargestellt, das Schaltbild zeigt **Abb. 10.8.15**. Bei später gebauten Geräten (z.B. 6G13-A) entfiel der resistive Spannungsteiler im Hochpasszweig, der hierdurch ca. 7 dB gewinnt.

\* Grundsätzlich könnte man auch die Schirmgitterspannungen der Endröhren verändern, hierfür wäre aber eine höhere Steuerleistung nötig.

♥ Streng genommen Hochpass und Bandpass, die Bandpassmittenfrequenz liegt aber mit ca. 60 Hz sehr tief.

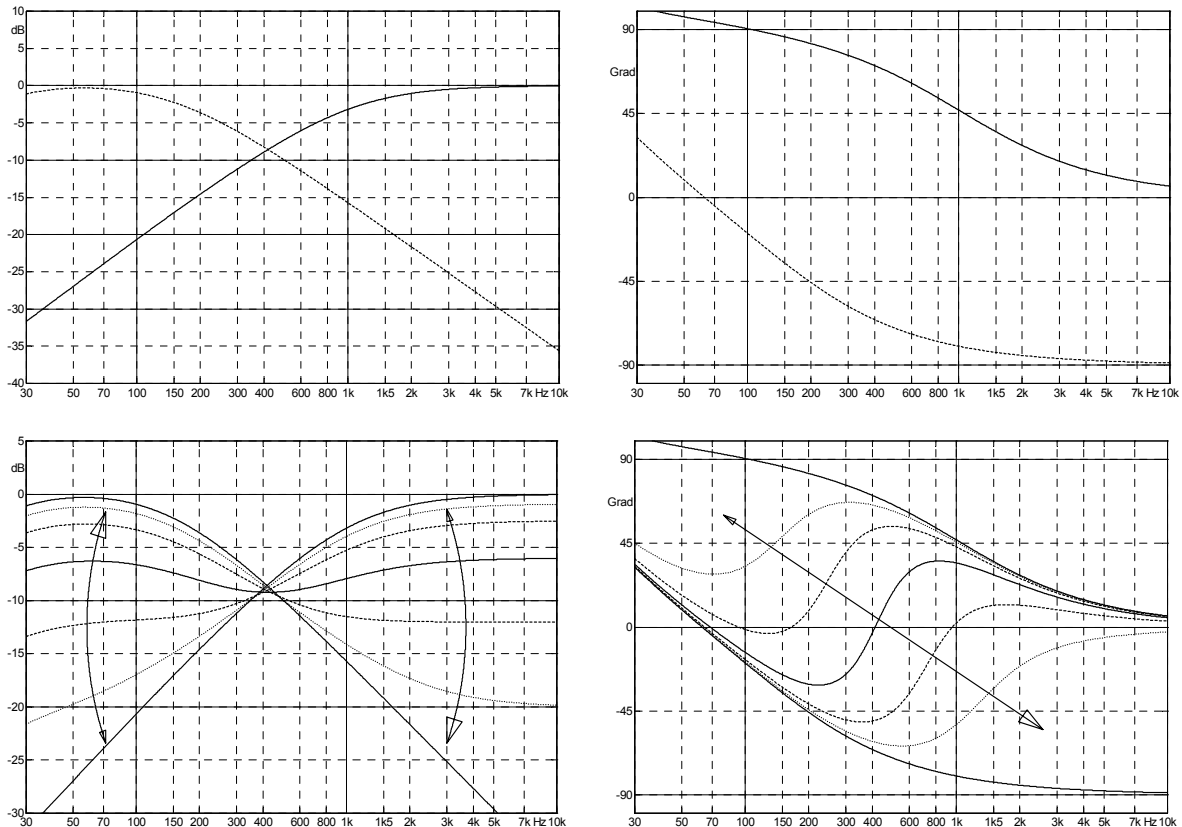


Abb. 10.8.14: Betrag- und Phasengang der Frequenzweiche (oben), und des Gesamtsystems (unten). 5G13.

