Physik der Elektrogitarre – viel Schall, und gelegentlich Rauch

Manfred Zollner
Hochschule Regensburg

Einleitung

Nein, die Elektrogitarre hatte Goethe noch nicht im Sinn, wenngleich sie zu Fausts alter ego gut gepasst hätte: *Hotter than hell* wird ihr Klang, ihr 'Sound', in der Werbung betextet, und gelegentlich wird sie sogar auf offener Bühne verbrannt. Und raucht dann tatsächlich. Doch nicht diese feinstoffliche Emission steht im Focus, sondern der Schall, den der mit reichlich Leistung versorgte Gitarrenlautsprecher produziert. Von welchen Parametern hängt dieser Schall ab, was oder wer bestimmt, wie eine E-Gitarre klingt? Wertend der Hörer, kausal das 'Gear'. Wie die Gitarre klingt, entscheidet im Sinne einer Bewertung der Hörer, aber natürlich entscheiden auch Gitarre, Verstärker, Lautsprecher, kurz das, was als Equipment bezeichnet wird. Oder eben szenetypisch als 'Gear'. Von der Kinematik der Saitenschwingung über die Abbildungsgleichungen der Magnettonabnehmer durch den nichtlinear verzerrenden Röhrenverstärker zur Lautsprecherbox läuft das Gitarrensignal quer durch die Vorlesungsinhalte eines Elektroakustik-Studiums. Erstaunlich, dass sich die Wissenschaft trotzdem so wenig mit ihm beschäftigt hat; über die Elektrogitarre gibt es – im Gegensatz zur Akustikgitarre – kaum wissenschaftlich fundierte Fachliteratur. Die folgenden Seiten füllen einen Teil dieser Lücke und erläutern in Kurzform die für die E-Gitarre wichtigen physikalischen Grundlagen, die ausführliche Darstellung kann als PDF heruntergeladen werden [1].

Saitenschwingungen

Auf die Gitarrensaite wird beim Anzupfen potentielle Energie übertragen (einige mWs), die beim Ausschwingen teils in der Saite, teils im Korpus, teils im Schallfeld in Wärme umgewandelt wird. Ein ganz kleiner Teil dieser Energie landet als elektrische Energie im Verstärker, und genau das ist der wichtige Teil. Von ihm hängt der vom Lautsprecher abgestrahlte Schall ab, gegenüber dem der von der Gitarre abgestrahlte Schall vernachlässigt werden kann. Die dominante Schwingungsform der Gitarrensaite ist die transversale Biegeschwingung, aber auch eine Longitudinalschwingung kann beobachtet werden. Während sich die Longitudinalwelle dispersionsfrei ausbreitet (die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist frequenzunabhängig), laufen Transversalwellen dispersiv: Hochfrequente Anteile breiten sich schneller aus als niederfrequente [2]. Im Frequenzbereich macht sich diese Dispersion durch Spreizung der Spektrallinien bemerkbar, im Zeitbereich durch zunehmende Impulsverbreiterung. Das Spektrum der Transversalschnelle eines Saitenpunktes ist nicht harmonisch (äquidistante Linien), sondern gespreizt: Mit zunehmender Frequenz wird der Linienabstand immer größer. Dem entspricht im Zeit/Ortsbereich die Impulsverbreiterung: Während ein örtlich begrenzter Impuls die Saite entlang läuft vergrößert sich seine Breite – ein Effekt, der schon nach wenigen Zentimetern beobachtet werden kann. Ursache dieser Effekte ist die Biegesteifigkeit der Saite, die eine Differentialgleichung 4. Ordnung erfordert. Je höher die Biegesteifigkeit, und – vereinfacht – je dicker die Saite, desto größer die Dispersion. Da bei den Basssaiten der Gitarre schon mit einer erheblichen Inharmonizität zu rechnen wäre, fertigt man diese Saiten nicht massiv *(plain)*, sondern umsponnen (*wound*) – das Bewickeln mit dem Umspinnungsdraht erhöht die Masse, ohne die Biegesteifigkeit wesentlich zu vergrößern. Aber selbst bei umsponnenen Saiten ist die Inharmonizität noch deutlich: Um 6 kHz werden die Teiltöne der tiefen E-Saite (E_2) um ca. 20% gespreizt, so z.B. dass der 65. Teilton nicht bei 65 x 82.4 Hz = 5.4 kHz liegt, sondern bei 6.4 kHz. Auf den subjektiven Klangeindruck hat diese Teiltonspreizung jedoch gar keinen so großen Einfluss, wäre da nicht der Verstärker mit seinen Nichtlinearitäten. Unverzerrt hat der gespreizte Klang im Gegensatz zum harmonischen eine etwas höhere Tonhöhe. Nicht unwichtig, aber durch Tieferstimmen leicht auszugleichen. Wenn aber der Gitarrenverstärker übersteuert wird, und das wird er in vielen Fällen, entstehen zusätzliche Summen- und Differenztöne, und die verändern den Klang ganz erheblich.

