

# Röhrensound mit Halbleitern

Gitarrenverstärker brauchen Vorstufen, die sich weich übersteuern lassen. Die Abplattung der Signalkurve muss sanft erfolgen, damit der Übergang zwischen „clean“ und „dirty“ kontinuierlich vor sich geht. Mit Röhren funktioniert das bekanntlich sehr gut, mit Transistoren, zumindest in der allgemein üblichen Schaltungstechnik, überhaupt nicht. Doch es gibt einen Weg. Wenn man statt Bipolartransistoren JFETs verwendet und auf Gegenkopplung verzichtet, lässt sich das nichtlineare Verhalten von Trioden sehr gut simulieren. Dabei kommt es sehr auf das „Gewusst wie“ an.

Helmuth Lemme

Warum eigentlich Röhren ersetzen, wo sie doch guten Sound erzeugen? Verrichten sie ihre Arbeit etwa nicht gut? Es gibt durchaus gute Gründe, daran zu zweifeln. Denn die Qualität vieler heute käuflichen Exemplare lässt oft zu wünschen übrig. Was immer wieder Kummer bereitet, ist die Mikrofonie. Klopf man gegen den Kolben, so ertönen aus dem Lautsprecher unliebsame Geräusche. Bei guten Röhren ist das nur ein leichter „Plopp“, bei schlechten kann das aber bis zu einem regelrechten Klingeln ausarten. Sitzt ein derartiges Montagsprodukt in der Eingangsstufe eines Gitarrenverstärkers, dann kann dieser allein schon durch Aufdrehen aller Lautstärkesteller in akustische Rückkopplung geraten, ohne dass eine Gitarre angeschlossen ist. Allein das Verstärkerrauschen und die Grundgeräusche des Verstärkers reichen aus, um das Gitter der Eingangsröhre zum Schwingen zu bringen, was sich in Dröhnen und Pfeifen

im Lautsprecher äußert. Halbleiter sind dagegen prinzipbedingt mikrofoniefrei. So sind sie zumindest in hochempfindlichen Eingangsstufen durchaus sinnvoll. Weiter hinten in der Schaltung, wo die Signalpegel höher sind und Mikrofonie weniger stört, können dann immer noch Röhren ihren Dienst tun.

Weitere Gründe für den Einsatz von JFETs sind die hohen Betriebsspannungen bei Röhren; auch die Heizung verschlingt mehrere Watt. Damit scheiden sie für batteriebetriebene Geräte aus. Mancher Musiker möchte aber auch gerne fern von der Steckdose einen Röhrensound haben. Halbleiter kennen keinen Verschleiß; sie funktionieren entweder ganz oder gar nicht. Röhren müssen dagegen von Zeit zu Zeit ausgetauscht werden, weil die Emission der Kathode nachlässt. Manchmal hält auch das Vakuum nicht, es kommen Spuren von Luft in den Kolben, oder das Getter, wel-

ches das Vakuum erhält, ist ermüdet. Man erkennt dies, wenn die Röhre unter Spannung steht und im Inneren blaues Leuchten auftritt.

So überrascht es nicht, dass schon sehr viele Schaltungsentwickler Versuche unternommen haben, die Eigenschaften von Röhren mit Halbleitern zu simulieren, einige auch durchaus mit Erfolg. Der Grund, warum übersteuerte Transistorverstärker so hässlich kratzend klingen, ist seit Langem bekannt. Das Signal wird bei Übersteuerung scharf begrenzt und geht in Rechteckform über. Die erzeugten Harmonischen bestehen vorwiegend aus ungeradzahligen Anteilen und reichen bis in hohe Frequenzbereiche. Das klingt dann nicht mehr sehr musikalisch. Vielleicht erinnert sich noch der eine oder andere an den Beatles-Hit „Revolution“, wo es Absicht war, mit einem aggressiv verzerrten Gitarrensound den Gesang zu untermalen. Röhren gehen sanft in

die Begrenzung, wodurch das Ober-tonspektrum längst nicht so weit nach oben reicht. Weiterhin sind die Oberwellen eher geradzahlig, was sich in einem besseren Klang äußert.

Eine genauere Analyse zeigt, es liegt nicht allein an den verstärkenden Bauelementen, sondern auch am gesamten Schaltungskonzept. Eine Röhrenstufe verstärkt normalerweise unkontrolliert ins Blaue hinein, Gegenkopplungen sind zumindest in Vorstufen nicht üblich. Verstärkerstufen mit nur einem einzigen Transistor sind dagegen selten zu finden. Sehr viel häufiger sind zwei oder mehrere hintereinander geschaltet, um zunächst eine sehr hohe Leerlaufverstärkung zu erhalten, die dann durch eine starke Gegenkopplung wieder kräftig reduziert wird. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Schaltung diskret aufgebaut oder ein integrierter Operationsverstärker ist. Eine derartige Verstärkerstufe ist ein geschlossener Regelkreis. Dessen Zweck ist es, die nichtlinearen Verzerrungen auf ein Minimum zu senken. Das funktioniert auch, solange die Schaltung nicht übersteuert wird. Sobald das passiert, nehmen die Verzerrungen plötzlich zu. Das wäre bei Röhren ähnlich, nur baut kaum jemand solche Schaltungen, denn diese hätten den geschätzten Röhrensound nicht mehr. Betreibt man eine einzelne Stufe mit einem NPN-Transistor ohne Gegenkopplung, dann kappt er die positive Halbwelle oben (wo er sperrt) weich und die negative unten (wo er voll durchgeschaltet ist) hart ab. Ein PNP-Transistor macht es umgekehrt. Eine Gegentaktstufe aus NPN und PNP kappt oben und unten hart, führt also nicht zum Ziel.

