

Über Verstärker, Röhren, Transistoren...

Ein Aufsatz zum Thema Audio-Verstärker allgemein - wie funktioniert der ABACUS-Verstärker im Vergleich zu anderen?

Wenn es um das Thema Verstärker geht, denkt der HiFi-Interessent zuerst an Audioverstärker. Ebenso werden Verstärker aber auch in der Regeltechnik eingesetzt, um zum Beispiel Motoren oder Ventile zu steuern. Diese Abhandlung befasst sich mit der Arbeitsweise von Röhrenverstärkern und der speziellen Problematik üblicher Transistorverstärker, die allgemein in Kollektorschaltung arbeiten, als sogenannte Emitterfolger.

Der ABACUS-Verstärker hingegen arbeitet in „Emitterschaltung“. Die heutigen Erkenntnisse um diesen Verstärker wurden zum Teil erst im Laufe der Jahre nach dessen Entwicklung gewonnen. Heute sind wohl alle entscheidenden Eigenschaften des ABACUS-Verstärkers bekannt. Inzwischen besteht eine lückenlose Beweiskette für die besondere Eignung dieser Schaltungstechnik für die Steuerung komplexer Lasten mit komplexen Signalen.

Komplexe Signale an komplexen Lasten

In der Audiotechnik haben wir es mit komplexen Signalen zu tun. Die reichen über fast 10 Oktaven, nicht selten alle gleichzeitig in unterschiedlicher Zusammensetzung und mit unterschiedlichen Pegeln.

Komplexe Lasten wirken auf die jeweiligen Ausgangsstufen zurück. Dies sind alle fixen und variablen Line-Ausgänge und die Ausgangsstufen von Leistungs- beziehungsweise Endverstärkern. Im Folgenden betrachten wir in erster Linie Lautsprecher an Leistungsverstärkern, obwohl sich die geschilderten Probleme oft ebenso schädlich an Line-Ausgängen, zum Beispiel CD-Player oder am Vorverstärkerausgang („Pre Out“), darstellen.

Lautsprecher als komplexe Last

Alle handelsüblichen Lautsprecher erreichen bei Resonanzfrequenz die höchste Impedanz. Ein Lautsprecher verhält sich wie ein Parallelschwingkreis; unterhalb der Resonanzfrequenz arbeitet er induktiv und oberhalb kapazitiv. Die damit verbundene Phasendrehung bleibt nur unter 90 Grad, weil die Impedanz immer auch einen Gleichstromwiderstand enthält.

Unterhalb der Resonanzfrequenz steigt der Strom im Lautsprecher wegen dessen induktivem Verhalten geringer an - der Lautsprecher „verhungert“ quasi. Und oberhalb der Resonanzfrequenz verhält sich ein Lautsprecher wie ein Kondensator und lässt den Strom in Abhängigkeit von der Frequenz passieren.

Sind in einer Lautsprecherbox mehrere unterschiedliche Lautsprecher enthalten, wirken sich Induktivitäten und Kapazitäten entsprechend mehrfach aus.

Komplexen Lasten am Verstärker

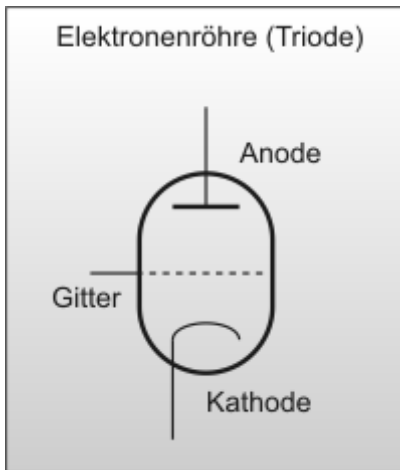
Beim Betrachten komplexer Widerstände an Verstärkern wird deutlich, dass ein üblicherweise als Emitterfolger geschalteter Transistorverstärker diese nur bedingt beherrschen kann. Ein komplexer Widerstand ist nicht zwingend ein Lautsprecher, sondern kann ebenso ein Stellglied der Regeltechnik sein. Im Gegensatz zu normalen Stellgliedern sind Lautsprecher besonders schwer zu beherrschen, da sie sich bei Änderung der Frequenz gleichzeitig induktiv, kapazitiv und auch ohmisch verhalten.

