

Vorwort



Ganz wesentlich ist, dass die im Folgenden beschriebenen Phänomene nicht auf HiFi-Verstärker beschränkt sind, sondern alle Verstärker betreffen, die in Kollektorschaltung (auch Emitterfolger genannt) arbeiten, also auch Verstärker, die in der Regeltechnik eingesetzt werden und dort Magnetventile oder Motoren antreiben.

Dieser Aufsatz hat nur deshalb HiFi-Verstärker zum Thema, weil Nicht-Elektroniker davon eine gewisse Vorstellung haben und ich jahrelang auf diesem speziellen Gebiet gearbeitet habe. Ich lebe inzwischen im Ruhestand, habe aber während meiner aktiven Zeit nicht wirklich alle Ursachen für diese Phänomene gefunden, obwohl mir die Phänomene selbst bekannt waren.

Einführung

Bei einem dynamischen Lautsprecher, und wahrscheinlich bei nicht dynamischen Lautsprechern auch, ist die Impedanz bei Resonanzfrequenz am größten. Er verhält sich in dieser Beziehung wie ein Parallelschwingkreis. Unterhalb der Resonanzfrequenz ist er also induktiv, oberhalb von dieser ist er kapazitiv. Der Gleichstromwiderstandsanteil verhindert eine Phasendrehung an die 90 Grad heran.

Da der Lautsprecher unterhalb der Resonanzfrequenz induktiv ist, steigt der Lautsprecherstrom langsamer an als von der Steuerspannung vorgegeben. Deshalb scheint der Lautsprecher unterhalb der Resonanzfrequenz nicht genug Strom zu bekommen.

Oberhalb der Resonanzfrequenz ist der Lautsprecher kapazitiv und eine Kapazität lässt den Strom frequenzabhängig durch. Alle Stellglieder, die eine Spule enthalten, verhalten sich da ähnlich und wirken induktiv.

Bei Mehrweg-Lautsprechersystemen kann dieses induktive Verhalten jedoch in jedem Weg auftreten.

Diese Erkenntnisse über Lautsprecher sind möglicherweise nicht neu.

Die Quintessenz dieser Überlegungen ist, dass ein als Emitterfolger geschalteter Verstärker einen komplexen Widerstand nur bedingt antreiben kann. Dieser komplexe Widerstand muss nicht ein Lautsprecher sein, sondern kann auch ein Stellglied der Regeltechnik sein. Lautsprecher allerdings sind je nach Frequenz induktiv, kapazitiv und manchmal auch ohmisch, was auf normale Stellglieder ja nicht zutrifft. Lautsprecher sind insofern besonders schwierig zu beherrschen.

Mir ist bewusst, dass ich mit meinen Erkenntnissen den Widerspruch in Teilen der Schulwissenschaft hervorrufen werde - und wahrscheinlich auch den einiger Techniker. Allgemein gilt nämlich der Emitterfolger als idealer Impedanzwandler und perfekter Treiber für Lautsprecher. Allerdings nicht, wenn er stark gegengekoppelt ist. Warum das so ist, wird weiter unten im Absatz „Gegenkopplung“ beschrieben.

Über Verstärker

In der HiFi-Szene existiert eine Gruppe Anhängern von Röhrenverstärkern. Röhrenverstärker „klingen“ besser - was für ein Nonsense. Verstärker sollen nicht klingen, sondern möglichst genau reproduzieren. Im Folgenden werde ich trotzdem von Klang bei Verstärkern sprechen, weil dies die Sache vereinfacht. Röhrenverstärker klingen besser als Transistorverstärker, weil übliche Transistorverstärker das Tonsignal nicht perfekt reproduzieren können. Warum das so ist, soll im Folgenden erörtert werden.

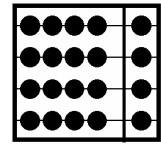
Eine Röhre hat als Triode drei Elektroden und diese sind den drei Elektroden des Transistors sehr ähnlich. Dies ist die Anode gleich dem Kollektor beim Transistor, das Gitter gleich der Basis beim Transistor und die Kathode gleich dem Emitter beim Transistor.

Meistens wird eine Röhre am Gitter (mit Spannung) gesteuert, der Transistor an der Basis (mit Strom). Allerdings werden MOS-FET und Sperrschicht-FET am Gate gleich dem Gitter an der Röhre auch mit Spannung gesteuert. Dieser Unterschied zwischen Röhre und Transistor ist jedoch in dem beschriebenen Zusammenhang bedeutungslos. Wesentlich ist, dass beim Röhrenverstärker der Lautsprecherstrom aus der Anode kommt, was ja beim Transistor dem Kollektor entspricht.