Die beim Vibrasonic et al. realisierte leichte **Frequenzmodulation** perfektioniert der VOX AC-30 (Abb. 10.8.15) mit einer von der Wurlitzer-Orgel [Petersen/Denney] übernommenen **Allpass**-Schaltung, die vor allem FM, aber kaum AM erzeugt. Das hierfür benötigte Filternetzwerk ist mit 6 Kondensatoren, 6 Widerständen und drei Verstärkern schon recht umfangreich, lässt sich aber zur Berechnung gut in einfache Teilsysteme zerlegen. Im Schaltbild sind zwei strukturgleiche aktive Allpässe zweiter Ordnung zu erkennen, die sich lediglich in ihren Bauteilwerten unterscheiden. Die Signalabbildung von  $U_0$  nach  $U_a$  wird schnell verständlich, wenn man zunächst  $R_3$  und  $C_3$  weglässt. Es bleibt dann ein kapazitiv überbrückter Spannungsteiler übrig, der durch vier Bauteile (vier Freiheitsgrade) bestimmt ist. Ein Freiheitsgrad ist das Widerstandsniveau, das röhrentypisch im 100-k $\Omega$ -Bereich gewählt wird. Der zweite Freiheitsgrad ist der Dämpfungsfaktor (ca. 3). Pol/NSt-Kompensation ergibt den dritten Freiheitsgrad ( $R_1C_1 = R_2C_2$ ), die Grenzfrequenz (ca. 1 kHz) den vierten. Heraus kommt ein passives System nullter (!) Ordnung, das im gesamten Frequenzbereich eine frequenzunabhängige Dämpfung (ca. 10 dB) erzeugt.

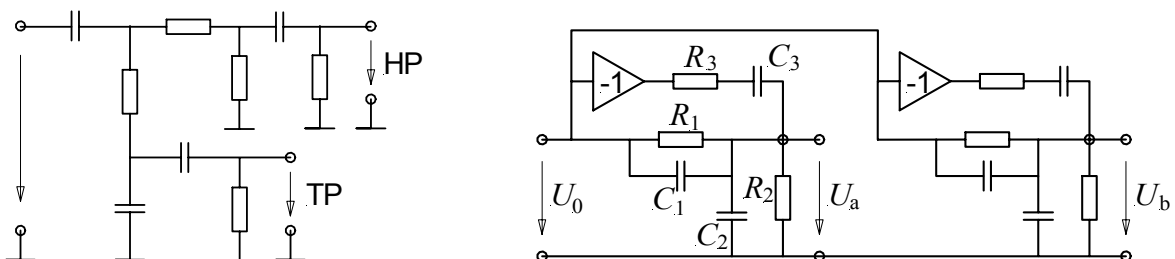


Abb. 10.8.15: Frequenzweiche des Vibrasonic 5G13 (Fender, links), und des AC-30 (VOX, rechts).

Nun kommen  $R_3$  und  $C_3$  hinzu, angesteuert über einen Inverter ( $v = -1$ ). Bei richtiger Dimensionierung ist das Ausgangssignal ( $U_a$ ) dann bei tiefen und hohen Frequenzen gleichphasig zum Eingangssignal, bei der Grenzfrequenz jedoch gegenphasig. Der aktive Zweig ( $R_3, C_3$ ) kann bei tiefen Frequenzen keine Wirkung erzeugen, weil hier  $C_3$  hochohmig gegenüber den Teilerwiderständen ist. Ebenso ist hochfrequent keine Wirkung möglich, weil hier  $R_3$  hochohmig gegenüber den Teilerkondensatoren ist. Nur im Bereich der Grenzfrequenz bestimmen  $R_3$  und  $C_3$  die Übertragung und bewirken eine Phasendrehung von  $0$  auf  $\pi$ . Die Bauteile des aktiven Zweiges ( $R_3$  und  $C_3$ ) lassen sich so berechnen, dass der Betrag der Übertragungsfunktion konstant, d.h. frequenzunabhängig wird, was einem idealen Allpass entspricht.