Der Emitterfolger gilt allgemein als idealer Impedanzwandler und guter Treiber für Lautsprecher. Gleichmaßen gilt eine starke Gegenkopplung als problematisch. Warum diese Auffassung irrig ist, wird später unter [Gegenkopplung](#) bewiesen.

Am Anfang war die Röhre

Oft heißt es, Röhrenverstärker tönen besser und wahrscheinlich trifft dies von Fall zu Fall, wenn auch nicht immer, zu. Wenn dies aber so ist, besteht die Ursache darin, dass fehlerhaft tönende Transistorverstärker die Audiosignale nicht richtig reproduzieren. Dies soll im Folgenden ergründet werden:

In ihrer Grundform hat die Elektronenröhre drei Elektroden. Darum wird sie als Triode bezeichnet. Die Elektroden sind



- Kathode - entspricht dem Emitter beim Transistor,
- Gitter (Steurgitter) – entspricht der Transistor-Basis und
- Anode – entspricht dem Kollektor.

Die Steuerung erfolgt bei der Röhre meistens am Gitter mit einer Spannung und beim Transistor an der Basis mit Strom. Feldeffekttransistoren werden übrigens wie Röhren mit Spannung am Gate gesteuert. Dies ist aber bei Betrachtung des Themas nicht von Bedeutung. Konzentrieren wir uns darauf, dass der Lautsprecherstrom aus der Anode kommt. Das entspricht beim Transistor dem Kollektor.

Bei der Analyse üblicher Audioverstärker fällt auf, dass diese allesamt den Lautsprecherstrom aus dem Emitter beziehen, vergleichsweise der Röhren-Kathode. Diese Schaltungstechnik

wird allgemein als Emitterfolger bezeichnet, das Pendant bei der Röhrentechnik als Kathodenfolger. Der wahrscheinlich korrekte Begriff wäre Kollektor- bzw. Anodenschaltung. Zur Begriffserklärung: Emitterfolger, weil hier die Emitterspannung der Spannung an der Basis folgt.

Der Emitterfolger oder auch Kollektorschaltung

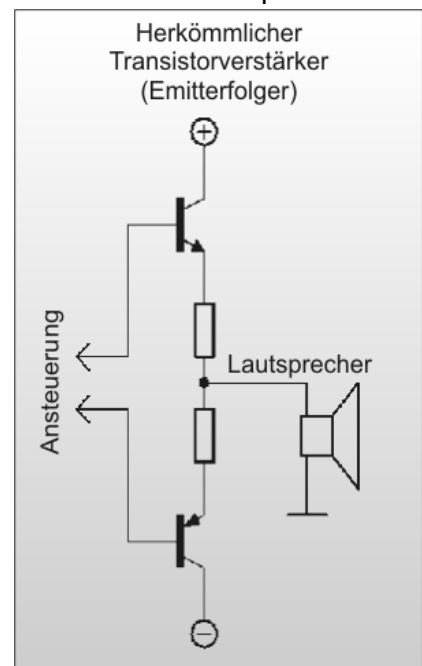
Beim Emitterfolger folgt die Spannung am Emitter nur exakt der Basis, wenn der Arbeitswiderstand rein ohmsch ist. Kommt ein noch so geringer induktiver oder kapazitiver Teil hinzu, ist das nicht mehr der Fall.

Bei einem Audioverstärker ist der Arbeitswiderstand ein Lautsprecher und der verhält nicht wie eine elektrische Glühlampe, sondern belastet den Verstärker als Parallelschwingkreis. Nur bei Resonanzfrequenz ist der Strom im Lautsprecher nicht phasenverschoben. Darum wird der Transistor in der Emitterfolgerschaltung am Emitter als Reaktion auf das Signal der Basis praktisch immer phasenverschoben zum Basissignal angesteuert. Fazit: Beim Emitterfolger folgt der Emitter der Basis nur mehr oder weniger, genau genommen aber nicht.

Problem erkannt – wie aber lösen?

Die Phasenverschiebung wird mit dem Ansteigen des ohmschen Anteils an der Impedanz des Lautsprechers geringer. Durch Zuschalten von ohmschen Widerständen kann die Phasenverschiebung zwar reduziert werden, wenn eine gleichzeitige Reduzierung des Wirkungsgrades in Kauf genommen wird. Natürlich wirkt sich das auch reduzierend auf die Dämpfungseigenschaft aus.