Beim üblichen Transistorverstärker wird der Lautsprecherstrom jedoch am Emitter entnommen, was bei der Röhre der Kathode entspricht. Diese Schaltung wird allgemein als Emitterfolger bezeichnet, was bei der Röhre dem Kathodenfolger entspricht. Die richtigen Bezeichnungen sind Kollektorschaltung bzw. Anodenschaltung.

Bei dieser Schaltung folgt die Emitterspannung der Basisspannung, deshalb Emitterfolger.

Aber die Spannung am Emitter folgt nur dann genau der Basis, wenn der Arbeitswiderstand ein rein ohmscher ist - ohne induktiven oder kapazitiven Anteil. Innerhalb einer elektronischen Schaltung ist dies meistens auch zu bewerkstelligen - typisch für Operationsverstärker-Schaltungen.



Aber wie vorher beschrieben, verhalten sich Lautsprecher nicht wie Tauchsieder oder Bügeleisen, sondern wie Parallelschwingkreise. Da der Strom in einem Lautsprecher nur bei Resonanzfrequenz nicht phasenverschoben ist, wird der Transistor in dieser Emitterfolgeschaltung am Emitter als Reaktion auf das Basissignal meistens phasenverschoben zum Basissignal angesteuert. Der Emitter folgt der Basis nicht - allenfalls nur teilweise.

Diese Phasenverschiebung wird um so kleiner, je größer der ohmsche Anteil an der Lautsprecherimpedanz ist. Deshalb kann eine Beschaltung des Lautsprechers mit zusätzlichen Widerständen durchaus eine Verbesserung bringen. Allerdings wird durch diese Maßnahme der Wirkungsgrad schlechter. Eine Klasse A-Schaltung macht im Prinzip nichts anderes. Sie verheizt eine große elektrische Leistung innerhalb des Verstärkers an einem ohmschen Widerstand, meistens an den Endtransistoren selbst, was eine sehr große Kühlleistung erfordert.

Der phasenverschobene Lautsprecherstrom macht sich dann am Emitter nicht mehr so stark bemerkbar, weil die Endtransistoren von vorne herein mit einer großen ohmschen Belastung arbeiten. Das geht so weit, dass es Transistorverstärker gibt, die im A-Betrieb 1000 Watt verheizen, um dann mit 10 Watt Musik hören zu lassen.

Anders ist die Sache bei einem Röhrenverstärker. Dieser liefert den Lautsprecherstrom an der Anode, was beim Transistor ja dem Kollektor entspricht. Ein Röhrenverstärker in Klasse A-Betrieb klingt jedoch nicht wesentlich besser als der selbe Verstärker, wenn dieser auf AB-Betrieb eingestellt ist. Die Übernahmeverzerrungen spielen auch beim AB-Betrieb keine Rolle.

Ein Röhrenverstärker arbeitet meistens fast ohne Gegenkopplung, weil eine hohe Openloop-Verstärkung für eine starke Gegenkopplung notwendig ist. Diese wiederum ist nur mit aufwändiger Röhrentechnik möglich. Da Röhren jedoch von vorne herein sehr linear arbeiten und der Ausgangstransformator für eine Gegenkopplung ein großes Hindernis darstellt, ist dies bei Röhrenverstärkern nicht üblich.

Bei Transistorverstärkern wiederum wäre eine starke Gegenkopplung recht zweckmäßig, weil dadurch die meisten Parameter verbessert werden. Eine solche bringt den Verstärker in Emitterfolgeschaltung jedoch durcheinander, weil dieser dann auch auf die Gegeninduktionsspannung, gemischt mit der Generatorspannung des Lautsprechers, reagiert. Diese Mischspannung steuert zusammen mit der Eingangsspannung die Basen der Endtransistoren. Die Endtransistoren werden jedoch gleichzeitig am Emitter durch den phasenverschobenen Strom des Lautsprechers angesteuert. Siehe dazu auch unter „Gegenkopplung“ Abs. 3 und 4.

