

In die Röhre geschaut...

André Christ, Solid Tube Audio
Fotos und Abbildungen: FX-A.DE,
Internetquellen

Überlegungen zur Röhre als klang- und qualitätsbestimmendes Element



Wenn man sich die Frage stellen möchte, woran es liegt, dass die Röhre ein so außergewöhnlicher Klangbaustein ist, kann man ja auch mal darüber nachdenken, woran es nicht liegt. Typische Eigenschaften, die in den Köpfen der Fachwelt stecken, müssen heute neu interpretiert und definiert werden. Wenn wir die Vor- und Nachteile der Operationsverstärker- oder Transistortechnologie im Vergleich zur Röhre gegenüberstellen und auf die heute angewandte Technologie hin überprüfen, finden wir kaum schlüssige Anhaltspunkte. Betrachten wir beispielsweise das oft zitierte Sättigungsverhalten. Bei 90 Prozent der Röhren ist dies eigentlich ein Bereich, der so gar nicht genutzt werden darf, weil dieser Zustand der Leis-

tungsgrenze entspricht. Man hört dann Begriffe wie weiches Clipping, die die Röhre angeblich klanglich so interessant macht. Das stimmt, aber nicht für eine ernsthafte, hochqualitative Audiübertragung. Diese Eigenschaften gehören in die Gitarrenverstärker-Technik, da wo wir mit diesem Verhalten den Ton einer E-Gitarre gestalten möchten. Als Konstrukteure für Studioteknik sind wir vom Clipping so weit entfernt, dass man nicht einmal in Versuchung geraten könnte. Mir war immer klar, dass die Röhre in audiophilen Systemen besser als alles andere klingt, aber nicht, wenn man sie hart am physikalischen Limit betreibt, wo die grundsätzlich positiven Eigenschaften der Röhre überhaupt nicht zum Tragen kommen. Sinn-

vollerweise setzen wir die Röhre im linearsten Bereich der Eingangskennlinie (Class A Betrieb) ein. Mit anderen Worten, es ist nicht die Nichtlinearität, nach der man bei der Entwicklung einer Röhrenschialtung Ausschau hält, denn Nichtlinearitäten findet man auch sonst überall in elektronischen Schaltungen. Wenn wir davon ausgehen, dass wir auf Studioniveau Signale verarbeiten wollen, wird die Röhre ganz anders eingesetzt, als viele dies erwarten. Es wird Zeit, grundsätzlich mit dem Vorurteil aufzuräumen, dass eine Röhre in erster Linie zur Erzeugung von Klirprodukten oder Obertonstrukturen geeignet wäre.

Halten wir in diesem Sinne einmal fest, dass ein Operationsverstärker in der Regel mit +/- 20 V betrieben wird, eine Röhre jedoch mit 250 V. Das heißt, sie bietet mir schon aufgrund ihrer viel höheren Betriebsspannung einen wesentlich größeren Dynamikbereich. Die Röhre kann dementsprechend so viel Luft holen, dass sie im Regelbetrieb eigentlich nur flach atmen muss. Das halte ich für einen ganz entscheidenden Punkt. Ich arbeite innerhalb unserer Schaltung mit sehr hohen Pegeln, weil wir es einfach können. Die herkömmliche Halbleitertechnik arbeitet nicht einmal annähernd in diesen Regionen. Ein weiterer Punkt ist die Anstiegs geschwindigkeit. Ein schneller OP verarbeitet ein Signal in einem Bereich von 600 V/ μ s, eine Röhre kann dies mit 2.500 V/ns. Das ist 4000 mal schneller. Wenn man sich zeitlich an der Ladeauflösungsgrenze eines A/D-Converters bewegt, bleibt von einer Signalspitze nicht sehr viel übrig. Ein wichtiges Argument übrigens, warum die Abtastrate in einem digitalen System so hoch wie irgend möglich sein sollte. Um tatsächlich he-

rauszufinden, was nun den Klang der Röhre ausmacht, müsste ich in der Lage sein, bestimmte Eigenschaften, die sie charakterisieren, zeitweise abzuschalten. Das geht jedoch nicht, und deshalb kann man lediglich theoretische Abhandlungen darüber schreiben und das Gebilde ‚Röhre‘ so akzeptieren, wie es ist, mit all seinen fantastischen Eigenschaften. Wenn man sich einmal vorstellt, wie Trilliarden von Elektronen in ihrem Gittermodell ruhen und sich dann mittels Wärmezufuhr zur Austrittsarbeit angestoßen fühlen, hat allein dieser Vorgang schon etwas Wunderbares. In diesem Beitrag ist es mein Bestreben, Vorgänge verständlich zu erläutern und teilweise komplexe Dinge zu vereinfachen. Dabei ist das Prinzip der Röhre ganz simpel und jeder versteht es. Das ist meines Erachtens auch ein Hauptdiskussionspunkt – die Simplizität einer Röhrenschaltung. Zum Beispiel ist unser Röhren-EQ viel einfacher konstruiert und mit weniger Bauteilen ausgestattet als ein paar Operationsverstärker intern enthalten. Die Halbleitertechnik besitzt ihre Eigenschaften nicht

ohne Gegenkopplung und viele andere Korrekturen. Darum sind diese Bauteile auch so komplex aufgebaut – und nur deshalb sind sie gut. Gegenkopplung trägt sehr viele Probleme in sich, wie zum Beispiel den Verlust von kurzen Anstiegsgeschwindigkeiten und sie ist generell frequenzabhängig. Je höher die Signalfrequenz, desto problematischer wird diese Aufgabe, zum Beispiel aufgrund von Phasenverschiebungen. Des Weiteren wäre es für mich äußerst spannend, ob ich die Röhre durch einen sogenannten Metall-Oxid-Halbleiter Feldeffekttransistor ersetzen könnte. Ich könnte mir vorstellen, dass der MOSFET diese Aufgabe ebenfalls übernehmen könnte, wenn ich die Schaltung ebenso einfach halte, da sich dieser nur unwesentlich von der Charakteristik einer Röhre unterscheidet. Was ich jedoch nicht für verzichtbar halte, sind die Übertrager. Ich glaube, sie spielen eine ganz entscheidende Rolle, wenn ich Röhrentechnik beschreiben möchte. Übertrager sind ein ganz fantastisches und mechanisch sehr aufwendiges Bauelement, denn es entsteht magneti-