Statt einem größeren ohmschen Impedanzanteil im oder am Lautsprecher kann ein solcher Effekt erzielt werden, wenn ein Verstärker in Klasse A aufgebaut ist. Bei einem solchen Verstärker wird ein großer Anteil der Leistung bereits im Verstärker selbst, meistens in den Endtransistoren, verheizt. Die Verlustleistung wird dann über Kühlkörper als Wärme abgeleitet. Extreme Klasse-A-Verstärker liefern zum Beispiel bei 1000 Watt Leistungsabgabe nur 10 Watt in die Lautsprecher; 99% werden zu Wärme. Der Erfolg der Aktion ist eine Verringerung der Auswirkung des phasenverschobenen Lautsprecherstroms am Emitter in etwa demselben Verhältnis.



...und mit Röhren?

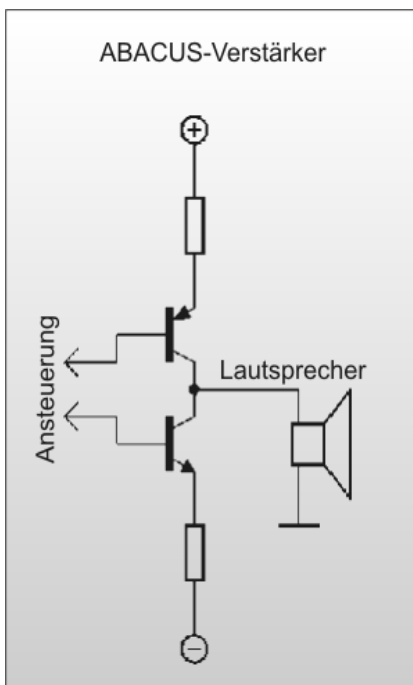
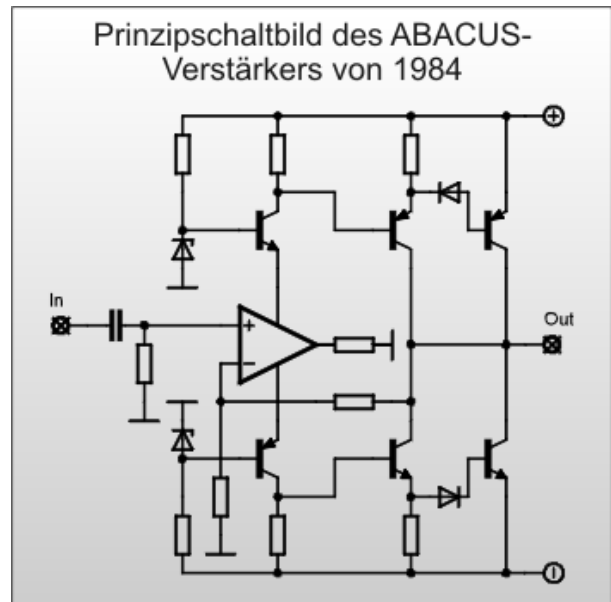
Beim Röhrenverstärker führen diese Maßnahmen nicht zu klangbeeinflussenden Veränderungen. Hier liefert die Anode den Lautsprecherstrom - und die entspricht beim Transistor dem Kollektor. Ein Röhrenverstärker im A-Betrieb bietet keine klangrelevanten Vorteile gegenüber dem AB-Betrieb. Auch die Übernahmeverzerrungen spielen in Klasse AB keine Rolle.

Röhrenverstärker arbeiten mit sehr geringer Gegenkopplung, weil für eine starke Gegenkopplung eine große Openloop-Verstärkung erforderlich wäre. Eine starke Gegenkopplung wird einerseits nicht angestrebt, weil Röhren linearer als Transistoren arbeiten und andererseits der Ausgangstransformator für eine Gegenkopplung ein kaum überwindbares Problem darstellt. Der Ausgangsübertrager funktioniert wie jeder Transformator in beide Richtungen; aber wenn der Lautsprecher Strom liefert, müsste dieser an der nun zur Sekundärspule umgewandelten Primärspule vom Verstärker aufgenommen werden. Und das ist natürlich nicht der Fall.

... und mit Transistoren in Emitterfolgerschaltung?

Bei Transistorverstärkern könnten mit einer starken Gegenkopplung praktisch alle Parameter verbessert werden. Allerdings gerät damit ein Verstärker mit Emitterfolgerschaltung weitgehend außer Kontrolle, weil er dann auf ein Gemisch von Gegeninduktionsspannung und Generatorspannung des Lautsprechers reagiert. Diese Mischspannung steuert gemeinsam mit der Eingangsspannung die Basen der Endtransistoren. Die Endtransistoren werden aber gleichzeitig am Emitter durch den phasenverschobenen Strom des Lautsprechers angesteuert. Von Zeit zu Zeit können diese Signale sogar entgegengesetzt sein.