Ein weitverbreitetes Prinzip, um die Signalkurve sanft zu begrenzen, verwendet zwei antiparallel geschaltete Dioden. Damit kommt der Sound schon eher in Richtung Röhren. Aber das letzte „gewisse Etwas“ fehlt damit immer noch. Das liegt daran, dass mit Dioden die Abplattung der Kurve genau symmetrisch erfolgt, wobei immer nur ungeradzahlige Harmonische entstehen. Übersteuerte Röhren

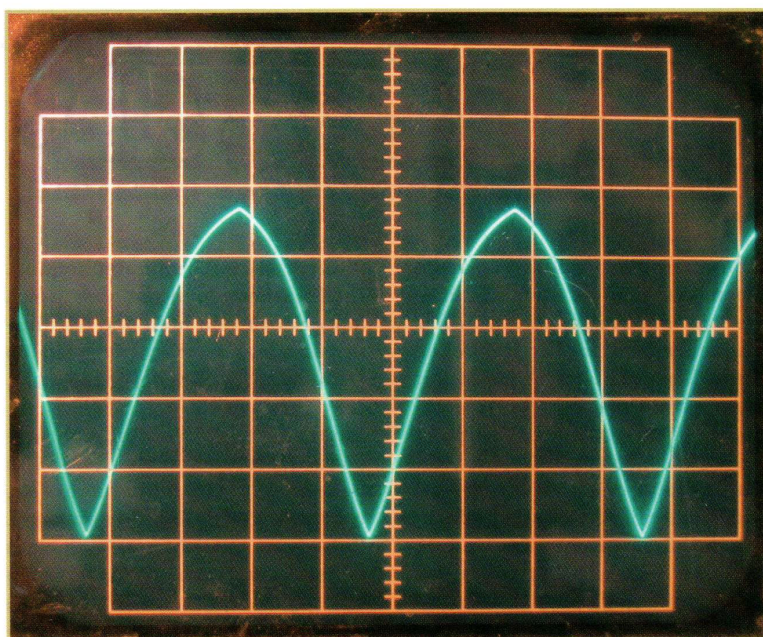


Bild 1. Verzerrungsverhalten von nicht gegengekoppelten Verstärkerstufen vor Beginn der eigentlichen Übersteuerung: Ein präzises Dreieckssignal am Eingang wird zu „gotischen Spitzbögen“ am Ausgang. Dieses Verhalten zeigen Bipolar- und Feldeffekt-Transistoren wie auch Röhren.

kapfen aber oben und unten unterschiedlich ab. Dadurch entsteht ein gewisser Anteil an geradzahligen Harmonischen. Schon vor der eigentlichen Übersteuerung erzeugen Röhren leichte Verzerrungen, und zwar nur geradzahlige Harmonische. Speist man ins Gitter ein Dreieckssignal ein, dann kommt an der Anode nicht mehr ein solches heraus, sondern das Oszilloskop zeigt „gotische Spitzbögen“ (Bild 1). Das ist der wesentliche Grund für den geschätzten „Triodensound“. Transistoren erzeugen diese Art von Verzerrung auch, sogar noch sehr viel mehr, sodass sie unangenehm wird. Deswegen bügelt man sie mit hoher Leerlaufverstärkung und starker Gegenkopplung weg.

Nun gibt es aber nicht nur Bipolartransistoren. Eine grundsätzlich andere Klasse sind Feldeffekttransistoren, entweder durch eine mit Sperrschicht isoliertem Gate (JFET), oder das Gate ist durch eine Oxidschicht isoliert (MOSFET). Verstärkerstufen mit einem MOSFET verhalten sich bei Übersteuerung ähnlich wie Bipolartransistoren, sind also für diesen Zweck auch nicht zu gebrauchen. Ein günstiges Verhalten zeigen dagegen JFETs. Diese kapfen oben und unten weich ab.

So sind gute klangliche Ergebnisse möglich, wobei allerdings die Schaltungsauslegung ein kritischer Punkt ist.

## Probleme mit Exemplarstreuungen

Erscheinen JFETs zunächst verheißungsvoll, so haben sie bei genauerem Hinsehen doch einige Tücken. Davon merkt man noch nicht viel, wenn man nur ein Stück kauft, wohl aber, wenn man eine größere Menge ersteht. Sie streuen in ihren Kenndaten extrem, noch viel schlimmer als Röhren, und das will was heißen. Das mag damit zusammenhängen, dass diese Transistorart im industriellen Bereich eine austerbende Spezies ist. Sie lebt fast nur noch in integrierter Form in den Eingangsstufen von hochwertigen Operationsverstärkern weiter, für Einzel Exemplare haben die Anwendungen dagegen immer weiter abgenommen. Schon seit Jahrzehnten sind praktisch keine neuen Typen mehr entwickelt worden, und es ist unklar, welche Hersteller sie heute überhaupt noch produzieren. Trotzdem keine Angst, zu kaufen sind sie noch lange. Im Internet