Neben der Teiltonspreizung, die übrigens sehr präzise durch die Rayleighsche Formel [2] beschrieben werden kann, findet man aber auch kleinere spektrale Irregularitäten, die nicht primär der Saite, sondern ihren Lagern zuzuschreiben sind. Die Saitenlager (Bünde, Sattel) sind nämlich nicht starr, sondern – je nach Frequenz – federnd oder träge. Die schon bei der biegesteifefreien Saite definierte Lagerimpedanz $\underline{Z} = \underline{F}/\underline{v}$ ist komplex; ein positiver Imaginärteil entspricht [1] einer Massenhemmung ($j\omega m$), ein negativer einer Federhemmung ($s/j\omega$). Beim Modell der biegesteifen Saite sind die Zusammenhänge komplizierter, hier müssen auch noch Drehfeder- und Trägheitsmomente berücksichtigt werden. Für beide Modelle ist die Wirkung aber gleich: Die effektive Saitenlänge wird (wie in der elektrischen Leitungstheorie) frequenzabhängig. Dies kann zur Verstimmung einzelner Teiltöne führen, aber auch zur Erzeugung zusätzlicher Teiltöne (bei allpasshaltiger Lagerimpedanz). Und dann ist noch zu berücksichtigen, dass die Saite nicht nur in einer Ebene schwingt. Auch wenn die Erstauslenkung exakt rechtwinkelig zur Griffbrettoberfläche erfolgte, die Polarisationsebene kann sich im Lauf der Zeit drehen. Langsam oder schnell, dauernd oder einmalig. Ursache hierfür ist die Verkopplung der Schwingungsmoden am Lager, also die Geometrie der Auflagefläche. Auch die von den Magnettonabnehmern erzeugten Feldkräfte können die Schwingungsrichtung beeinflussen, wie auch – ganz kompliziert – Berührungen zwischen Saite und Bünden. All diese Effekte wirken auf die Saitenschwingung ein, und verändern, da sie auch resistive Komponenten beinhalten, nicht nur die Frequenzen der Teiltöne, sondern auch deren Abklingverhalten.

Nach dieser kurzen Betrachtung der freien Schwingung noch eine ebenso kurze Analyse der inhomogenen "Erzwingung":

Die Saite wird mit dem Fingernagel oder der Fingerkuppe oder dem Plektrum ausgelenkt, und auch hierfür gibt es vielfältige Möglichkeiten. Der Ort des Anzupfens ist entscheidend, bestimmt er doch die Form der stehenden Welle, und damit auch die Bewegung der Saite über dem Tonabnehmer. Je näher am Steg angezupft wird, desto schwächer können sich tieffrequente Moden entwickeln, desto schärfer klingt die Gitarre. Auch der Winkel der Erstauslenkung bestimmt den Klang, griffbrettparallele Auslenkung klingt anders als griffbrettnormale. Und nicht zuletzt entscheiden Form und Härte des Plektrums über die Saitenkrümmung am Anzupfort, und damit über das Initial-Spektrum. Hier kommt nun die Virtuosität des Gitarristen ins Spiel, der die Saite nicht nur irgendwie auslenkt, sondern so, dass die Gitarre den erwünschten Klang erzeugt. Ein Umstand, der gerne vergessen wird, wenn Fachmagazine darüber kolumnieren, mit welcher Gitarre denn der originale Hendrix-Sound zu reproduzieren sei. Der Gitarrist, mit Verlaub, war daran auch beteiligt.

Dass die Saite auch auf die Bünde aufprallen kann, wurde schon erwähnt. Sie tut es, sie tut es häufig. Analysen mit einem Mehrkanal-Analysator, der den elektrischen Widerstand zwischen Saite und Bünden registrierte, ergaben, dass bei artgerechtem Spiel nach jedem Anschlag viele Kontakte entstehen – auch wenn die Saite nicht hörbar schnarrt. Allerdings gibt es viele Arten artgerechten Spiels, und deswegen eine kleine Einschränkung: Mit dicken Saiten, hoher Saitenlage und schwachem Anschlag sind die Saite/Bund-Kontakte unbedeutend, wohingegen mit dünnen Saiten, rockgitarrenüblicher Saitenlage und ebensolchem Anschlag sogar schon bei der Initialauslenkung die Saite auf dem letzten Bund aufliegt. Die daraufhin einsetzende "freie Schwingung" ist gar nicht so frei, denn alle nun folgenden Kontakte stellen eine von außen einwirkende Anregung dar. Für eine streng griffbrettnormal angezupfte Saite konnte über einige Perioden eine gute Übereinstimmung zwischen Messungen und einem mathematischen Modell erzielt werden, für beliebige Anzupfrichtung und längere Klangdauer sind aber komplizierte Modelle erforderlich, die den Prellvorgang räumlich nachbilden können – Themen künftiger Forschungsarbeiten.