scher Fluss. Erst haben wir es in der Röhre mit einer Elektronenladungswolke zu tun, dann fliegen diese kleinen Kerle durch ein Vakuum, düsen durch ein Gitter, schlagen richtig auf der Anode auf, nehmen ihren Weg weiter durch Folienkondensatoren, drehen in einem Übertrager ein paar Runden in der Wicklung und es entsteht ein magnetischer Fluss, der nun wiederum einen elektrischen Strom induziert. Ist das nicht total verrückt? Dieser Vorgang ist doch schon bei der bildlichen Betrachtung schön. Das kann ja nur klingen. Ich glaube, dass die Röhre nicht allein für die vielzitierte Qualität verantwortlich ist, sondern die gesamte, physikalisch wahrnehmbare und sehr einfach aufgebaute Schaltung.

Mikrofonie als Gefahrenpotential

Ein riesiger Nachteil der Röhre ist neben den hohen Stromaufnahme und der Wärmeentwicklung die Mikrofonie. Wenn ich 1.600 Röhren, wie sie zum Beispiel in unserer Röhrenkonsole stecken, mit großen Lautsprechern beschalle, rappelt es sprichwörtlich im Karton. Da man am Sender nichts dagegen tun kann, außer leiser hören, muss eine Maßnahme am Empfänger eingeleitet werden. Die Regeln der Schwingungslehre deuten uns, dass man den Empfänger durch Masse beruhigen kann, also zum Beispiel durch Einbetonieren. Ich habe einen Moment lang darüber nachgedacht, dann aber die Idee aus optischen und statischen Gründen wieder verworfen. Eine SQ Röhre erzeugt auf einem Rütteltisch mit zweieinhalb G ein mikrofonisches Signal von etwa hundert Millivolt.

Das ist eine Menge, aber immer noch wenig im Vergleich zu manch anderen Typen, die auf dem Markt verfügbar sind. Röhrengeräte werden zumeist unter Laborbedingungen gemessen, aber nicht im beschallten Zustand. Es wäre interessant zu untersuchen, was mit einem Röhrengerät passiert, wenn es im Studio selbst mittlerem Schalldruck ausgesetzt wird. Aufgrund dessen eliminieren wir Störsignale durch Mikrofonie durch einen symmetrisch aufgebauten Signalweg. Da die Hauptstörkomponenten nicht höher als 4 kHz reichen, ist der Lösungsweg nicht einmal sonderlich komplex.

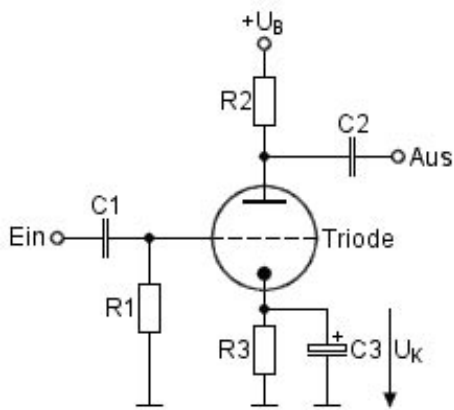
Die Röhre – wie funktioniert sie?

In einem Kubikmillimeter Kupfer sind rund 60 Trilliarden freie Elektronen vorhanden. Diese sind aber in das Material eingebunden und nur ein verschwindend geringer Teil tritt am Rand aus. Das Prinzip der Röhre basiert auf einer Kathode (altgriechisch ‚Abstieg‘), die man deshalb so nennt, weil sie von der tatsächlichen Stromrichtung ausgeht und dort ein Elektronenüberschuss angelegt wird. Wenn ich das Ganze aus der Sicht einer herkömmlichen Batterie betrachte, hat diese an ihrem Pluspol einen Elektronenmangel und an ihrem Minuspol einen Überschuss. Es gibt für die Konstruktion der Kathode verschiedene Materialansätze – Wolfram, Metallfilmoxyd, oder Bariumoxyd, um einige Beispiele zu nennen. In die Kathode wird ein Faden aus Wolfram oder Nickel als Heizwendel isoliert eingebracht. Durch die Erhitzung wird die Wärmeenergie so weit erhöht, dass sich die Elektronen stark bewe-

André Christ arbeitete in den 80er und 90er Jahren als Energieanlagen-elektroniker und Radio- und Fernseh-techniker und absolvierte sein Studium im Fachbereich Elektrotechnik in Köln. Seit 1995 ist er Geschäftsführer und Entwicklungsleiter seines eigenen Unternehmens ACE S+R Technik und hat sich auf die Entwicklung elektronischer Schaltungen und Geräte im Bereich Steuerungs-, Unterhaltungs- und Kommunikationstechnik sowie Studio-, Rundfunk- und Röhrentechnik spezialisiert. Weitere fachliche Ausrichtungen sind Embedded Systems, Microcontroller, Digitalelektronik, CAD Konstruktion und Audiomes-