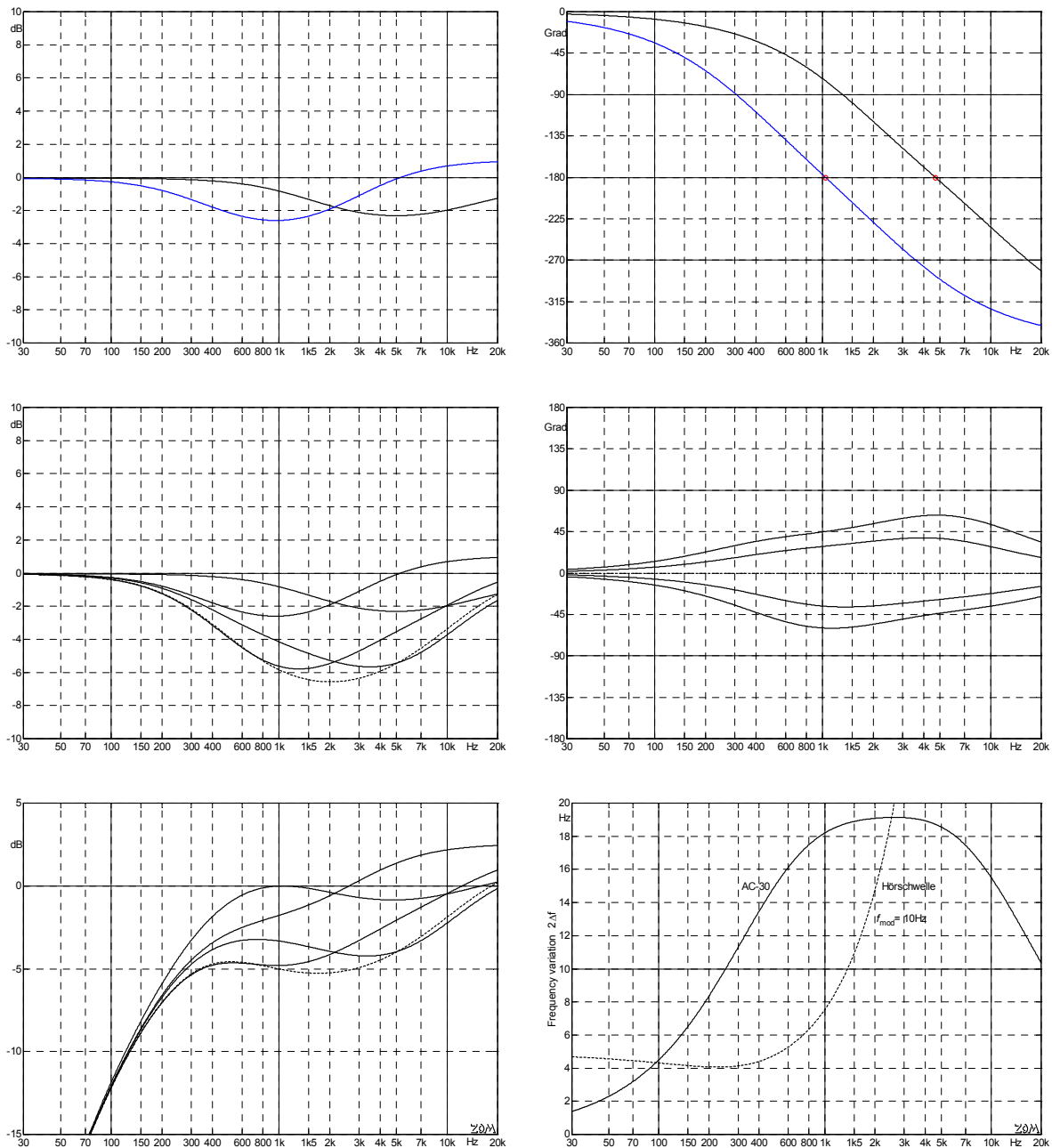
Ein **Allpass** ist ein Filter, das nur die Signalphase, aber nicht die Signalamplitude verändert. Dies wird erreicht, wenn der Zähler der Übertragungsfunktion konjugiert komplex zum Nenner der Übertragungsfunktion ist; die Beträge von Zähler und Nenner sind dann gleich, der Betrag der Übertragungsfunktion ist eine Konstante (d.h. nicht von  $\omega$  abhängig). Im Fall der o.a. Filterschaltung (Abb. 10.8.15) entsteht ein Allpass zweiter Ordnung, dessen Zähler- und Nennerpolynom  $p$  in maximal zweiter Potenz enthält:

$$\underline{H}(p) = \frac{ap^2 + bp + 1}{cp^2 + dp + 1} \cdot H_0 \quad a = c, \quad b = -d. \quad \text{Allpass zweiter Ordnung, } p = j\omega$$