Magnettonabnehmer

Die Elektrogitarre erzeugt ein elektrisches Signal, das, verstärkt, dem Lautsprecher zugeführt und erst von ihm in Luftschall umgewandelt wird. Die Wirkmechanismen der Wandlung von der mechanischen Saitenschwingung in die elektrische Spannung lassen sich gut durch die Theorie des magnetischen Wandlers beschreiben [3], also eines Systems, dessen magnetischer Widerstand sich zeitabhängig ändert. In seiner einfachsten Bauform besteht ein Magnettonabnehmer aus einem zur Saite gerichteten Permanentmagnet, der von vielen tausend Windungen dünnen Drahtes umschlossen ist. Ändert die Saite ihre Distanz zum Magnet, so ändert sich als Folge der magnetische Widerstand (des Luftfeldes), was eine Änderung der Magnetflussstärke bewirkt, die ihrerseits in der Spule eine elektrische Spannung induziert. Die magnetischen Wechselflüsse sind gering, die Windungsspannungen mit ca. 10 µV auch, aber durch die Vielzahl der Windungen (10.000 und mehr) werden doch ausreichend große Spannungen erzeugt. Neben der Frage nach dem reinen Wandlungsprinzip interessiert aber auch, welcher Bereich der Saite maßgeblich an der Signalerzeugung beteiligt ist, und wie die Tonabnehmerbeschaltung Einfluss auf die Signalübertragung nimmt. Durch spezielle Prüfstände [1] konnte gezeigt werden, dass das "Fenster", durch das der Tonabnehmer die Saite "sieht" (die sog. magnetische Apertur), nur wenige Millimeter breit ist, und nichts mit der Breite der Tonabnehmerspule zu tun hat. Ca. 5 – 10 mm; bei kleinem Saite/Magnet-Abstand tendenziell etwas weniger, bei großem Abstand mehr. Die Wirkung dieser Spaltbreite ist auch von anderen Spaltabtastern bekannt, das beschreibende Modellsystem ist der Spalt-Tiefpass. Die Grenzfrequenz dieses Tiefpassfilters ist bei Gitarrensaiten so hoch, dass nur marginale Auswirkungen zu beobachten sind; nicht ganz zu vernachlässigen, aber auch nicht der Haupteffekt. Wesentlich wichtiger ist der Tiefpass, den die Wicklungsinduktivität der Tonabnehmerspule und die Kabelkapazität bilden: Bei üblichen Kabellängen entstehen Resonanzfrequenzen zwischen 2 bis 5 kHz, mit Resonanzüberhöhungen bis zu 10 dB. Bei einfach aufgebauten Tonabnehmern lässt sich die Übertragung in guter Näherung durch diesen Tiefpass zweiter Ordnung beschreiben, wirbelstromerzeugende Abschirmbleche können aber Modelle höherer Ordnung erfordern.

Man bekommt einen guten Eindruck von der Signalerzeugung, wenn man die Saite als Wellenleiter modelliert, der von einem Sprung (oder Impuls) angeregt wird. Da im linearen Modell der Impuls als Differential des Sprungs aufgefasst wird, ist die Beschreibung durch das in der Systemtheorie beliebt Paar Impulsanregung/Impulsantwort möglich. Der Impuls läuft von der Anzupfstelle nach beiden Seiten, wird beidseitig reflektiert, und bewirkt eine Vielzahl über den Tonabnehmer hinweglaufender Impulse. Anzupfort und Tonabnehmerposition erzeugen FIR-Kammfilter, deren Frequenzgänge durch Berechnungsverfahren ermittelt werden können, die auch bei Digitalfiltern zum Einsatz kommen.