*Diese beiden Signale können zeitweise sogar entgegengesetzt sein. Deshalb hat eine starke Gegenkopplung - oft zu Recht - einen schlechten Ruf. Aber all die, die diese Meinung vertreten, kennen **meistens** nur die Emitterfolgeschaltung.*

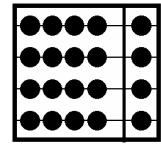
Und merkwürdigerweise hat bisher niemand die Frage gestellt, warum eine starke Gegenkopplung schlecht ist. Denn die meisten Operations-Verstärkerschaltungen funktionieren nur durch die entsprechend dimensionierte Gegenkopplung.

Als Lösung dieser Probleme bietet sich an, einen Transistorverstärker so zu konstruieren, dass die Kollektoren - äquivalent zu den Anoden im Röhrenverstärker - den Lautsprecherstrom liefern.

Hierzu eine kurze Zwischenbemerkung: Die Kollektorspannung hat in gewissen Grenzen keinen Einfluss auf den Transistor; die Emitterspannung jedoch sehr wohl. Dies wird beim Emitterfolger ja gerade ausgenutzt.

Die Ausgangsspannung eines solchen Verstärkers ist ausschließlich von der Gegenkopplung abhängig und diese wiederum enthält auch die Gegeninduktionsspannung und die Generatorspannung des Lautsprechers. Die Phasenlage des Lautsprecherstroms hat jedoch keinen Einfluss auf die Ausgangsspannung des Verstärkers. Ein solcher Verstärker kann selbst bei negativer Ausgangsspannung positiven Strom liefern und natürlich auch bei positiver Ausgangsspannung negativen Strom. Und er ist in der Lage, vom Lautsprecher als Generator gelieferten Strom aufzunehmen, unabhängig von der jeweiligen Polarität. Der Fachmann spricht hier von einer Spannungsquelle mit perfektem 4-Quadranten-Ausgang. Dies ist für einen guten Dämpfungsfaktor wichtig. Ein schlechter Dämpfungsfaktor ist nur durch stark bedämpfte Lautsprecher zu kompensieren. Dadurch leidet jedoch die Lebendigkeit der Musik. Dies ist typisch für Röhrenverstärker, die ja wegen dem Ausgangsübertrager nur an 2 Quadranten gut sein können.

Die Gegenkopplung hat bei diesem Verstärker nur positive Eigenschaften. Ohne diese wäre der Verstärker nicht zu betreiben, weil erst durch diese eine definierte Ausgangsspannung zustande kommt. Weil die Gegenkopplungsspannung auch die Generatorspannung des Lautsprechers enthält, können damit die Endtransistoren komplett von Stromlieferung auf Stromverbrauch umgeschaltet werden. Die Lautsprechermembran wird so schnell abgebremst, wie sie zuvor beschleunigt wurde,



weil jetzt der Lautsprecher vom Verbraucher zum Generator wird. Theoretisch kann für die Abbremsung der Membran auch eine viel größere Leistung zur Verfügung stehen, als zur ursprünglichen Beschleunigung.

Durch den phasenverschobenen Strom des Lautsprechers kann die Ausgangsspannung nicht beeinflusst werden. Dieser Verstärker ist tatsächlich eine perfekte Spannungsquelle.

Ein Transistorverstärker in Emitterschaltung äquivalent zur Kathodenschaltung (die Stromlieferung erfolgt über die Anoden) bei Röhrenverstärkern hat gegenüber diesen Röhrenverstärkern den großen Vorteil, dass eben kein Ausgangsübertrager notwendig ist, weil die Arbeitsspannung von Transistorverstärkern schon auf Lautsprecherniveau liegt und deshalb, anders als bei Röhrenverstärkern nicht transformiert werden muss. Und die besten dieser Ausgangsübertrager sind sehr teuer, sehr schwer und produzieren trotzdem Fehler im Ausgangssignal. Und die Bedämpfung des Lautsprechers ist sehr gering, weil durch den Ausgangsübertrager fast kein Strom aus dem Lautsprecher zum Verstärker zurückfließen kann. Dies sind die fehlenden zwei Quadranten. Röhrenverstärker brauchen sehr stark bedämpfte Lautsprecher, was für die Impulswiedergabe jedoch sehr schlecht ist.

Es gibt verschiedene Versuche mit Röhrenverstärkern, diese in Anodenschaltung (vergl. Kathodenfolger) zu betreiben, um auf den Ausgangsübertrager verzichten zu können. Dieses Prinzip erfordert sehr kräftige Röhren und zum Teil wurden auch Senderröhren im Kilowatt-Bereich verwendet. Die Reproduktionsfähigkeit dieser Verstärker ist jedoch nicht besser als die von Transistorverstärkern in Emitterfolgeschaltung. Der bessere Klang von Röhrenverstärkern gegenüber Transistorverstärkern kommt nämlich nicht durch die Verwendung von Röhren zu Stande, sondern durch das bessere Schaltungsprinzip gegenüber dem schlechteren Prinzip - und das trotz des Ausgangsübertragers beim Röhrenverstärker.