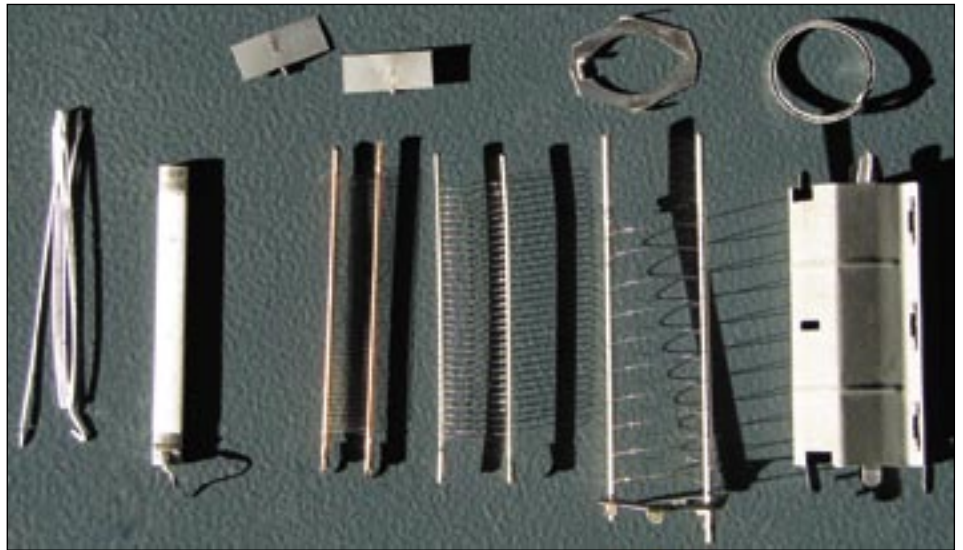


sung. Er ist leitend für die Entwicklungen aller Solid Tube Audio Produkte wie zum Beispiel die Röhrenkonsole Everest C3 und des Röhren-Equalizers Etna E1 verantwortlich.



Röhren-Prinzipschaltbild

gen müssen und aus der Oxidschicht austreten. Dies passiert allerdings in einem sehr engen Bereich am Material. Wir nennen das zum besseren Verständnis ‚Elektronenwolke‘. Ordne ich nun in einem Vakuum eine Anode (altgriechisch ‚Aufstieg‘) an, die technisch gesehen den Elektronenmangel beziehungsweise Pluspol repräsentiert, beginnen sich die Elektronen in diese Richtung zu bewegen. Je höher die Anodenspannung, desto größer die Elektronen-Mangel/Überschuss-



Die Einzelteile einer Röhre mit Kathode, Anode, Gitter und Heizung

differenz und desto mehr Elektronen werden angezogen. Es entsteht ein Stromfluss der irgendwann durch den Sättigungsbereich begrenzt wird. Wenn man sich diesen Vorgang vor Augen hält, versteht man auch, warum die Röhre so gut mit kurzen Impulsen umgehen kann. Eine herkömmliche Kleinsignal-Röhre mit einem Leistungs-

bereich von drei Watt und ungefähr 20 mA Anodenstrom ist in der Lage, für eine kurze Zeit auch mal 500 mA Anodenstrom aufzubringen. Warum ist das so? In der Kürze eines Impulses kann vorübergehend eine große Menge von Elektronen abgesaugt werden, ohne dass eine Sättigung entsteht. Direkt nach diesem Impuls ist die Katho-



Röhren-Heizung in der Detailansicht

de zwar nahezu leeresagt, aber die Übertragung hat trotzdem stattgefunden. Nun wollen wir dieses Gebilde möglichst auch noch steuern, was mit einem Gitter umgesetzt wird, das sich zwischen Kathode und Anode befindet, aber näher an der Kathode sitzt. Wenn wir dieses Gitter, das möglichst homogen um die Kathode gespannt wird und ausreichend durchlässig ist, dank einer negativen Vorspannung bezogen auf die Kathode mit Elektronen besetzen, behindern wir die Elektronen in ihrem Durchflussverhalten. Dadurch ermöglicht das Gitter als regelbare Elektronenbarriere eine Steuerung des Anodenstroms. Im Praxisfall lege ich damit den Gleichstromarbeitspunkt fest und überlagere nun am Gitter die Signalwechselspannung. Man sucht sich zur audiophilen Signalverarbeitung prinzipiell den linearsten Bereich der Eingangskennlinie und bestimmt danach die Parameter wie die Spannung an der Anode, die Vorspannung am Gitter und den daraus resultierenden Strom, der faktisch immer durch die Röhre fließt, auch ohne Aufmodulation von Audiosignalen. Wenn ich zusätzlich einen Anodenwiderstand einfüge, kann ich aus dem Anodenstrom eine Spannungsverstärkung ableiten. Betrachten wir dazu abschließend ein bildhaftes Beispiel. Nehmen wir an, wir hätten einen Glaskolben, den wir unten mit Wasser füllen. Wir gehen davon aus, dass dieses Wasser die Kathode ist. Darun-

ter stellen wir einen Bunsenbrenner, der die Heizung repräsentiert. Irgendwann entsteht durch die Erhitzung Wasserdampf, den wir uns als die Elektronenwolke vorstellen. Oben wäre als Anode eine Öffnung angebracht mit einem Rohr bis zum unteren Teil des Kolbens. Durch die Öffnung wird der Wasserdampf abgeführt, schlägt sich als Kondensat nieder und wird dem System wieder zugeführt. In etwa so kann man sich auch die Vorgänge innerhalb einer Röhre vorstellen.