Aus diesem Grund rührt der schlechte Ruf einer starken Gegenkopplung bei Transistorverstärkern. An späterer Stelle dieser Abhandlung wird bewiesen, dass sich diese Erkenntnisse nur auf Verstärker in Emitterfolgerschaltung anwenden lassen.



Die Lösung

Ein Transistorverstärker muss darum so aufgebaut werden, dass die Kollektoren, entsprechend den Anoden beim Röhrenverstärker, den Lautsprecherstrom liefern. An dieser Stelle sei angemerkt, dass – wie schon gesehen – ein Leistungstransistor mit Kollektor-Ausgang, der einem Emitterfolger nachgeschaltet wird, in seinem Verhalten ein Emitterfolger bleibt.

... Eine Zwischenfrage:

Welchen Einfluss haben Kollektor oder Emitter auf die Arbeitsweise des Transistors? Die Kollektorspannung hat weitgehend keinen Einfluss auf den Transistor, der Emitter hingegen einen sehr großen. Dies wird ja gerade beim Emitterfolger besonders ausgenutzt.

Weiter mit der Lösung

Bei einem solchen Transistorverstärker ist die Ausgangsspannung ausschließlich von der Gegenkopplung abhängig und die enthält auch die Gegeninduktionsspannung und die Generatorspannung des Lautsprechers. Die Phasenlage des Lautsprecherstroms hat hier keinen Einfluss auf die Ausgangsspannung des

Verstärkers. Dieser kann selbst dann positiven Strom liefern, wenn die Ausgangsspannung negativ ist und natürlich auch bei positiver Ausgangsspannung negativen Strom. Außerdem ist dieser Verstärker in der Lage, den Generatorstrom des Lautsprechers unabhängig von der jeweiligen Polarität aufzunehmen.

Der ABACUS-Verstärker

Diese Verstärkerschaltung, die Emitterschaltung, wird hier in der folgenden Beschreibung als ABACUS-Verstärker bezeichnet.

4-Quadranten-Ausgang

Wir haben es hier mit einer Spannungsquelle mit einem perfekten 4-Quadrantenausgang zu tun. Das ist die wichtigste Voraussetzung für einen guten Dämpfungsfaktor. Ein geringer Dämpfungsfaktor ist nur durch eine starke Bedämpfung des Lautsprechers und dann auch nur bedingt zu kompensieren. Das geht natürlich zu Lasten der musikalischen Wiedergabequalität. Dieses Problem ist speziell in Verbindung mit Röhrenverstärkern von Bedeutung. Ein Röhrenverstärker bietet wegen seines Ausgangsübertragers nur gute Eigenschaften an 2 Quadranten.

Beim Verstärker nach dem ABACUS-Prinzip hat die Gegenkopplung ausschließlich positive Eigenschaften. Ohne Gegenkopplung ist dieser Verstärker nicht funktionsfähig, denn erst damit kommt eine definierte Ausgangsspannung zustande. Da die Gegenkopplungsspannung auch die Generatorspannung des Lautsprechers enthält, können damit die Endtransistoren völlig von Stromlieferung auf Stromverbrauch umgeschaltet werden. Die Lautsprechermembrane wird mindestens so schnell gebremst wie sie zuvor beschleunigt wurde, weil jetzt der Lautsprecher vom Verbraucher zum Generator wird. Generell steht zum Abbremsen der Lautsprechermembrane aber eine viel größere Leistung zur Verfügung als für die ursprüngliche Beschleunigung.

Der ABACUS-Verstärker ist eine perfekte Spannungsquelle, denn mit dem phasenverschobenen Strom des Lautsprechers kann seine Ausgangsspannung nicht beeinflusst werden.

Ein Transistorverstärker nach ABACUS (Emitterschaltung) ist vergleichbar mit der allgemein üblichen Kathodenschaltung bei Röhrenverstärkern - dort wird der Strom über die Anoden geliefert – hat aber den entscheidenden Vorteil, dass kein Ausgangsübertrager erforderlich ist. Auch die besten Ausgangstransformatoren verfälschen das Signal. Zudem ist die Bedämpfung des Lautsprechers sehr gering, weil fast kein Strom aus dem Lautsprecher in den Verstärker zurück gelangt. Dies ist die Ursache für die fehlenden 2 Quadranten.