Die gesamte Signalerzeugung lässt sich somit in eine Kettenschaltung idealisierter Teilsysteme zerlegen – zumindest, solange man lineares Verhalten zugrundelegt (was nur einen Teil der Betriebsarten abdeckt). Der Saitenanregung entspricht ein Sprunggenerator, dessen genauer Signalverlauf vom Plektrum abhängt (alternativ: Idealer Sprung und Plektrumfilter). Die Reflexionen werden von zwei zeitversetzt angesteuerten IIR-Filtern nachgebildet. Daran schließt sich ein erstes FIR-Filter an, dessen Parameter vom Anzupfort abhängen, gefolgt von einem zweiten FIR-Filter, dessen Parameter von der Tonabnehmerposition abhängen. Hierauf folgt ein Spalttiefpass (Apertur) und ein analoger Tiefpass zur Nachbildung der Tonabnehmer/Kabel-Resonanz. Im linearen Modell kann man diese Filter natürlich auch zu einem einzigen zusammenfassen, im nichtlinearen ist das nicht möglich. Nichtlinear ist die Saitenschwingung bei mittlerer und großer Auslenkung, nichtlinear ist auch die mechanoelektrische Wandlung im Tonabnehmer. Gleichwohl ist das lineare Modell eine gute Ausgangsposition, von der aus bereits wesentliche Effekte erklärt werden können. Dass daneben noch eine Reihe weiterer Effekte die Ausgangsspannung der Elektrogitarre beeinflussen erfordert – so es als wesentlich angesehen wird – zusätzliche Teilsysteme, also komplexere Modelle; siehe [1].

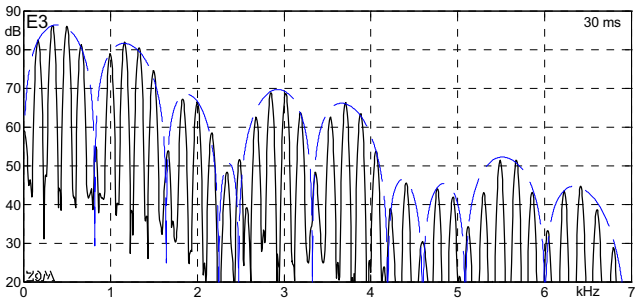

Abbildung 1: Pegelspektrum der Tonabnehmerspannung. Telecaster, E3 auf D-Saite, Stegtonabnehmer. Die blau eingezeichnete Hüllkurve wurde berechnet.

Abbildung 1 zeigt ein gemessenes Spektrum im Vergleich zu einer Modellrechnung – die Übereinstimmung ist gut. Mit fortschreitender Zeit nehmen die Pegel der einzelnen Teiltöne nach individuellen Funktionen ab, wobei es sowohl globale, als auch lokale Effekte gibt. Global im Sinne von breitbandig sind Dämpfungen durch Schallabstrahlung direkt von der Saite und durch saiteninterne Reibungsmechanismen, frequenzselektiv wirken Resonanzeffekte in den Saitenlagern. Nur wenige Teiltöne klingen aber so schnell ab, dass ihr abruptes Verschwinden den für den Klangeindruck wichtigen Attack wesentlich beeinflusst. Wenn nur wenige Teiltöne stark bedämpft werden (im Bild z.B. bei 5.3 kHz) so ändert das den Klang nur marginal. Trotzdem lohnt es, nach der Ursache dieser Dämpfungen zu forschen.

Hals und Korpus

Über Jahrzehnte wurde dem Korpusholz der massiven Elektrogitarre ein wichtiger, wenn nicht gar dominanter Einfluss auf den Klang nachgesagt. Auf den Klang der verstärkten Gitarre, denn der Klang der unverstärkt gespielten E-Gitarre ist ja irrelevant. Als Begründung reichte, dass bei der Akustikgitarre entsprechende Mechanismen zugrunden liegen; ja sogar Geigen und deren edles Gehölz wurden als Beweis bemüht. Aussagen wie *die Schwingungsenergie der Saite müsse möglichst vollständig im Korpus ankommen, weil dadurch ein Maximum an Sustain entstünde* zeigen, dass wohl der Energiesatz noch nicht überall angekommen ist. Ehe man über die klangformende Wirkung eines 4 cm dicken massiven Holzbrettes nachdenkt (das durchaus seine Eigenmoden haben darf) gedenke man des Steges, der sich als frei schwingender Biegebalken von einem "Ufer" zum anderen spannt, sowie seiner 18 (oder mehr) Einzelteile. Denen man beim besten Willen nicht ansieht, dass sie nach schwingungstechnischen Gesichtspunkten optimiert wurden, die oft mit viel Spiel und Bohrgraten aufeinandersitzen ... aber bei den begehrten Vintage-Instrumenten gnädigerweise so festgerostet sind, dass sie zumindest nicht mehr rattern.

Um die Auswirkungen des Korpusholzes auf den Klang der verstärkten Gitarre (auf den E-Klang) zu untersuchen, wurde eine massive Elektrogitarre (Fender Stratocaster) mit oder ohne Kontakt zu einem hölzernen Resonanzkasten gespielt. "Mit Kontakt" bedeutet, dass der Gitarrenkorpus auf den Kasten aufgesetzt wurde (**Abbildung 2**), wodurch dieser zum Mitschwingen angeregt wurde; die Korpusmasse wurde durch diese Maßnahme mehr als verdoppelt.