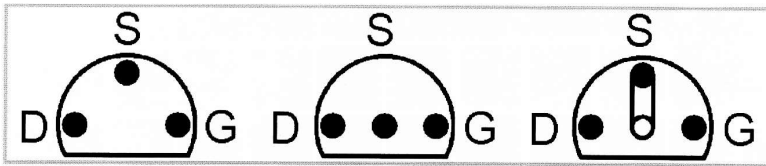


Bild 2. Anschlüsse der hier verwendeten N-Kanal-JFETs BC264, BF245, BF247, BF256 (Blick von unten auf die Drähte). Drahtform und -anordnung sind je nach Hersteller unterschiedlich.

findet man diesbezüglich fast alle Typen. Was man da erwirbt, dürfte aber größtenteils schon Jahre oder Jahrzehnte im Lager gelegen haben. Doch das ist egal, Halbleiter altern nicht. Es ist schwer zu erfahren, wer ein bestimmtes Exemplar hergestellt hat. Viele Typen werden – genauer gesagt wurden – von einer größeren Anzahl von Halbleiterherstellern produziert. Und da hat jeder sein eigenes Süppchen gekocht, die gegenseitige Abstimmung hat offensichtlich überhaupt nicht funktioniert.

Meistens bekommt man auch die zugehörigen Datenblätter. Doch ihr Nutzen ist sehr begrenzt, denn die Kennlinien der realen JFETs können von den in den Datenblättern sehr weit abweichen. Ein charakteristischer Parameter ist die Abschnürspannung. Das ist die Gate-Spannung, bei der der Drainstrom gerade eben auf Null kommt. Vor allem dieser Wert unterliegt in der Praxis enorm hohen Streuungen. Viele, aber leider nicht alle Hersteller sortieren ihre JFETs in Klassen und hängen dazu an die Typenbezeichnung noch einen Buchstaben an, A für niedrige, B für mittlere, C für hohe und gelegentlich auch noch D

für sehr hohe Abschnürspannung. Die Klassenstreuung ist aber in sich immer noch sehr breit und die Klassen überlappen sich gegenseitig. So ist damit nicht allzuviel anzufangen.

Ein weiteres Problem ist, von welchem Hersteller man die JFETs bekommt, das hängt davon ab, wo der jeweilige Händler einkauft. Dabei kann es leicht passieren, dass er bei ein und demselben Grundtyp und sogar noch innerhalb derselben Klasse Exemplare von verschiedenen Herstellern bezieht. Diese können dann stark voneinander abweichen. Uneinheitlich sind zu guter Letzt auch die Gehäuseformen. Mal stehen die drei Drähte im Dreieck, mal in einer Linie, bei manchen ist der mittlere Draht gekröpft. Die verschiedenen Anschlussvarianten sind in Bild 2 gezeigt.

Insgesamt dürfte es wohl hunderte, wenn nicht tausende von verschiedenen JFETs geben. Der Übersichtslichkeit halber beschränken sich die Betrachtungen hier auf einige wenige leicht beschaffbare und weit verbreitete Typen, nämlich BC264, BF245, BF247 und BF256. Sie sind alle N-Kanal-Typen mit gleicher Anschlussbelegung (Bild 2)

und relativ ähnlichen und weitgehend überlappenden Kenndaten. Der ebenfalls weithin bekannte BF244 hat laut Datenblatt dieselben elektrischen Eigenschaften wie der BF245, nur die Anschlüsse sind anders (Gate in der Mitte). Gleiches gilt für den BF246, der elektrisch zumindest theoretisch mit dem BF247 identisch ist. Diese beiden würden aber nicht in das hier abgedruckte Platinenlayout passen. Darüber hinaus gibt es noch zahllose „2Nxxxx“-Typen sowie „Exxx“, „Jxxx“ und weitere, die hier nicht näher betrachtet werden. Auch die selten verwendeten P-Kanal-Typen werden nicht berücksichtigt, sonst würde es den Rahmen dieses Beitrags sprengen.

## Praktische Schaltungstechnik

N-Kanal-JFETs haben vieles mit Trioden gemeinsam. Die drei Anschlüsse Source, Drain und Gate entsprechen Kathode, Anode und Gitter. Die Gate-Spannung ist negativ gegenüber Source, die Drain-Spannung positiv. Der JFET ist bei Gate-Spannung von 0 V leitend, womit er einer Verstärkerröhre entspricht. So gesehen kann man eine Röhre auch als selbstleitenden N-Kanal-FET ansehen. Der Durchlasswiderstand kann sehr stark streuen. Bei verschiedenen Exemplaren des BF245 wurden Werte zwischen rund 20 und 200 Ohm gemessen! Ist die Gate-Span-

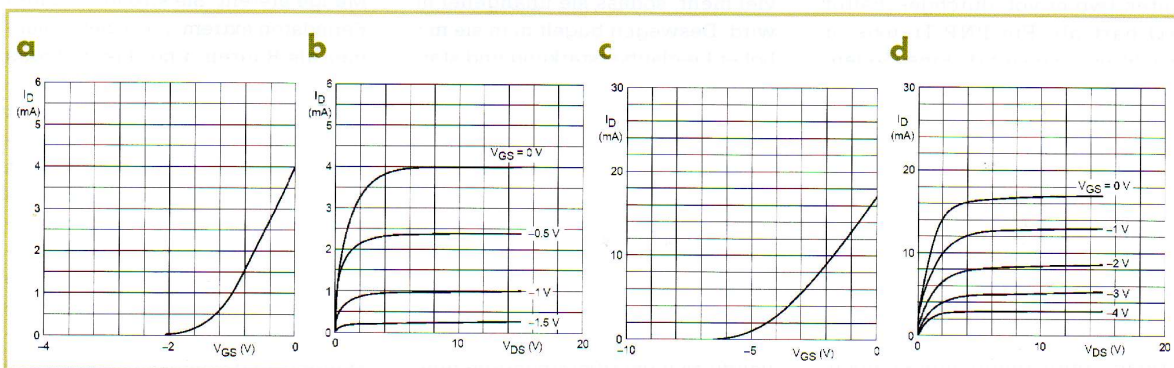


Bild 3. Die offiziellen Kennlinien von BF245A und BF245C. Der BF245B liegt etwa in der Mitte dazwischen. (Quelle: Philips)