Zu Anfang der Transistortechnik gab es auch Transistorverstärker mit Ausgangsübertrager in Eintaktschaltung. Der Strom wurde hier auch aus dem Kollektor, äquivalent zur Anode, entnommen und die Verstärker klangen so gut wie Röhrenverstärker in Eintaktschaltung. Sie waren jedoch in der Leistung sehr begrenzt. Und dann kamen erste Transistorverstärker in Gegentaktschaltung. Das war nicht so einfach wie heute, weil es noch keine komplementären Transistoren gab. Es gab nur NPN Transistoren. Also musste eine Seite (die positive) des Gegentaktprinzips in Kollektorschaltung (Emitterfolger) arbeiten, die andere, wie bisher in Emitterschaltung. Bei diesem Schaltungsprinzip spricht man von quasikomplementär. Und diesen Verstärkern sagt man nach, dass sie trotzdem sehr gut waren. Mit dem jetzigen Wissen ist klar, warum; diese Verstärker machten den Fehler des Emitterfolgers nämlich nur, so lange der Transistor der positiven Seite (der in Emitterfolgeschaltung) aktiv war. Wenn der Transistor in Emitterschaltung aktiv war (die negative Seite), trat der Fehler ja nicht auf.

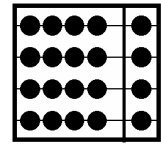
Als dann die ersten Komplementärtransistoren, nämlich NPN und PNP, zu haben waren, schlich sich der Fehler im Verstärkerprinzip ein. Diese ersten Verstärker mit Komplementärtransistoren wurden nämlich als Emitterfolger gebaut, obwohl fast alle Schaltungen der Röhrentechnik eben das Äquivalent zum Kollektor, nämlich die Anode zur Stromlieferung verwenden. Von Anfang an wurden diese Verstärker mit rein ohmscher Belastung getestet und funktionierten damit ganz wunderbar. Ein solcher Verstärker war relativ einfach zu bauen. Dieses fragwürdige Prinzip ist heute noch allgemein üblich und vorherrschend und die Schaltungen sind heute noch so einfach wie damals.

Eine ganz andere Frage ist, warum die Fähigkeit eines Verstärkers zur Reproduktion von Tonsignalen messtechnisch bisher nicht darstellbar ist. Dabei wäre die Sache ganz einfach, wenn die Messung an einem genau definierten Referenzlautsprecher erfolgen würde. Die Messung erfolgt jedoch wie früher auch schon an einem rein ohmschen Lastwiderstand und wie vorher beschrieben, funktionieren Verstärker in Kollektorschaltung (vgl. Emitterfolger) an einem ohmschen Widerstand ganz wunderbar.

Ein Verstärker in Emitterschaltung, äquivalent zum Röhrenverstärker in Kathodenschaltung, wurde von mir schon vor über 20 Jahren in der Funkschau beschrieben. Einige Leserzuschriften äußerten damals die Meinung, dass ein solcher Verstärker nach deren Schulwissen nicht funktionieren kann.

Verstärker nach diesem Konzept werden jedoch heute noch genauso gebaut und auch verkauft. Manch einer hat für einen solchen Verstärker, gebraucht und oft über 20 Jahre alt, mehr als den damaligen Neupreis bezahlt. Und der Verstärker „klingt“ auch heute noch besser, als andere und alles was für Geld zu haben ist.

Die zuvor beschriebenen Verzerrungen des Emitterfolgers sind wahrscheinlich mit den als TIM bezeichneten Verzerrungen identisch. Nach meinem Kenntnisstand ist die Ursache für diese TIM Verzerrungen bisher nicht eindeutig geklärt. Bekannt ist nur, dass diese Verzerrungen bei guten Röhrenverstärkern kaum auftreten und deshalb bei meinem Verstärkerprinzip auch nicht.



Doch nun geht es noch um eine andere grundsätzliche Sache, nämlich um die Frage, warum eine starke Gegenkopplung bei Verstärkern in Emitterfolgeschaltung schlecht ist. Ob das stimmt oder nur eine Behauptung ist, wird im Folgenden erörtert.