Weitere Konzepte der Verstärkertechnik

Es sind auch „eisenlose Röhrenverstärker“, Röhrenverstärker in Anodenschaltung ohne Ausgangstransformator bekannt. Hier war das Entwicklungsziel offenbar, die bekannten Mängel von Ausgangsübertragern zu vermeiden. Der Lautsprecher arbeitet hier direkt an der Röhrenkathode. Allerdings weisen diese Verstärker praktisch dieselben Mängel wie Emitterfolger auf.

Falls ein Röhrenverstärker besser tönt, liegt dies niemals an der Überlegenheit der Elektronenröhre, sondern allenfalls an einer nachteiligen Schaltungstechnik des verglichenen Transistorverstärkers.

In der frühen Transistor-Geschichte wurden Transistorverstärker mit Ausgangsübertrager in Eintaktschaltung entwickelt. Der Strom kam hier auch aus dem Kollektor. Diese Verstärker verhalten sich wie Eintaktverstärker mit Röhren.

Dann gab es mal einen Transistorverstärker in Gegentaktschalung, weil es damals noch keine PNP-Transistoren gab. Hier lief eine Seite als Emitterfolger und die andere Seite in Emitterschaltung.

Wegen ihrer Bedeutungslosigkeit soll nicht tiefer und weiter auf exotische Konzepte der Verstärker-Geschichte eingegangen werden.

Als der PNP-Transistor kam

Als es dann zum NPN- auch PNP-Transistoren auf den Markt kamen, schlich sich offensichtlich von nbeginn an ein Konstruktionsirrtum in die Audio-Verstärkertechnik ein.

Von Anfang an wurden nämlich Verstärker als Emitterfolger konstruiert. Die Probleme des Emitterfolgers waren vermutlich damals ebenso wenig bekannt wie es heute allgemein immer noch der Fall zu sein scheint. Der Verstärker war ganz einfach und problemlos zu bauen und man begnügte sich mit der Erkenntnis, dass damit hervorragende Messergebnisse erzielt würden. Der historische Denkfehler war, dass man – wie verbreitet heute noch – an realer Last gemessen hat. Diese so ermittelten und nur scheinbar guten Eigenschaften sind lange Zeit allgemein kritiklos akzeptiert worden. Erst nach Jahren kamen Zweifel auf und die totgegläubte Elektronenröhre erlebte in Enthusiastenzirkeln eine kleine Renaissance.

Messtechnik - wer weiß denn was er misst?

Verbreitet besteht die Auffassung, dass die Fähigkeit von Verstärkern messtechnisch nicht darstellbar sei. Im Grunde müsste man für klangrelevante Messungen nur einen Referenzlautsprecher definieren. Tatsächlich wird aber nach wie vor allgemein an einem ohmschen Widerstand gemessen und messen tun sich gerade Emitterfolger dann ganz wunderbar.

Die hier beschriebenen Verzerrungen eines als Emitterfolger aufgebauten Verstärkers sind höchstwahrscheinlich mit den als TIM bezeichneten Verzerrungen identisch. TIM ist die Abkürzung für Transient Inter Modulation und bedeutet „zeitweise auftretende Verzerrung der Modulation“. Gebräuchlich ist auch der Begriff „Intermodulationsverzerrung“.

Intermodulationsverzerrungen treten je nach Konstruktion mehr oder weniger bei Emitterfolgern auf, geringer bei guten Röhrenverstärkern und gar nicht bei dem hier als ABACUS-Verstärker benannten. In einer späteren Abhandlung wird das Thema TIM noch sehr ausführlich behandelt....

Thema Gegenkopplung

Ein ganz bedeutendes Thema ist die Gegenkopplung bei Audio-Verstärkern. Weit verbreitet ist in der Audioszene die Auffassung, dass eine starke Gegenkopplung schlecht sei. Oben wurde die Bedeutung der Gegenkopplung im ABACUS-Verstärker bereits erklärt.

Funktion der Verstärker in Emitterfolgerschaltung

Bei einem Emitterfolger kommt der Lautsprecherstrom aus den Emittern der Endtransistoren. Wenn die Transistoren an der Basis angesteuert werden, wird der NPN-Transistor besser leitend als der komplementäre PNP-Typ, der an der Basis auch positiv angesteuert wird und es fließt ein positiver Emitterstrom über den Lautsprecher nach Masse. Am ohmschen Anteil der Lautsprecher-Schwingspule entsteht nun ein Spannungsabfall, der der Emitter-Ausgangsspannung entgegen gerichtet ist. Der Emitter folgt der Basisspannung und wird auch positiv.