- Drainstrom in Abhängigkeit von der Gatespannung beim BF245A.
- Drainstrom in Abhängigkeit von der Drainspannung beim BF245A.
- Drainstrom in Abhängigkeit von der Gatespannung beim BF245C.
- Drainstrom in Abhängigkeit von der Drainspannung beim BF245C.

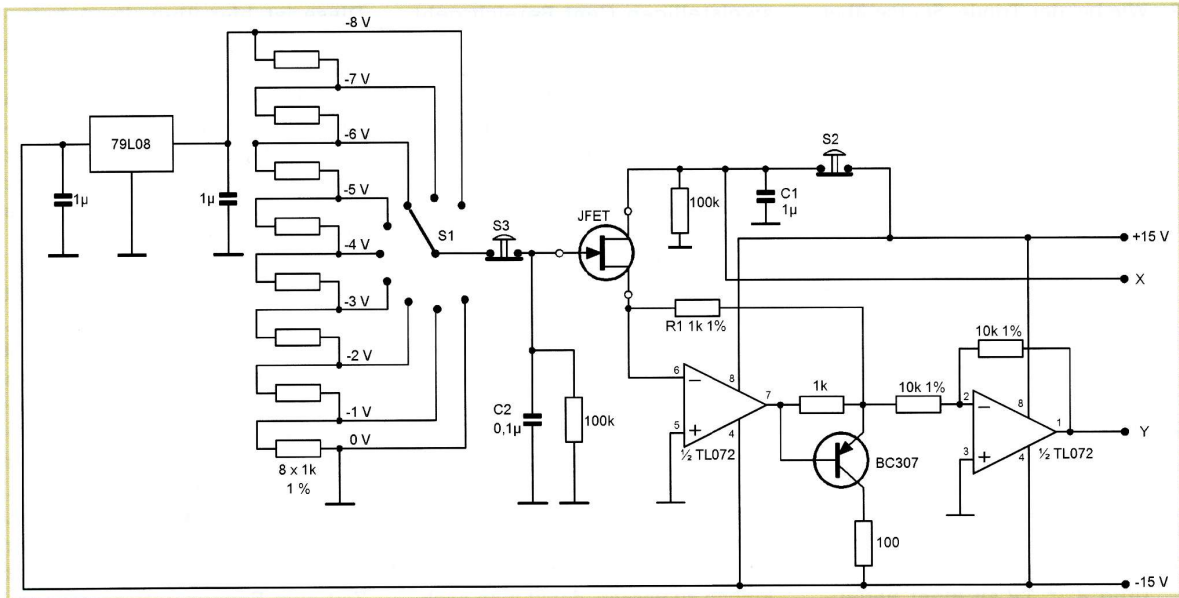


Bild 4. Schaltung zur Aufnahme von JFET-Kennlinien mit einem PC. Eingehende Erläuterung siehe Elektor-Röhren-Sonderheft 4, S. 70...76.

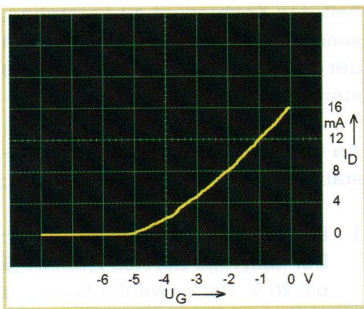


Bild 5. Mit der Schaltung von Bild 4 aufgenommene  $I_D/U_G$ -Kennlinie.

nung genügend negativ, sperrt ein JFET wie auch eine Röhre. Typische Kennlinien zeigen die Bilder 3a bis 3d. Wer die Kennlinien selbst ausmessen will, kann sich die Schaltung von Bild 4 aufbauen. Dies ist eine Niederspannungsvariante der Röhrenmessschaltung aus dem Elektor-Röhren-Sonderheft 4 auf Seite 70...76, wo auch die genaue Erklärung steht. Damit bekommt man die Kurve auf den PC-Bildschirm (Bild 5).

Für die Schaltung gibt es mehrere Alternativen:

1. Source an Masse, Drain über den Arbeitswiderstand  $R_D$  an die positive Versorgungsspannung, Gate über einen hohen Widerstand  $R_G$  an eine passende negative Vorspannung, die hier zwecks Anpassung an unterschiedliche Abschneurspannungen mit einem Trimpoti TP einstellbar sein muss (Bild 6a).