Vereinfacht gesprochen kann man in die Röhre hineinschauen und zählen, wie viele Elektronen sich von Kathode (-) zur Anode (+) bewegen. Das ist die Kenngröße

für den elektrischen Strom. Wenn dort innerhalb einer Sekunde $6,24 \times 10^{18}$ Elektronenladungen vorbeifließen, erhält man einen Strom von 1 Ampere. Damit kann man zunächst einmal nicht viel anfangen, weil wir daraus eine Spannungsverstärkung machen wollen. Also schalten wir einen Anodenwiderstand in Reihe zu unserer Röhre. Da die Spannung an einem Widerstand dem

Ohmschen Gesetz folgt, $U = R \times I$ (Spannung = Widerstand \times Strom), bedeutet das bei konstantem R, dass die Spannung sich äquivalent zum Stromfluss durch die Röhre verhält ($U \sim I$). Zwischen Röhre und Widerstand kann ich so eine Spannung abgreifen. Mit dieser Spannung haben wir ein Problem, denn darin befindet sich auch ein Gleichspannungsanteil, denn auch ohne Eingangssignal fließt dort ein Ruhestrom bestimmt durch unseren Arbeitspunkt. Diesen Anteil muss ich entkoppeln, nicht immer, aber manchmal, nämlich dann, wenn ein Eingang folgt, der diese Gleichspannung nicht sehen darf, weil sie den Arbeitspunkt der nächsten Stufe bestimmen würde. Man verwendet dazu einen Koppelkondensator, der sich für Gleichspannung wie ein offener Schalter und für Wechselspannung leitend verhält. Übrig bleibt also die reine verstärkte Wechselspannung.

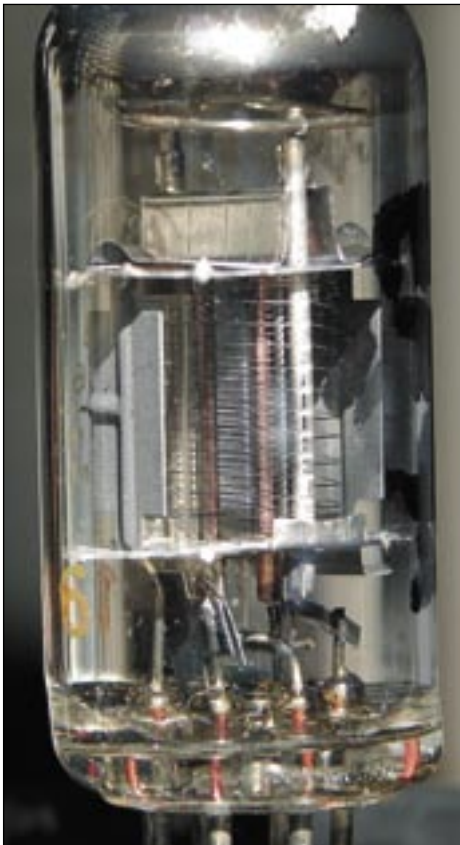
Das Netzteil einer Röhrenschtaltung und seine schwierige Aufgabe

Wenn ich das so betrachte, muss ich mich auch mit dem Netzteil einer Röhrenschtaltung auseinandersetzen. Am Anodenwiderstand liegt ja nicht, wie der Einfachheit halber angenommen, eine Batterie, was übrigens gar nicht so schlecht wäre, sondern eine sehr hohe Gleichspannung. Der Betriebsbereich einer Kleinsignalröhre liegt etwa im Bereich von 150 bis 250 V. Die vom



Eine Röhrenschtaltung bei der Arbeit

Fortsetzung auf Seite 47



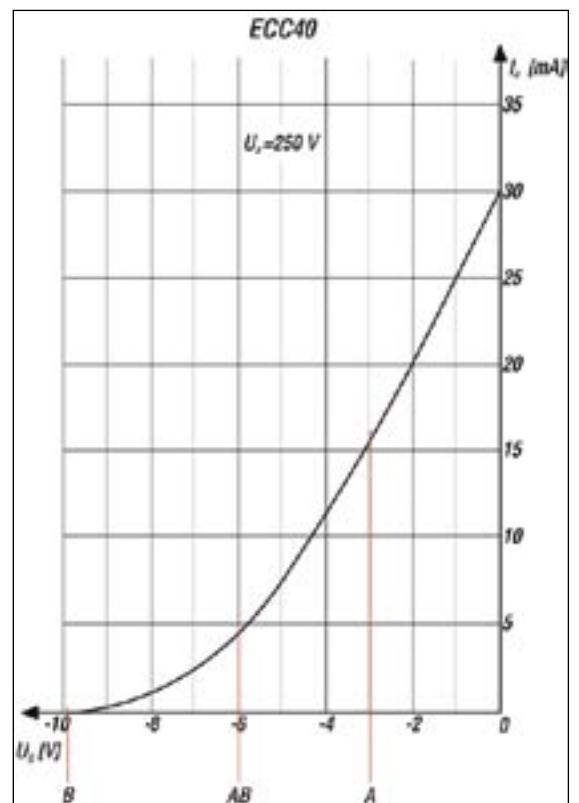
Netzteil erzeugte Spannung ist ja nicht einfach da, ohne dass sie nicht auch bestimmten elektrischen Parametern unterläge. Jede Spannungsquelle hat einen Innenwiderstand, den man statisch und dynamisch betrachten kann. Statisch, also ohne veränderliche Last betrachtet, muss der gelieferte Strom konstant sein, was auch eine Spannungsquelle mit recht hohem Innenwiderstand bewerkstelligen könnte. Dies würde jedoch bei einer wechselnden Last eine erhebliche Spannungsänderung zur Folge haben, je nachdem wie schnell und wie groß die Änderung dieser Wechselstrombelastung aussieht, denn dann muss innerhalb einer relativ kurzen Zeit viel Energie aufgebracht werden, die Aufgrund des hohen Innenwiderstands der Quelle nicht zur Verfügung steht. Wenn ich ein Röhrennetzteil konstruiere, ist es wichtig, es möglichst niederohmig zu gestalten, um damit den wechselnden Belastungsströmen ohne nennenswerte Änderung der Versorgungsspannung entgegen zu wirken. In unseren Schaltungen verwenden wir dazu sogenannte Power MOSFETs. Aber auch diese müssen, wenn sie etwa von beispielsweise 600 V Sourcespannung auf 390 V Ausgangsspannung herunterregeln sollen, 210 V in Wärmeenergie umwandeln. Dafür muss ein bestimmter Widerstand im MOS-