Ohne Bewegung der Schwingspule im Magnetfeld würde sich durch den Strom lediglich die Schwingspule erhitzen. Aber dieser Zustand entspricht genau der üblichen Messtechnik für Audio-Verstärker. Sinn der Sache ist aber, dass sich die Schwingspule in einem starken Magnetfeld befindet und sich darum bewegt.

In jeder Spule wird eine Induktionsspannung erzeugt, auch ganz ohne Magnetfeld, sobald eine Änderung der anliegenden Spannung erfolgt. Die Spannung selbst ist nicht phasenverschoben, aber sie bewirkt den induktiv phasenverschobenen nacheilenden Strom. Durch Bewegung einer Schwingspule im Magnetfeld wird zusätzlich eine sogenannte Generatorspannung erzeugt. Die Bewegung der Membrane erfolgt durch den induktiv phasenverschobenen Strom. Damit ist die Generatorspannung ebenfalls induktiv phasenverschoben. Die Induktionsspannung und die Generatorspannung mischen sich und sind stets der Ausgangsspannung des Verstärkers phasenverschoben entgegengerichtet. Die Ausgangsspannung des Verstärkers ist immer eine Wechselspannung. Darum ist der Strom, der aus diesem Spannungsgemisch resultiert, gegen den ohmschen Strom phasenverschoben. Aber genau dieser phasenverschobene Strom treibt die Schwingspule an. Der ohmsche Strom wird in Wärme gewandelt. Der gesamte resultierende Strom, der den Lautsprecher antreibt, ist auf jeden Fall phasenverschoben zur Steuerspannung an der jeweiligen Basis der Transistoren. Nur bei Resonanzfrequenz ist er nicht phasenverschoben.

Aber gerade aus diesem phasenverschobenen Strom wird die Emitterfolgerspannung erzeugt und der Emitter folgt der Basis auch nur phasenverschoben. Wird nun dieses

phasenverschobene Emittersignal durch die Gegenkopplung mit dem Eingangssignal gemischt, ist das Eingangssignal an der jeweiligen Basis der Endtransistoren auch schon phasenverschoben. Beide Phasenverschiebungen schaukeln sich gegenseitig auf. Zwangsläufig entsteht hier ein Ausgangssignal, das mit dem ursprünglichen Eingangssignal nur noch eine mehr oder weniger geringe Ähnlichkeit aufweist.

Die vorstehend beschriebenen Eigenschaften beziehen sich nur auf Verstärker in Emitterfolgern, bei denen der Emitter den Lautsprecherstrom liefert. Wenn der Kollektor den Lautsprecher antreibt, können die geschilderten Fehler nicht auftreten.

Und jetzt die Antwort auf die Frage: „Ist eine Gegenkopplung schlecht?“

Eine Gegenkopplung ist grundsätzlich gut und zwar je stärker desto besser – außer bei Verstärkern in Emitterfolgerschaltung.

Verstärker in Emitterfolgerschaltung erlauben eigentlich keine Gegenkopplung. Ein Verstärker mit Transistoren kann aber ganz ohne Gegenkopplung nicht linear arbeiten, sofern die Last nicht rein ohmisch ist. Ein üblicher Kompromiss besteht offensichtlich darin, einem Emitterfolger gerade soviel Gegenkopplung zu spendieren, dass sich die nachgewiesenen Fehler in Grenzen halten. Das gelingt von Fall zu Fall mehr oder weniger gut...

Eine ideale Spannungsquelle soll er sein, der Audio-Verstärker und durch nichts zu beeinflussen. Ein Emitterfolger kann dieser Anforderung aus prinzipiellen Erwägungen nicht gerecht werden – alle anderen aber auch nicht wirklich. Er ist keine ideale Spannungsquelle! Wenn aber trotzdem von guttönenden Emitterfolgerverstärkern die Rede ist, kann dies nur mit der Unzulänglichkeit der menschlichen Hörorgane erklärt werden. Darum ist es geradezu waghalsig, wenn behauptet wird, das menschliche Ohr – oder auch zwei davon - seien wirklich zuverlässigen Messgeräte...

August 2009 – khs

September 2009 - khs