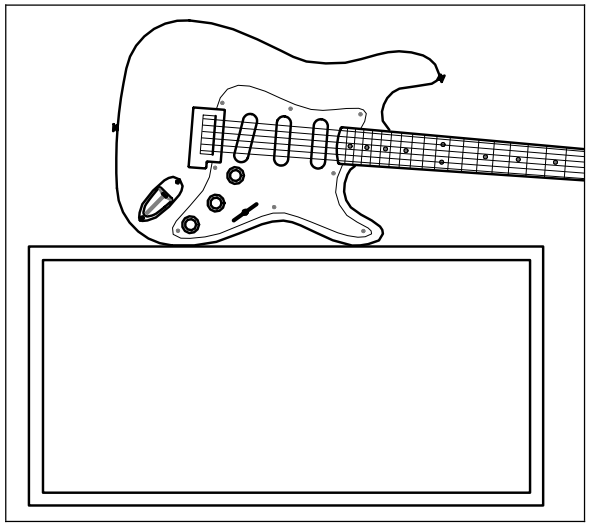

Abbildung 2: Ankopplung eines Resonanzkastens an den Korpus einer Stratocaster-Gitarre. Der abgestrahlte Luftschall ändert sich durch den Kasten wesentlich, die vom Tonabnehmer erzeugte Spannung ändert sich unwesentlich.

Der abgestrahlte Luftschall wurde 10 cm vor dem Halstonabnehmer mit einem Messmikrofon aufgezeichnet, und parallel dazu wurde auch die Tonabnehmerspannung gespeichert. Beim anschließenden Hörversuch konnte beim Luftschall jeder Kontaktwechsel ganz eindeutig bemerkt werden (was bei dieser Resonatorgröße wirklich nicht überrascht), im elektrisch verstärkten Signal konnte hingegen keiner der Kontaktwechsel entdeckt werden. Streng genommen müssen sich natürlich schon Rückwirkungen nachweisen lassen, und die findet man auch bei hochauflösenden Analysen der Steg-Impedanz, doch ist deren Einfluss so gering, dass sie beim artgerechten Spiel zu vernachlässigen sind.

Etwas größere (und so gerade eben signifikante) Auswirkungen haben Kopplungen zwischen dem Gitarrenhals und einem Resonator. Der dünne Hals stellt mit seinen ausgeprägten Eigenmoden kein ausreichend starres Saitenlager dar, wie schon Untersuchungen von Fleischer zeigten [4]. Ehe man nun aber dem Gitarrenhals großen Einfluss auf den Klang attestiert, sollte man bedenken, dass der Hals beim Spielen ja von der Hand umfasst wird. Diese Berührungen führen zu einer erheblichen Bedämpfung, waren aus gutem Grund aber nie Thema ausufernder Optimierungsstrategien. Die Spielhand berührt den Hals und verkürzt dadurch das Sustain – möge der Hals aus Ahorn oder Mahagoni bestehen.

Gitarrenverstärker

Die ersten Gitarrenverstärker waren röhrenbestückt – Mitte der 40er-Jahre auch gar nicht anders möglich. Als dann die Transistortechnik Einzug hielt, von Fender z.B. mit *superb Sound* beworben, waren die Musiker indessen alles andere als begeistert. Nicht nur die Form wurde kritisiert (*kuriose Kühlschränke*), vor allem wurden Mängel beim Sound festgestellt: *Leblos, kalt, steril, kratzig,* und sogar *leiser*, trotz vermeintlich gleicher Leistung. Eine echte Herausforderung für den Schaltungstechniker, denn auf den ersten Blick offenbaren sich noch keine grundlegenden Unterschiede im Übertragungsverhalten.