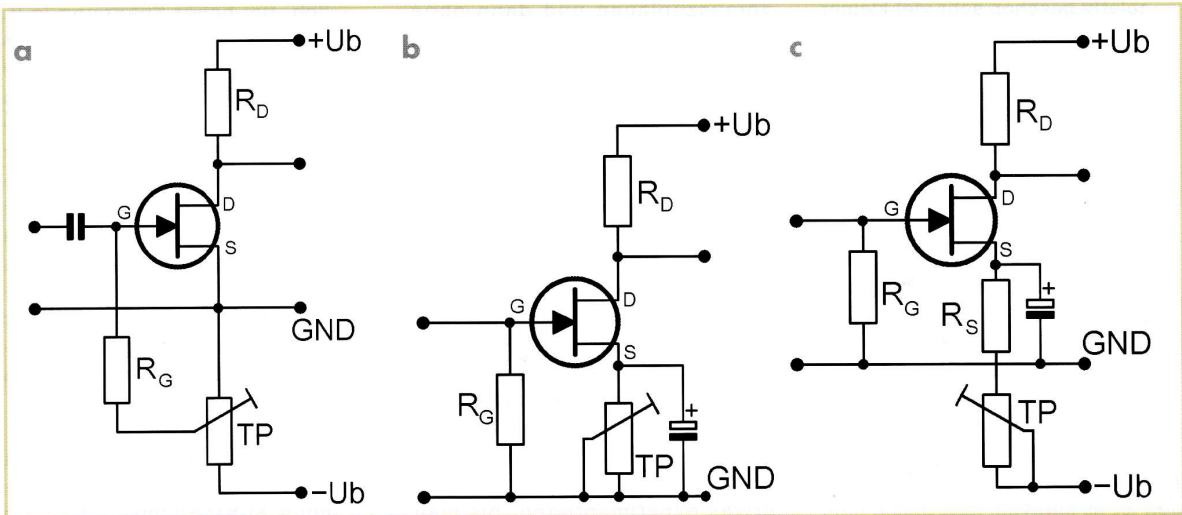


Bild 6. Drei verschiedene Betriebschaltungen für n-Kanal-JFETs:  
a) mit negativer Gate-Vorspannung. Diese muss für jedes Exemplar individuell eingestellt werden.  
b) mit Source-Widerstand nach Masse. Dieser unterliegt in der Praxis sehr starken Streuungen, die Einstellung ist schwierig.  
c) mit Source-Widerstand zur negativen Versorgungsspannung. Hier fallen dessen Streuungen weit geringer aus, der Abgleich ist einfacher.

2. Wie bei der Triode: Source über den einstellbaren Widerstand TP an Masse, der zur Vermeidung von Gegenkopplung mit einem Elko überbrückt wird; Drain über den Arbeitswiderstand  $R_D$  an die positive Versorgungsspannung, Gate über einen hochohmigen Widerstand  $R_G$  an Masse (Bild 6b). Vorteilhaft ist hier, dass man mit einer einfachen Versorgungsspannung auskommt. Nachteilig ist, dass in der Praxis die optimalen Werte von TP über mehr als eine Größenordnung hinweg streuen können. Man bräuhete deshalb für TP eigentlich ein logarithmisches Trimpoti, doch so etwas gibt es nicht.

3. Source über die Reihenschaltung  $R_S \cdot TP$  zu einer negativen Versorgungsspannung und über einen Elko an Masse, Drain über den Arbeitswiderstand  $R_D$  zur positiven Versorgungsspannung, Gate über einen hohen Widerstand  $R_G$  an Masse (Bild 6c). Diese Schaltung ist günstiger als die ersten beiden. Indem der Source-Pfad zur negativen Versorgungsspannung führt, fällt der optimale Source-Widerstand sehr viel größer aus. Die Streuungen des Drainstromes werden jetzt von den Streuungen der Summe von Abschnürspannung und negativer Versorgungsspannung bestimmt, die relativ gesehen sehr viel kleiner sind. So haben die Exemplarstreuungen der Gate-Abschnürspannung weit weniger Auswirkung. Man kommt mit einem linearen Trimpoti aus. Schaltet man dem Source-Elko einen Widerstand in Reihe, so wirkt dieser gegenkoppelnd. Dadurch nehmen die Verzerrungen ab, die „gotischen Spitzbögen“ begradigen sich. Dafür sinkt die Verstärkung; sie ist immer kleiner als das Verhältnis von Arbeitswiderstand zu Gegenkopplungswiderstand.

Angesichts der extremen Streuungen ist es sinnvoll, sich gleich eine größere Anzahl von unterschiedlichen JFET-Typen zu kaufen, am besten bei mehreren verschiedenen Händlern. Dank Preisen im

zweistelligen Cent-Bereich geht das nicht sehr ins Geld. Die Transistoren selektiert man dann selbst. In Audioverstärkerschaltungen ist dabei die Abschnürspannung nicht die entscheidende Größe, sondern die erreichbare Wechselspannungsverstärkung, die auch sehr stark variiert. Zur Untersuchung eignet sich die Schaltung von Bild 6c, bei der man mit einem Oszilloskop die Signalspannungen im unverzerrten Bereich an Gate und Drain misst und ins Verhältnis setzt. Bei sechzehn vom Autor durchgemessenen BF245 mit Arbeitswiderstand 100 k $\Omega$  ergaben sich Werte zwischen 22- und 60-fach, wobei kein Zusammenhang mit den Abschnürspannungsklassen zu erkennen war. Es ist wichtig solche Dinge vor dem Einbau zu wissen, damit man nachher keine Überraschungen erlebt. Alle gekauften JFETs sollte man erst einmal testen.