FET aufgebaut werden und es entsteht dadurch wieder eine Anfälligkeit für dynamische Belastungen. Abhilfe schafft ein aktiver Regelkreis, der die Spannung am Ausgang misst, mit einer Referenzspannung vergleicht und ständig so schnell nachregelt, dass diese Größe im Grunde keine Rolle mehr spielt. Eine aktive Regelung kann somit den dynamischen Innenwiderstand scheinbar klein halten und die Basis für eine saubere Spannung ist damit geschaffen. Erst jetzt kann ich mehrere Röhrenstufen versorgen, die sich sonst gegenseitig beeinflussen würden und in der Regel auch ein unterschiedliches Spannungsniveau benötigen. Durch verschiedene Röhrenstufen fließen jedoch zu bestimmten Zeitpunkten verschiedene Ströme. Bei symmetrischen Schaltungen wie den von uns verwendeten, arbeitet eine Röhre die positive Halbwelle ab, während die andere für die negative Halbwelle zuständig ist. Wenn eine Röhre gerade mehr Strom benötigt, braucht die andere entsprechend weniger. Diese Paare legt man an eine Quelle, wodurch der resultierende Strom nahezu konstant bleibt. Meist benötigen wir zusätzlich noch unterschiedliche Spannungsniveaus. Eine Eingangsstufe benötigt eventuell 160 V und die letzte Stufe in dieser Kette vielleicht 220 V. Da Power MOSFETs relativ stark rauschen, müssen wir diese zudem noch aufwendig rauschfiltern. Das möchte ich an dieser Stelle aber nicht detaillierter ausführen. Es bedarf jedoch noch einiger Anstrengungen, um das Rauschen der Hochspannungsquelle vom Audiosignal fernzuhalten.

Kennlinie

Die Eingangskennlinie der Röhre ähnelt der einer steilen Skiabfahrtsstrecke. Wie wir wissen, beschreibt eine Kennlinie die Abhängigkeit zweier Größen. Wenn man von einer linearen Abhängigkeit oder Proportionalität spricht, ist eine solche Kennlinie immer eine Gerade und man kann einfach damit rechnen. Schaut man sich einmal das Eingangskennlinienfeld auf dem ersten Quadranten einer Röhre an, ist auf der y-Achse der Anodenstrom in Abhängigkeit zur Gitterspannung (x-Achse) aufgetragen. Wenn wir an der Anode eine Spannung anlegen, die Kathode be-

triebsbereit ist und ihre Elektronenwolke gebildet hat, werden ohne Gitter bereits jede Menge Elektronen abgesaugt. Das heißt, es fließt auch ein Strom, wenn kein Gitter verwendet wird. Die Röhre stellt dabei eine Einbahnstraße dar, da sie nicht wirklich Wechselspannung verarbeiten, sondern Strom nur in eine Richtung befördern kann, von der Kathode zur Anode (Funktionsprinzip einer Diode). Wir haben also das Eingangskennlinienfeld, den Anodenstrom I_a und die Gitterspannung $-U_g$, die wir im negativen Bereich der x-Achse abtragen müssen. Da wir an das Gitter eine negative Vorspannung anlegen, wird es mit Elektronen besetzt, wodurch die Elektronen zur Kathode zurückgedrängt werden. Nehmen wir uns ein Gleichspannungsnetzteil und stellen dieses jetzt einmal auf -10 V ein. Nun werden wir feststellen, dass überhaupt kein Anodenstrom $I_a = 0$ mA mehr fließt. Im Diagramm finden wir den Strom I_a in mA auf der y-Achse und die Spannung U_g in V auf der x-Achse im negativen Bereich, der in unserem Beispiel bei -10 V anfängt. Mein erster Messpunkt der Kennlinie befindet sich damit auf dem Wert 0 mA der y-Achse und auf dem Wert -10 V der x-Achse. Jetzt erhöhe ich die Gitterspannung U_g und stelle fest, dass ein Anodenstrom I_a zu fließen beginnt. Je mehr ich U_g erhöhe, auf -5 V und darüber, entwickelt sich eine Kennlinie, die erst kurven-



förmig ansteigt und dann in einen relativ linearen Bereich übergeht. Um den optimalen Arbeitspunkt zu definieren, suchen wir einen mittleren linearen Bereich, in dessen Mitte mein Arbeitspunkt liegen soll, denn je höher oder niedriger dieser Arbeitspunkt liegt, desto weniger Signalpegel kann ich verzerrungsfrei verarbeiten.

Gruppenlaufzeit

Aus persönlichem Interesse habe ich Messungen bezüglich der aus dem Anwenderkreis oft angemerkten Gruppenlaufzeit-Problematik durchgeführt. Unser EQ stand dabei stellvertretend für die Analogtechnik im Allgemeinen als Pate zur Verfügung. Eine Messung bei bewusster linearer Verzerrung durchzuführen, ist natürlich eher unüblich und ebenso fragwürdig, da es in der Praxis an einem adäquaten Referenzsignal mangelt, auf das sich die neue Phasenlage ungünstig beziehen könnte. In unserer Konsole wird zum Beispiel aufgrund dessen der EQ im Bypass nicht aus der Signalkette genommen, sondern lediglich von den Filtern entkoppelt. Ebenso sollte beachtet werden, dass die entsprechenden Frequenzbandbe-

reiche in ihrer Amplitude stark beeinflusst werden und somit in unserer Wahrnehmung eine völlig andere Bewertung erhalten.

Sofern sich das Gerät nicht im Bypass befindet, das Signal jedoch trotzdem alle aktiven Stufen durchläuft, erhalten wir einen gewohnten, eher deutlich besseren Phasengang bei unserem EQ, als bei vergleichbaren analogen Geräten. Die Phasenunterschiede zwischen den beiden Kanälen sind in dieser Situation nicht messbar.