Auf den zweiten Blick manifestierten sich Urteile wie: *Der Röhrenverstärker erzeugt vor allem quadratische Verzerrungen (gut), der Transistorverstärker kubische (schlecht)*. Nun mag es Dinge geben, die quadratisch sind, und praktisch und gut, Röhren gehören aber nicht dazu. Die sind zylindrisch. Die Kleinsignal-Übertragungskennlinie des Transistors wird durch eine Exponentialfunktion angenähert, die der Röhre durch eine Potenzfunktion. Grund genug für epochale Unterschiede? Nein – beide Kennlinien sind progressiv gekrümmt und erzeugen vorrangig quadratische Verzerrungen. Beide! Erst wenn die Kennlinie weit ausgesteuert wird und Begrenzungen beginnen, erst dann gewinnen die ungeradzahligen Verzerrungen an Bedeutung. Wiederum bei beiden Verstärkerelementen. Im Detail ergeben sich wegen der verschiedenartigen Funktionen zwar schon Unterschiede in der Aussteuerungsabhängigkeit der einzelnen Klirrfaktoren, die Vereinfachung Röhre = k_2, Transistor = k_3 ist aber falsch. Sie entstammt vermutlich dem Vergleich nicht-gegengekoppelte Röhre vs. stark gegengekoppelter Operationsverstärker (OP). Die fortschreitende Miniaturisierung erlaubte es, 20 und mehr Transistoren auf kleinem Raum zusammenzufassen und als "integrierten Schaltung" zu produzieren. Da die Verstärkung dieser "OP" genannten Schaltungen sehr hoch war, mussten und konnten sie gegengekoppelt werden, was gleichzeitig die Möglichkeit ergab, die nichtlinearen Verzerrungen zu reduzieren. Dies funktioniert aber nur, solange die Aussteuerungsgrenze noch nicht erreicht ist. Wird diese überschritten, steigen die Verzerrungen sprunghaft an. Und weil beim OP-Entwurf auf Symmetrie geachtet wurde, sind es vor allem die ungeradzahligen Ordnungen, die dominieren: Ungerade Funktionen ergeben ungerade Ordnungen. Das kann der Röhrenverstärker aber auch: Selbst wenn die erste Röhrenstufe mangels Gegenkopplung dominierende quadratische Verzerrungen erzeugt – bei nicht wenigen Fender-Verstärkern setzt die darauf folgende zweite Stufe eine anders herum gekrümmte Kennlinie dagegen, deren quadratische Verzerrungen gegenphasig ausfallen und die der ersten Stufe größtenteils kompensieren können. Und dann überwiegen wieder die kubischen Verzerrungen im Röhrenverstärker. Das muss nicht so sein, das hängt von mehreren Parametern ab, es kann aber so sein.

Die Unterschiede Röhre/Transistor lassen sich nicht auf eine Eigenschaft reduzieren, sie sind multifaktoriell. Parallelen zum Sprengelschen Minimumgesetz (s.a. Liebig) drängen sich auf: Ähnlich wie die Pflanze schlecht wächst, wenn auch nur ein wesentlicher Nährstoff fehlt, sind auch beim Gitarrenverstärker viele Eigenschaften erforderlich. Fehlt auch nur eine wesentliche, ist der Klang unbefriedigend. Es hilft schon sehr, den Gitarrenverstärker als zum Instrument gehörend zu verstehen, ganz im Gegensatz etwa zu der im Wohnzimmer stehenden HiFi-Anlage. Diese soll reproduzieren, jener soll produzieren, das ist etwas ganz anders. Der HiFi-Anlage wurden klangformende Eigenschaften immer mehr aberzogen, so dass sie ein praktisch frequenzunabhängiges Übertragungsmaß und vernachlässigbare Nichtlinearitäten aufweist – unzweckmäßig für einen Gitarrenverstärker. Der mit wenigen Bauelementen aufgebaute Röhrenverstärker enthält eo ipso das Potential zum guten Sound, der Transistorverstärker nicht. Lehrbuchmäßige Schaltungsverbesserungen führen beim Transistorverstärker zwangsläufig zur HiFi-Anlage, weil Lehrbücher eben Gegenkopplung, Kompensation und Linearisierung favorisieren. Damit wird der gut klingende Transistorverstärker nicht grundsätzlich ausgeschlossen, er erfordert nur Lösungen abseits der ausgetretenen Trampelpfade. Und nur ganz am Rande: Man kann auch schlecht klingende Röhrenverstärker bauen.

Die "Geheimnisse", so man sie denn so nennen möchte, beginnen schon an der Eingangsbuchse: Ein üblicher Line-Eingang mit seinen 47 oder 100 kΩ bedämpft die Tonabnehmerresonanz so stark, dass ein hörbarer Brillanzverlust auftritt. Wie dieses, der Tonabnehmer wird doch mit 6 kΩ spezifiziert, und da sollen 100 kΩ stören? Ja, denn bei Resonanz ist der Tonabnehmer hochohmig, und deshalb hatten und haben Röhrenverstärker Eingangswiderstände von 1 MΩ. Kann man auch mit einem Transistorverstärker realisieren, muss man aber wissen. Auch die Ausgangsimpedanz (aka Innenwiderstand) ist speziell: Bei der nichtgegengekoppelten Röhrenendstufe hochohmig (z.B. 200 Ω), bei der Transistorendstufe sehr niederohmig. Nicht immer, VOX erzielt mit einer sehr speziellen Schaltung (Valvetronix) auch mit Transistoren röhrenähnliches Verhalten, aber das ist eben eine Spezialentwicklung. Ist die Ausgangsimpedanz groß, werden Lautsprecherresonanzen weniger bedämpft, und der Klang erhält Farbe. Lautsprecherresonanzen, also insbesondere Gehäuseresonanzen. Und es schadet gar nicht, dass die Gehäuse der frühen Gitarrenlautsprecher in ihren Hauptabmessungen nahe an denen einer Akustikgitarre waren – die sich bildenden Gehäuseresonanzen waren dadurch in ähnlicher Größe, was dem Klang durchaus dienlich war.