### Einsatz in Gitarrenverstärkern

Hat man sich auf diese Weise mit den Eigenschaften der JFETs genügend vertraut gemacht, kann man sie durchaus für E-Gitarren einsetzen und damit exzellente Sounds erzielen. Es empfiehlt sich aber dringend, die Schaltung nicht bis ins letzte Detail am Schreibtisch vor auszuplanen und dann ohne nachzudenken aufzubauen, sondern vielmehr bis zuletzt flexibel zu bleiben und sich eine Reihe von Anpassungsmöglichkeiten offen zu lassen.

Die Vorteile der hier beschriebenen röhrenlosen Gitarrenverstärkervorstufe sind neben der Mikrofoniefreiheit kleinerer Raumbedarf, Wegfall von Hochspannung und Wärmezeugung, schließlich auch sehr viel niedrigere Kosten. Die wichtige Frage ist natürlich, wie gut lässt sich damit ein Röhrensound imitieren? Die Antwort lautet: Im Prinzip sehr gut. Dazu muss man aber mit den Schaltungsparametern etwas experimentieren, bis man die optimale Einstellung findet. Für den Klang spielt die Relation von geradzahigen zu ungeradzahigen Harmonischen eine wichtige Rolle.

Diese ist hier über die Arbeitspunkte justierbar. Das geht in den üblichen Röhrenschaltungen praktisch nie. Bei Röhrentausch kann sich aufgrund der Röhrentoleranzen und der Emissionsfähigkeit der Kathode viel ändern, sodass der Verstärker anschließend anders klingt.

Die beschriebenen Streuungen sind wahrscheinlich der Hauptgrund, warum sich JFETs in kommerziell produzierten Gitarrenverstärkern so wenig verbreitet haben. Mit aufwändigen Sortier- und Justierarbeiten möchte sich kein Hersteller in einer Großserie herumplagen. Doch Selbstbau ist etwas anderes. Da geht es nur um ein Stück oder um einige wenige und man hat Zeit zum Experimentieren. In diesem Sinne ist die hier beschriebene Schaltung nicht als fertig ausgearbeitetes Kochrezept zu verstehen, sondern vielmehr als Plattform, von der aus man eigene Experimente starten kann.

An welchen Parametern einer Verstärkerstufe es sich zu drehen lohnt:

1. Positive Versorgungsspannung: Der sinnvolle Bereich ist etwa 5 bis 20 V. Der gewählte Wert hat entscheidenden Einfluss auf das Übersteuerungsverhalten. Zwar ist das im Prinzip immer weich, aber letztlich doch unterschiedlich. Bei hoher Spannung (z.B. 15 V) ist der verzerrungsarme Aussteuerungsbereich relativ groß, die Randbereiche sind im Vergleich dazu klein. Der Übergangsbereich ist also relativ gesehen schmal. Bei niedrigerer Spannung schrumpft der mittlere Bereich zusammen, die Randbereiche bleiben aber etwa gleich breit. So wird der Übergangsbereich zwischen sauber und verzerrt relativ gesehen größer. Hier hat man viel Spielraum zum Ausprobieren.
2. Arbeitswiderstand zwischen Drain und Versorgungsspannung: Er hat Einfluss auf die mit einer Stufe maximal erreichbare Spannungsverstärkung. Diese nimmt mit wachsendem Arbeitswiderstand zu, allerdings stark

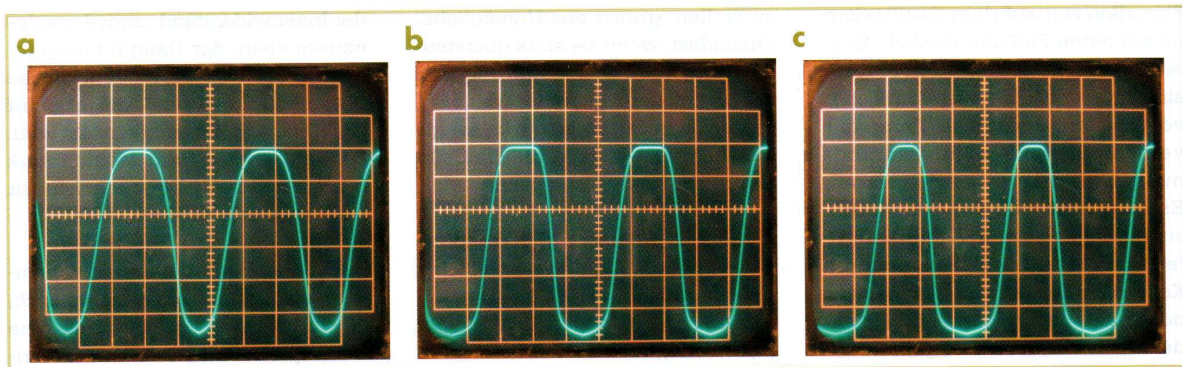


Bild 7. Verschieden eingestellte Arbeitspunkte führen bei Übersteuerung zu unterschiedlichem Gehalt an Harmonischen (Eingangssignalförm jeweils Dreieck). Den Feinabgleich macht man nach Gehör. Skalierung vertikal 1 V/Teil, Frequenz 1 kHz.

- a) Drainstrom niedriger ( $R_D$  größer)
- b) Drainstrom mittel ( $R_D$  mittel)
- c) Drainstrom höher ( $R_D$  kleiner)

unterproportional. Eine gewisse sinnvolle Obergrenze liegt bei etwa 100 kOhm. Wesentlich darüber würde die Schaltung allzu hochohmig, eine externe Last hätte Rückwirkungen, und wegen parasitärer Kapazitäten würde die obere Grenzfrequenz absinken.