Eine Übertragungsfunktion zweiter Ordnung hat 5 Freiheitsgrade. Zwei davon werden für die Allpasscharakteristik benötigt: Gleiches Verhalten für  $f \rightarrow 0$  und  $f \rightarrow \infty$  ergibt  $a = c$ , die komplexe Konjugation von Zähler und Nenner ergibt  $b = -d$ . Die verbleibenden drei Freiheitsgrade definieren: Grundverstärkung ( $H_0$ ), Grenzfrequenz ( $a$ ) und Güte ( $b$ ). Die Bauteile des AC-30-Filters wurden in der Originalschaltung so gewählt, dass kein perfekter Allpass entstand, sondern neben der Phasendrehung auch eine leichte Betragsänderung bewirkt wurde (ca. 3dB). Der Grund hierfür ist nicht bekannt, möglicherweise war die hierdurch erzeugte zusätzliche AM wünschenswert.

Ein Allpass alleine erzeugt aber noch keine Frequenzmodulation (FM), er bewirkt lediglich eine stationäre (zeitinvariante) Phasendrehung. Deshalb ist ergänzend ein zweiter Allpass vorhanden (Abb. 10.8.15), dessen Grenzfrequenz sich von der des ersten um den Faktor 4.5 unterscheidet (1040Hz vs. 4700Hz). Zwischen den Ausgangssignalen besteht somit eine wesentliche Phasendifferenz, woraus sich beim LFO-gesteuerten pendelnden Überblenden zwischen den Allpass-Ausgängen eine zeitvariante Phasendrehung ergibt. Nimmt man für die Phasenmodulation näherungsweise einen sinusförmigen Verlauf an, entspricht der Maximalwert der hierdurch gleichzeitig verursachten Frequenzmodulation dem Produkt von Modulationsfrequenz (LFO-Frequenz) und Phasenhub:  $\Delta f = f_{\text{mod}} \cdot \hat{\phi}$ . Mit  $f_{\text{mod}} = 10$  Hz und einem maximalen Phasenhub von  $55^\circ (= 0.3\pi)$  ergibt sich ein Frequenzhub von  $\Delta f = \pm 9.4$  Hz.

Aus psychoakustischen Versuchen ist bekannt, dass die eben wahrnehmbare Frequenzunterschiedsschwelle bei tiefen Frequenzen ca.  $\pm 2$  Hz beträgt, erst ab 500 Hz wird das **Gehör** dann zunehmend unempfindlicher gegenüber absoluten Frequenzänderungen [12]. Die vom AC-30-Modulator hervorgerufenen Frequenzmodulationen sind somit deutlich überschwellig, wobei ergänzend zu berücksichtigen ist, dass sowohl die Modulatorschaltung, als auch Lautsprecher- und Raumresonanzen zusätzliche Amplitudenmodulationen erzeugen. Abschließend sei mit einem kurzen Hinweis erwähnt, dass beim AC-30 mit einem Schalter ein Allpass abgeschaltet werden kann, wodurch die Amplitudenmodulation zum dominierenden Effekt wird.



**Abb. 10.8.16:** AC-30-Modulator. Oben: Betrags- und Phasengang der einzelnen (approximierten) Allpässe. Mitte: Betrags- und normierter Phasengang des gesamten Modulators. Unten: Betragsgang incl. Hochpass 4. Ordnung; mit  $f_{LFO} = 10\text{Hz}$  erreichbare Frequenzänderung  $2 \cdot \Delta f$ .

In **Abb. 10.8.16** sind Berechnungen zum Übertragungsverhalten dargestellt. Das LFO-gesteuerte Wechseln zwischen den Allpässen bewirkt Pegeländerungen bis zu 5 dB, und Phasenänderungen bis zu  $110^\circ$ , die bei 10 Hz Modulationsfrequenz eine Frequenzänderung von bis zu 19 Hz ergeben. Im rechten unteren Bild ist zum Vergleich die FM-Wahrnehmungsschwelle gestrichelt eingezeichnet [12], die erzielten Modulationen sind deutlich überschwellig. Der im linken unteren Bild hinzugerechnete Hochpass 4. Ordnung folgt beim AC-30 auf den Modulator, um das restliche LFO-Signal vom Gitarrensinal abzutrennen. In der Summierstufe erfolgt zwar eine Kompensation des LFO-Signals, die wegen unvermeidlicher Röhrentoleranzen aber nie perfekt sein kann.