Der Frequenzgang des Verstärkers, also das Übertragungsmaß, ist hingegen nicht die dominierende Größe. Natürlich muss es genretypisch ausfallen, aber das zu erreichen war stets Ziel der Verstärkerentwickler. Trotz gleichen Übertragungsmaßes können sich Röhren- und Transistorverstärker im Klang unterscheiden, und auch bei gleichen Eingangs- und Ausgangswiderständen verbleiben weitere Eigenschaften, die im Sollbereich liegen müssen: Der Klirrfaktor wurde schon genannt, auch der Slewrate-Verzerrung ist zu gedenken, und das in jeder Verstärkerstufe. Beim linearen System ist die Verknüpfung der Teilsysteme kommutativ, verkettete Filter können zu einem zusammengefasst werden. Bei nichtlinearen Systemen geht das nicht mehr, hier ist die Wirkung jeder einzelnen Nichtlinearität getrennt zu untersuchen. Eine oft unterschätzte Wirkung dieser Nichtlinearitäten ist die Erzeugung sehr niederfrequenter Differenztöne. Die Spreizung der Teiltöne kann hierzu beitrage, oder der bei Röhrenübersteuerung einsetzende Gitterstrom. Derartig tieffrequente Effekte werden nun nicht durch die zweifellos vorhandenen Koppelkondensatoren unterdrückt, sie können stattdessen die Arbeitspunkte der Einzelstufen verschieben, wodurch ein quasi zeitvariantes Übertragungsverhalten entsteht. Beim OP mit seiner bipolaren Stromversorgung sah man hingegen einen Vorteil darin, dass auf Koppelkondensatoren weitgehend verzichtet werden konnte. Inzwischen bauen jedoch die Hersteller von Gitarrenverstärkern nicht mehr nur die für HiFi-Anlagen publizierten Application-Notes der Halbleiterhersteller nach, sondern entwickeln zielgruppenorientierte Schaltungen mit überzeugendem Klang. Was die Valves-rule-Fraktion indes völlig kalt lässt.

Gitarrenlautsprecher

Nachdem nun dargelegt wurde, dass ein Gitarrenverstärker doch sehr speziell arbeitet, ist zu befürchten, dass dies auch beim Lautsprecher so sein könnte. Richtig. Leicht übertrieben könnte man sagen: Der Wirkungsgrad muss möglichst hoch sein, der Rest ergibt sich. Der Wirkungsgrad ist tatsächlich hoch, maximal werden bis zu 10% erreicht. Das ist viel, schafft doch der HiFi-Kollege gerade mal 0,1 bis 1%. Die Hersteller spezifizieren für 1 Watt Betriebsleistung Schallpegel von über 100 dB in 1 Meter Abstand, angesichts brüllwütiger 100-Watt-Monster genug für ein gesichertes Auskommen aller Otoprothetiker. Vermutlich eignet sich nicht jeder effiziente Lautsprecher für die Gitarrenbox, die meisten finden aber Liebhaber. Natürlich gibt es hörbare Unterschiede, aber eher in Richtung Autofarbe: Ob ein rotes Auto schöner ist als ein blaues unterliegt ähnlichen Kriterien wie die Bewertung von Celestion- vs. Jensen-Lautsprecher.

Von einem Gitarrenlautsprecher wird nicht gefordert, dass er ein frequenzunabhängiges Übertragungsmaß aufweist. Das mag im Einzelfall auch einmal Ziel der Wünsche sein, im Allgemeinen soll aber der Präsenzbereich betont und die Höhen abgeschnitten werden. Nur extrem selten befinden sich Hochtonlautsprecher in der Gitarrenbox. Obgleich – ein Genre gibt es, wo ebendies erwünscht ist: Bei der Verstärkung der Akustikgitarre macht es Sinn, bei der Elektrogitarre aber nur in ganz speziellen Fällen. **Abbildung 3** zeigt den Übertragungsfrequenzgang einer typischen Verstärker/Lautsprecher-Kombination, gemessen vom Endstufen-Eingang bis zum im RAR vor dem Lautsprecher aufgenommenen Schalldruckpegel. Die bei 170 Hz liegende Resonanzspitze ist keinesfalls unerwünscht, sie verleiht im Gegensatz diesem Combo (Verstärker + Lautsprecher im selben Gehäuse) seinen charakteristischen Klang. Einen Teil seines Klangs, denn natürlich sind auch noch andere Details klangprägend. Die kleineren Resonanzzacken sind Auswirkungen stehender Wellen der Lautsprechermembran, und auch hier gilt: so oder so ähnlich muss das sein. Der Korpus einer Akustikgitarre hält ja auch viele Resonanzspitzen bereit, das verleiht Individualität und Charakter, und das tut auch der eher resonanzarmen Elektrogitarre gut.