Der Source-Widerstand muss so gewählt werden, dass die auf dem Oszilloskop beobachtete Abkappung der Signalkurve oben und unten etwa gleichzeitig einsetzt. Eine Feineinstellung für eine optimale Relation zwischen geradzahligen und ungeradzahligen Harmonischen kann man anschließend noch nach Gehör machen. Bild 7a...7c zeigt drei leicht verschiedene Einstellungen. Bei symmetrischer Versorgung liegt  $R_S$  größenordnungsmäßig beim 2- bis 3-fachen von  $R_D$ .

### Vorstufe mit Vierkanal-Klangsteller

Die in Bild 8 wiedergegebene Gitarrenverstärkervorstufe hat einige Ähnlichkeit mit der in Elektor-Röhren-Sonderheft 6 auf Seite 40...48 veröffentlichten Röhrenschaltung. Der Klangstellerteil beruht auf dem gleichen Prinzip. Davor gesetzt sind zwei Verstärkerstufen. Die erste Stufe hebt den Signalpegel nur mäßig an. Das Trimpoti TP1 soll so eingestellt werden, dass die Stufe bei starken Anschlägen gerade eben

noch nicht übersteuert, das macht die zweite Stufe dann kräftig. Zur Einstellung sitzt zwischen beiden Stufen das „Gain“-Poti. Die positive Versorgungsspannung der zweiten Stufe lässt sich mit einem Trimpoti absenken, damit die Übersteuerungsgrenze schneller erreicht wird. Ihr Arbeitswiderstand ist geteilt, um die Signalspannung so weit abzuschwächen, dass der nachfolgende Klangsteller auf keinen Fall übersteuert wird. Dieser besteht aus mehreren Teilen. Zuerst kommt ein üblicher Höhen/Tiefen-Steller, wie aus dem HiFi-Bereich bekannt. Dieser allein wäre aber für E-Gitarren nicht ausreichend. Es folgt ein aktiver Präsenzsteller, der die Obertonfrequenzen bei etwa 3 kHz um bis zu 12 dB anhebt, aber nicht absenkt. Anschließend ist ein passiver Mittensteller geschaltet, der die Frequenzen bei 500 Hz um bis zu 12 dB absenkt, aber nicht anhebt. Dieses Konzept hat sich in der Praxis als klanglich sehr günstig erwiesen. Am Ende folgt noch eine Impedanzwandlerstufe und dahinter das Poti für die endgültige Lautstärkeinstellung („Master“). Die Widerstände R5, R17, R21, R24 und R28 haben den Zweck, das Gate des nachfolgenden JFETs auf einem definierten Potenzial zu halten für den Fall, dass der Schleifer eines Potis einmal keinen Kontakt hat.

In üblicher Transistortechnik wird der Höhen/Tiefen-Steller häufig mit einem Operationsverstärker

mit an Masse gelegtem nicht invertierendem Eingang realisiert. An dessen Stelle tritt hier eine verstärkende JFET-Stufe mit nachgeschaltetem Impedanzwandler. Der Präsenzsteller arbeitet mit einem aus zwei JFETs und einen PNP-Transistor gebildeten Einfachst-Operationsverstärker. Durch die Pegelabschwächung in der übersteuerten zweiten Verstärkerstufe wird eine Übersteuerung des PNP-Transistors sicher verhindert. Der dafür entscheidende Widerstand ist R7. Er ist hier so gewählt, dass, wenn diese Stufe mit der vollen Betriebsspannung versorgt wird und alle vier Klangstellerpotis bis an den rechten Anschlag gedreht sind, auch bei starker Übersteuerung der zweiten Verstärkerstufe der PNP-Transistor immer noch im linearen Bereich bleibt. Wenn man TP3 herunterdreht, um die Übersteuerung schon früher einsetzen zu lassen, kann man R7 auch größer machen.

Als JFETs eignen sich wie gesagt die Typen BC264, BF245, BF247, BF256 und eventuell auch noch andere. T6 und T7 sollten möglichst gleiche Abschnürspannungen haben. Die in Bild 8 mit einem Stern gekennzeichneten Widerstandswerte sind nur als ungefähre Richtwerte zu verstehen. Mit diesen hat der Aufbau des Autors funktioniert. Bei deutlich anderen Kenndaten der verwendeten JFETs müssen sie unter Umständen abgeändert werden. Eine Kontrolle der

Signalkurven auf dem Oszilloskop ist auf jeden Fall unerlässlich. Zum Aufbau (Bild 9): Auf der Platine sind für jeden JFET vier Bohrlöcher vorgesehen, damit sich Typen mit verschiedenen Anschlussanordnungen (Bild 2) verwenden lassen. Es empfiehlt sich auf der Platine zuerst die einzelnen Verstärkerstufen für sich zu bestücken, aber die Koppelkondensatoren dazwischen noch nicht gleich einzusetzen, sondern zuerst die Arbeitspunkte zu testen und zu justieren. Erst wenn jede einzelne Stufe für sich optimal funktioniert, kann man die Kondensatoren dazwischensetzen und den Gesamttest vornehmen.