Wir liegen bei 20 Hz deutlich unter 10 Grad und bei 20 kHz bei -25 Grad. Unsere Filterbänder steuern durch ihre Reihengesamtimpedanz die Verstärkung der entsprechenden Röhrenstufen. Da im ansteigenden und im absteigenden Teil einer Bandpasskurve jeweils mehr der kapazitive beziehungsweise der induktive Teil des Filters wirksam wird, ist es klar, dass sich in nicht linearer Abhängigkeit von der eingestellten Verstärkung die phasenverschobenen Scheinwiderstände um den Resonanzpunkt herum in der Phasenlage bemerkbar machen. Die Phasenlage der eigentlichen Resonanzfrequenz wird dabei nur wenig beeinflusst, da hier im Idealfall die Blindwiderstände der Kapazität und Induktivität 180 Grad zueinander ausgerichtet sind und somit eine resultierende 0 Grad Impedanz bilden. Reale Bauteile sind jedoch nicht ideal und es kommt durch die geometrische Addition der realen Widerstandsanteile zwar zu geringen Verschiebungen, jedoch zu keinen nennenswerten.

Wir betrachten also zum Beispiel die Frequenzen, die nahe der Resonanzfrequenz und im mittleren Einflussbereich des jeweiligen Bandpasses liegen. Bei Erhöhung der Verstärkung bildet sich im Phasengang erwartungsgemäß

ein liegendes S um den Resonanzpunkt mit dem ersten Bauch nach oben, da hier der kapazitive Anteil wirkt. Bei entsprechender Abschwächung beginnt das liegende S mit dem Bauch natürlich nach unten.

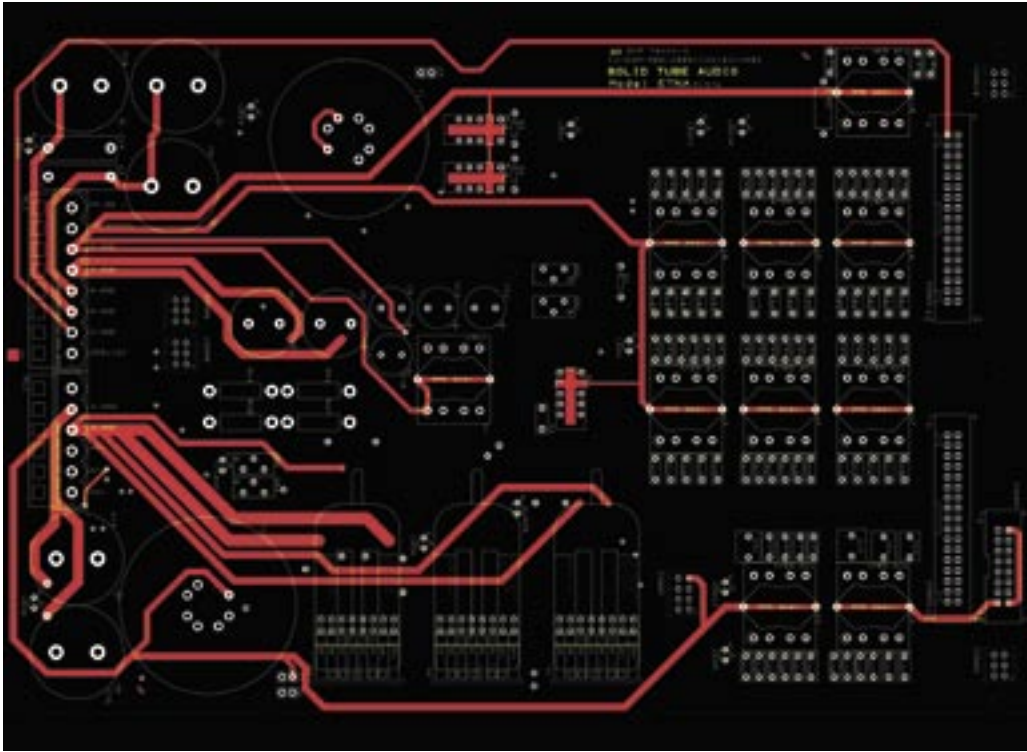
Zwei Beispiele sollen uns die Messung weiter erläutern. Ich habe dabei die deutlichsten Abweichungen mit einem Audio Precision Mess-System manuell herausgesucht, da sich die Veränderung um den Resonanzpunkt bewegt und von der Bandbreite abhängig ist. Die Verstärkung weiter als +10 dB zu erhöhen ergibt nur wenig Sinn, da sich sonst die Frage stellt, welche der Gruppenlaufzeiten aufgrund der Verstärkung die Signaldominante ist.

Gain 10 dB bei 1kHz, Delta Phi Grad bei 650 Hz = 28 Grad, entspricht Delta t = 0.12 ms.
Gain 10 dB bei 10 kHz, Delta Phi Grad bei 12,5 kHz = 26 Grad, entspricht Delta t = 0,0072 ms.

Nun müssen wir die entstehenden Gruppenlaufzeiten noch interpretieren und sofern ich mich auf die Tabellen von ‚Blauert und Laws‘ berufe, deren Gültigkeit wir voraussetzen, sind wir um den Faktor 16, beziehungsweise den Faktor 277 mal kleiner als die entsprechend dort angegebene Wahrnehmungsschwelle und somit auf der sicheren Seite. Anders sähe das möglicherweise bei extrem unterschiedlichen Einstellungen des gleichen oder eines ähnlichen Signals aus, was in der Praxis nicht relevant ist. Ebenso handelt es sich um eine nicht-lineare, sehr dynamische und frequenzabhängige Laufzeitveränderung, die bei vielen möglichen Einstellungen eine Resultierende bildet, die die Gesamtphasenlage sogar optimiert. Trotzdem stellt sich dadurch keine veränderte Tiefenortung oder dergleichen ein und ist deshalb auch nicht als ursächlich zu betrachten.