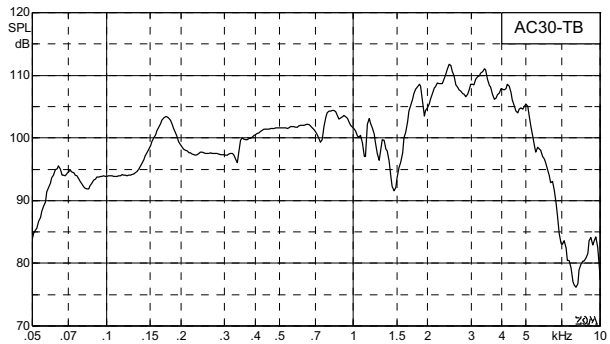

Abbildung 3: Übertragungsfrequenzgang eines Combos vom Endstufen-Eingang bis zum Schalldruckpegel (RAR).

Ein Blick auf den in **Abbildung 4** dargestellte Frequenzgang zeigt, dass die 170-Hz-Resonanz tatsächlich vom Gehäuse kommt. Durch seine halboffene Rückwand entsteht ein spezieller Helmholtz-Resonator, eine Art Bassreflex-Box, allerdings unüblich hoch abgestimmt. In Kombination mit dem hohen Endstufen-Innenwiderstand bildet sich diese Resonanzspitze auch im Übertragungsfrequenzgang ab, ganz im Gegensatz etwa zur Übertragung bei reeller Belastung. Die noch stärker ausgeprägte Resonanzspitze um 70 Hz ist die eigentliche Membranresonanz, gebildet durch Membranmasse und Aufhängungssteifigkeit, der ab 500 Hz einsetzende Anstieg ist auf die Lautsprecherinduktivität zurückzuführen [3].

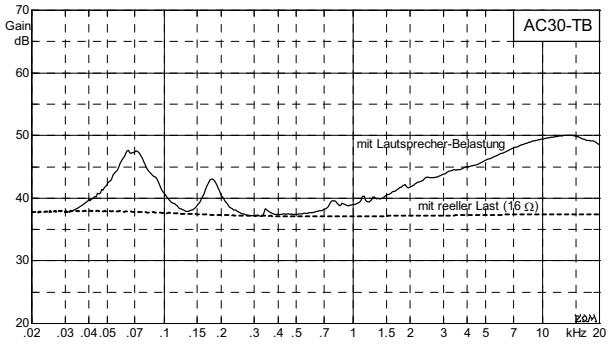

Abbildung 4: Übertragungsfrequenzgang des in Abb. 3 erwähnten Combos, von der Endstufen-Eingangsspannung bis zur Endstufen-Ausgangsspannung.

Schall und Rauch

Der von der Elektrogitarre, oder besser: der vom Gitarren-Lautsprecher erzeugte Schall ist nun bezüglich seiner Entstehung etwas transparenter geworden, der in der Überschrift erwähnte Rauch nicht. Bei der in Monterrey verbrannten legendären Stratocaster mag das nebensächlich gewesen sein, mit allegorischer Interpretation kann man hingegen ein Defizit konstatieren: Der vom Internet in Fachzeitschriften schwappende Informations-Zunami ist speziell bei der Elektrogitarre einem dichten Rauch nicht unähnlich, der letztlich mehr vernebelt als erklärt, der klare Information vermissen lässt. So gesehen ist jede Forschungseinrichtung willkommen, die die hier begonnene Arbeit fortsetzt.

Der Autor dankt seinen Kollegen Prof. Dr. Hugo Fastl und Prof. Dr. Helmut Fleischer für die stete Unterstützung und Motivation zu dieser Arbeit.

Literatur

[1] Zollner. M.: Physik der Elektrogitarre. `http://homepages.hs-regensburg.de/~elektrogitarre`

[2] Fletcher N. H., Rossing T. D.: The Physics of Musical Instruments. Springer, New York, 1999.

[3] Zollner M., Zwicker E.: Elektroakustik. Springer 1998.

[4] Fleischer H.: Schwingungsuntersuchungen an elektrischen Gitarren. ISSN 1430-936X, Heft 2/01, 2001.