Gegenkopplung

Der Lautsprecherstrom kommt also aus den Emittern der Endtransistoren. Wenn nun die Basen positiv angesteuert werden, wird der NPN-Transistor besser leitend als der entgegengesetzte PNP-Transistor, der an der Basis ebenfalls positiv angesteuert wird und es fließt ein positiver Emitterstrom über den Lautsprecher nach Masse. Am ohmschen Widerstand der Lautsprecherspule bildet sich dadurch ein Spannungsabfall, welcher der Emitterausgangsspannung entgegen gerichtet ist. Der Emitter folgt der Basisspannung und wird ebenfalls positiv.

Wenn die Lautsprecherspule sich nicht in einem Magnetfeld bewegen würde, würde soweit gar nichts passieren, außer dass die Spule durch den Strom erhitzt würde. Aber genau so werden Verstärker getestet - nämlich an einem ohmschen Widerstand, der dabei auch warm wird. Aber die Lautsprecherspule befindet sich in einem sehr starken Magnetfeld und bewegt sich deshalb. Das ist schließlich der Sinn dieser Anordnung.

Eine Induktionsspannung wird in jeder Spule erzeugt, auch wenn diese sich nicht in einem Magnetfeld befindet, sobald die anliegende Spannung verändert wird. Diese Spannung für sich ist nicht phasenverschoben. Sie bewirkt jedoch gerade den induktiv phasenverschobenen Strom. Durch die Bewegung im Magnetfeld wird jedoch zusätzlich eine Spannung erzeugt, die sogenannte Generatorspannung. Weil die Bewegung der Membran durch den induktiv phasenverschobenen Strom bewirkt wird, ist die Generatorspannung ebenfalls induktiv phasenverschoben. Die Induktionsspannung und die Generatorspannung mischen sich und sind in jedem Fall der Ausgangsspannung des Verstärkers phasenverschoben entgegengerichtet. Da es sich bei der Ausgangsspannung des Verstärkers in jedem Fall um Wechselspannung handelt, ist der aus diesen gemischten Spannungen resultierende Strom gegen den ohmschen Strom phasenverschoben, aber genau dieser phasenverschobene Strom treibt die Spule an. Der ohmsche Strom jedoch wird nur in Wärme umgewandelt, was sich ja leider nicht verhindern lässt. Der gesamte resultierende Strom ist auf jeden Fall phasenverschoben zur Steuerspannung an den Basen.

Da aus diesem phasenverschobenen Strom jedoch die Emitterfolgespannung erzeugt wird, folgt der Emitter der Basis auch nur phasenverschoben. Wenn nun dieses phasenverschobene Emittersignal durch die Gegenkopplung mit dem Eingangssignal gemischt wird, ist auch das Eingangssignal an den Basen der Endtransistoren schon phasenverschoben. Diese beiden Phasenverschiebungen schaukeln sich gegenseitig auf und kumulieren (lat. anhäufeln). Es scheint logisch zu sein, dass unter diesen Umständen am Ausgang des Verstärkers in Emitterfolgeschaltung ein Signal entsteht, das mit dem ursprünglichen Eingangssignal nur teilweise übereinstimmt.

Dieses Problem existiert jedoch nur bei Emitterfolgern. Denn wenn der Kollektor den Strom liefert, kann dieses Problem gar nicht auftreten.

Ein Verstärker in Emitterfolgeschaltung verträgt eigentlich keine Gegenkopplung. Da es jedoch sehr schwierig ist, einen Transistorverstärker so zu konstruieren, dass er ohne Gegenkopplung linear arbeitet, wird mit einer mäßigen Gegenkopplung zwar erreicht, dass er linear arbeitet. Aber für den Preis, dass sich eben die zuvor beschriebenen Fehler ergeben.

Eine Gegenkopplung in einem Verstärker in Emitterfolgeschaltung stellt also einen Kompromiss dar und man kann nur zwischen den Fehlern wählen.

Ein Verstärker soll eine ideale Spannungsquelle sein. Eine solche kann durch nichts beeinflusst werden. Eine Emitterfolgeschaltung wird jedoch durch die Phasenlage des zugehörigen Stroms erheblich beeinflusst und ist deshalb keine ideale Spannungsquelle. Dass es trotzdem einige gut klingenden Emitterfolgerverstärker gibt, liegt daran, dass das Ohr auch große Fehler toleriert. Sonst würden alle die Wiedergabe eines MP3-Players als Katastrophe empfinden.

Januar 2008

Joachim Rieder