Masseführung und ihre Zusammenhänge

In meiner 15 jährigen Laufbahn als Elektronikentwickler habe ich gelernt, wie essentiell das richtige Verständnis für eine einwandfreie Masseführung ist. Ich halte diesen Aspekt in der Studioteknik ganz allgemein und auch bei der Entwicklung unserer Röhrengeräte für außerordentlich wichtig. Die Masse oder Rückleitung eines Systems hat dabei die gleiche Bedeutung wie dessen Zuleitung und da in einer solchen Reihenschaltung der zentrale Massepunkt ein beliebiger Punkt sein kann, muss dieser über-



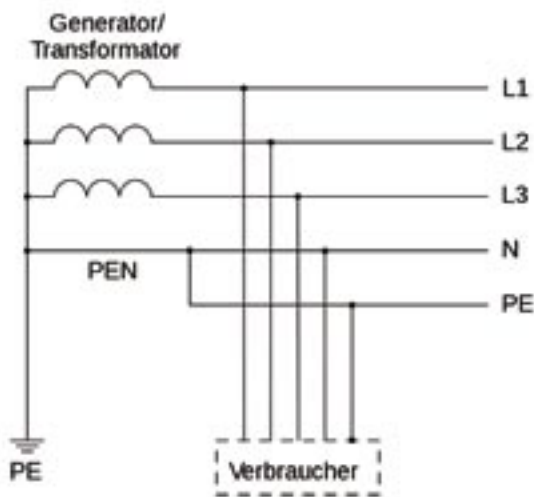
Masseführungslayer des Solid Tube Audio Etna E1 Röhren-Equalizers

legt gewählt sein. Er dient als Bezugspunkt und muss möglichst an der gleichen Stelle

sitzen, wo sich der Bezugspunkt aller anderen Geräte befindet. Sofern ich Geräte gal-

vanisch oder optisch getrennt voneinander verbinde, spielt es eigentlich überhaupt keine Rolle, wo sich dieser Punkt befindet, benutze ich jedoch zum Beispiel Quasi-Floating-Ein/Ausgänge, muss dieser Bezugspunkt stimmen. Es gibt zwei wichtige Betrachtungen bei der Masseführung: Das eine ist die Wahl eines festen zentralen Bezugspunktes, den auch alle anderen Geräte sehen, das andere ist der Tatbestand, dass der eigentliche Erdungspunkt nicht direkt vor Ort sein kann, sondern lediglich in der Nähe. Ein gemeinsamer Punkt, auf den ich alles beziehe, entsteht in einem Studio fünf Meter unter der Erde außerhalb des Gebäudes im Betriebserder.

An dieser Stelle muss man ein klein wenig ausholen. In Deutschland stellen die Energieversorger ein sogenanntes TN-C-S-Netz, das folgendermaßen beschaltet ist: Wir haben ein Kraftwerk, das kinetische Energie erzeugt. Wir führen diese Energie auf einen Drehstromgenerator, dessen drei



Prinzipialschaltbild des deutschen TN-C-S-Netzes

Wicklungen einen Sternpunkt besitzen, der geerdet wird. Es gibt dort also ebenfalls einen Betriebserder. Für die Rückführung des Stroms vom Verbraucher zum Kraftwerk wird nun auch die Erde genutzt. Ich muss allerdings noch erwähnen, dass bei einer ideal gleichen Belastung der drei Phasen L1, L2 und L3 sich der Strom im Nullpunkt ausgleicht und es keines Rückstroms bedarf.

Nun denkt man, dass Erde überhaupt nicht leitet, aber etwas tiefer ist diese feucht, besitzt einen riesigen Querschnitt und leitet dann schon. Damit dies aber nicht der einzige Rückstromweg bleibt, wird zusätzlich eine Leitung zum Verbraucher geschickt. Das wird innerhalb des TN-C-S-Netzes mit einer PEN-Leitung gemacht. In jedem Haus und in jedem Studio wird dieser Leiter wieder aufgespalten in PE und N und wiederum dem Betriebserder des jeweiligen Zielortes zugeführt. Alle Wasserleitungen und ähnliches bilden ein gigantisches Erdungssystem. Das Haus nebenan ist ebenso daran beteiligt. Je ballungsdichter

man lebt, desto niederohmiger ist die Erde. Für uns ist der erste und beste Bezugspunkt im Grunde genommen der Betriebserder im Kernkraftwerk, jedoch den Tatbestand so zu betrachten, ist zu abstrakt. Wir schieben ihn ein wenig näher zu uns, um die Thematik greifbarer zu machen. Da das Erdreich bezogen auf den PEN-Leiter immer wieder flächendeckend verteilt ist, bekommt man tat-

sächlich eine sehr niederohmige Erde, die durchaus im Bereich von 1 Ohm liegen kann, wenn wir zusätzliche Betriebserder anlegen, was für ein Studio durchaus sinnvoll ist. Dadurch definiert sich nun der nächstliegende Erdungspunkt, den ich im Studio als zentralen Erdungspunkt festlege. Alle Geräte, die daran angeschlossen sind, ob nun über zentrale Rack-Erdung oder der PE der dreiadrigen Zuleitung, beziehen sich dann auf diesen Punkt. Von dort aus kann man noch weiter gehen, bis an die Unterverteilung oder

das Mischpult, das in der Regie steht. Dort wird wieder aufgespalten und die allseits bekannte sternförmige Erdung wird weiter fortgesetzt. Man muss sich nun vorstellen, dass alle Geräte, die nicht auf dem gleichen Sternpunkt aufliegen, ein unterschiedliches Bezugsniveau besitzen. Warum ist das so? Das Problem liegt darin begründet, dass sowohl der zentrale Erdungspunkt als auch alle Erdungsleitungen zu den Racks oder Einzelgeräten einen Widerstand besitzen, der trotz hoher Querschnitte nicht unerheblich ist. Wie wir vorhin schon erfahren haben, hat ein Widerstand bei Stromfluss auch einen Spannungsabfall zur Folge. Dieser Spannungsabfall auf den Erdungsleitungen begründet die unterschiedlichen Bezugsniveaus. Abhilfe schaffen möglichst kurze Erdungsleitungen oder große Querschnitte, wobei bedacht werden muss, dass digitale Geräte oft hochfrequente Erdungsströme erzeugen. Hochfrequenz fließt in einem Leiter durch den sogenannten Skin Effekt nur am Rand und wir verlieren dadurch praktisch den größten Teil des Leiterquerschnitts.

Nun gehen wir noch einen Schritt weiter in eine Schaltung hinein, um es noch greifbarer zu machen. Beispielsweise eine Röhrenstufe, die sich über eine Leiterbahn erdet, die erst einmal bis an das Ende der Platine muss und dort auf einen Stecker trifft, mit dem sich ergebenden Übergangswiderstand. Es folgt ein kurzes Leitungstück mit einer Klemme, noch einem Übergangswiderstand und erst dann bin ich auf meinem zentralen Erdungspunkt, der hinten an der Geräterückseite aufliegt. Wenn ich von diesem erstgenannten Punkt (direkt an der Röhrenstufe), an eine weitere Stufe gehe, erzeugt der Rückstrom der ersten Stufe einen Spannungsabfall auf dem gesamten Rückleiter und dessen Widerstände bis zu meinem ersten zentralen Erdungspunkt. Jede weitere Stufe, die sich vom Ende einer Rückleiterkette ihr Bezugspotential holt und nicht wieder vom Ursprungsort, schwingt auf dem Spannungsabfall aller vorherigen Stufen mit. Das heißt, sie hat keinen eigenen Bezug mehr. Das können nur ein paar mV sein, bei Leistungsstufen aber auch schnell viel mehr. Wir verwenden deshalb in unseren Geräten ausschließlich 90 µm Kupferschichtdicke bei den Platinen, um niederohmige Leiterbahnen zu realisieren (Standard sind 35 µm). Wir verdoppeln also die Kupferschichtdicke deutlich, damit wir das Problem reduzieren, jedoch beziehe ich zusätz-

lich viele Punkte der verschiedenen Stufen einzeln, das heißt, sie bekommen alle eine eigene Leiterbahn als Bezugspunkt, ohne dass sich mehrere Stufen eine teilen, wie das herkömmlicherweise oft gemacht wird. Wenn man bestimmten Herstellern genauer auf die Finger schaut, wird man feststellen, dass nur eine Leiterbahn um die gesamte Schaltung herumgeführt wird, von der nach Herzenslust abgegriffen wird. Das ist für eine absolut hochklassige Masseführung indiskutabel. Wir zum Beispiel benutzen nur für die Masseführung auf unseren mehrlagigen Platinen einen eigenen Layer, der nicht als große Kupferfläche, ein sogenannter Power- oder Groundplane ausgelegt ist. Letzteres wird ebenso häufig angewendet, ist jedoch aufgrund der mangelnden Kontrolle von Strömen auf einer Fläche nicht akzeptabel. Durch Schichtdickentoleranzen im Kupferlayer können sich zum Beispiel Ströme kanalisieren. Es ist bekannt, dass man niemals eine Erdschleife bilden darf und die Leitungsschirmung in der Regel einseitig offen bleiben muss, aber für die Schaltungstechnik gilt natürlich das gleiche Prinzip. Dabei gibt einen kritischen Punkt bei der Masse-

führung, nämlich dort, wo wir auf eine Bedienoberfläche treffen. Sobald wir ein Bedienelement in diese Oberfläche einarbeiten, muss dieses geschirmt sein. Es darf diesen Schirm jedoch nicht von der Platine bekommen, weil es ja mit dem Gehäuse verschraubt wird. Das Gehäuse wiederum ist mit dem Sternpunkt verbunden und der ‚Masseloop‘ wäre bei einer Verbindung geschlossen.

Abspann

In der heutigen Studioteknik wird der Röhre aus meiner Kenntnissicht eine falsche Rolle zugewiesen. Alles, was unter dem Oberbegriff ‚Vintage‘ zur Klanggestaltung in Studios eingesetzt wird, ist im Grunde – rein technisch betrachtet – ein nicht zulässiger Anwendungsfall im Grenzbereich eines Bauteils, nämlich der Röhre, die dank ihres Funktionsprinzips zu Spitzenleistungen bei der unverfälschten Übertragung von Audiosignalen viel mehr geeignet ist, als ein belangloses Dasein in der Rolle eines Klirrfaktorlieferanten zu fristen. Eine Röhrenschaltung ist verhältnismäßig einfach, die Röhre kann Transienten wie keine andere Komponen-

te übertragen und bietet außerdem auch noch einen unglaublich hohen Dynamikbereich nebst Übersteuerungsreserve. Klirrfaktor lässt sich mit Halbleitermitteln wesentlich preiswerter und auch stromsparender kontrolliert erzeugen, wie einige Entwicklungen aus diesem Bereich unter Beweis stellen. Dass viele Vintage-Geräte, die von Toningenieuren aufgrund ihres Klangcharakters über den grünen Klee gelobt werden, ihren Sound aus historisch gesehen unzureichenden Möglichkeiten des Aufbaus einer Röhrenschaltung beziehen, täuscht nicht darüber hinweg, dass mit einer Röhre wahre Wunderdinge vollbracht werden können. Sie ist mit ihren Eigenschaften im audiophilen Bereich der Halbleitertechnik weit überlegen. Es wäre daher eine begrüßenswerte Entwicklung, wenn die Röhre weniger aufgrund ihres Grenzbereichsverhaltens zum Einsatz käme, sondern weil man mit ihr eine Signalqualität realisieren kann, die über jeden Zweifel erhaben ist. Auch in Zukunft werde ich weiter forschen und das Eindeutige nochmals hinterfragen. Wir haben so viele Ideen, freie Gedanken und stehen gerade erst am Anfang. ■