## Zum Thema Endstufe

Die schlechte Nachricht zuerst: Die Eigenschaften einer Röhrendstufe mit Halbleitern nachvollziehen

zu wollen, grenzt ans Unmögliche. Zumindest, wenn sie stark übersteuert werden soll. Bleibt man aber von der Übersteuerungsgrenze weit weg, so kann man das Verhalten halbwegs annähern. Die Vorteile, die die Halbleitertechnik hier bietet, sind:

- keine Probleme mit Exemplarstreuungen,
- leerlauffest,
- Betrieb mit niedrigen Spannungen (Batterie),
- geringeres Bauvolumen und Gewicht,
- erhebliche Kosteneinsparung.

Einer der Hauptunterschiede zwischen einer Röhren- und einer Transistorendstufe liegt im Innenwiderstand des Ausgangs bzw. dem damit verbundenen Dämpfungsfaktor – dem Verhältnis von Lastwiderstand zu Innenwiderstand.

Bei Transistor-Endstufen (HiFi) ist

der Innenwiderstand normalerweise extrem klein, der Dämpfungsfaktor sehr hoch, was durch sehr starke Gegenkopplung vom Ausgang auf den (Differenz-)Eingang erreicht wird. Der Lautsprecher wird dadurch stark bedämpft, d.h. er ist fest angekoppelt und entfaltet kein Eigenleben.

Bei Röhren-Endstufen ist der Innenwiderstand normalerweise sehr hoch, da eine Pentode von Natur aus eine Stromquelle ist. (Ausnahmen: Triodenschaltung und PPP-Endstufe). Er wird durch Gegenkopplung herabgesetzt, kommt aber nicht auf fast Null. Je stärker die Gegenkopplung, desto geringer werden die Klirrzerrungen, und desto weniger kommen Exemplarstreuungen der Röhren zur Auswirkung. Der Lautsprecher ist immer mehr oder weniger lose angekoppelt, seine Eigenresonanz ist weniger bedämpft, sein Eigenklang kommt mit hinein. Derartiges ist nicht gut für HiFi, wohl aber für

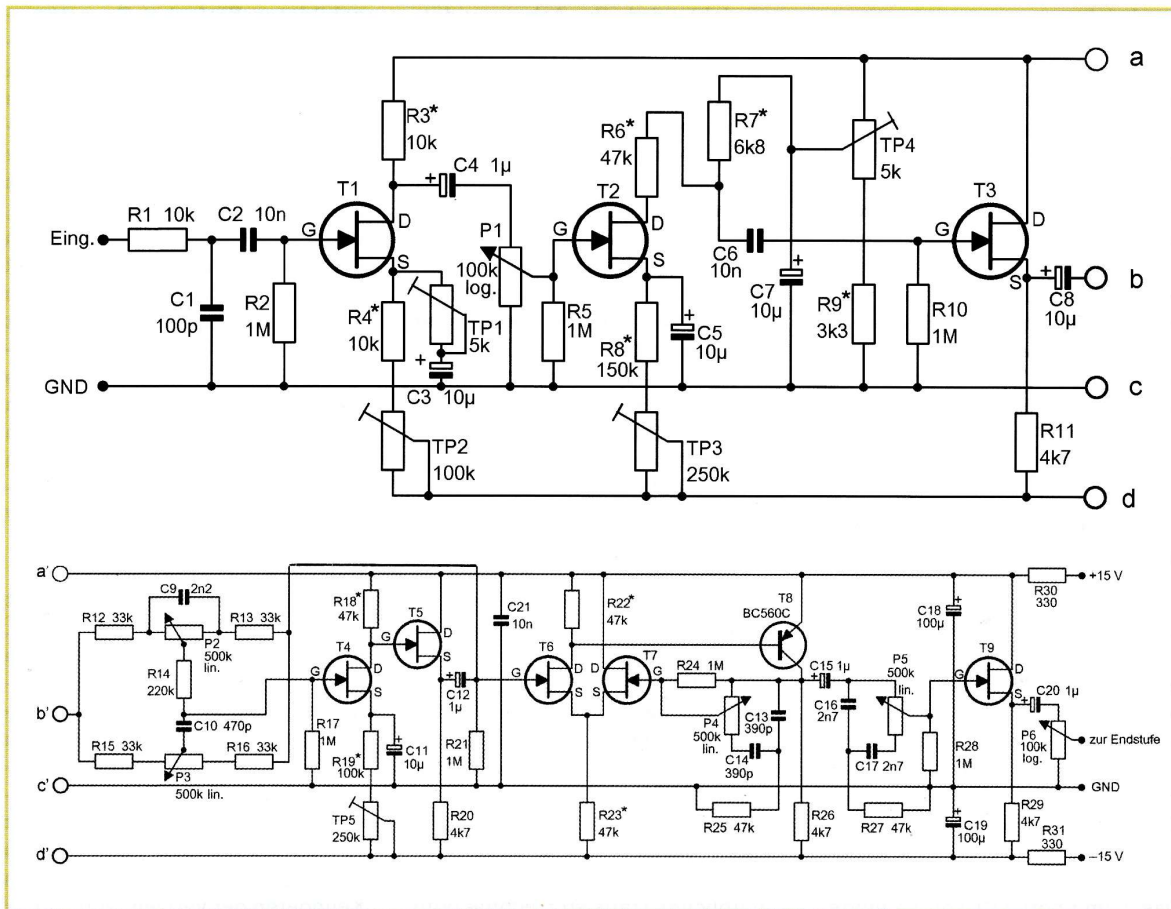
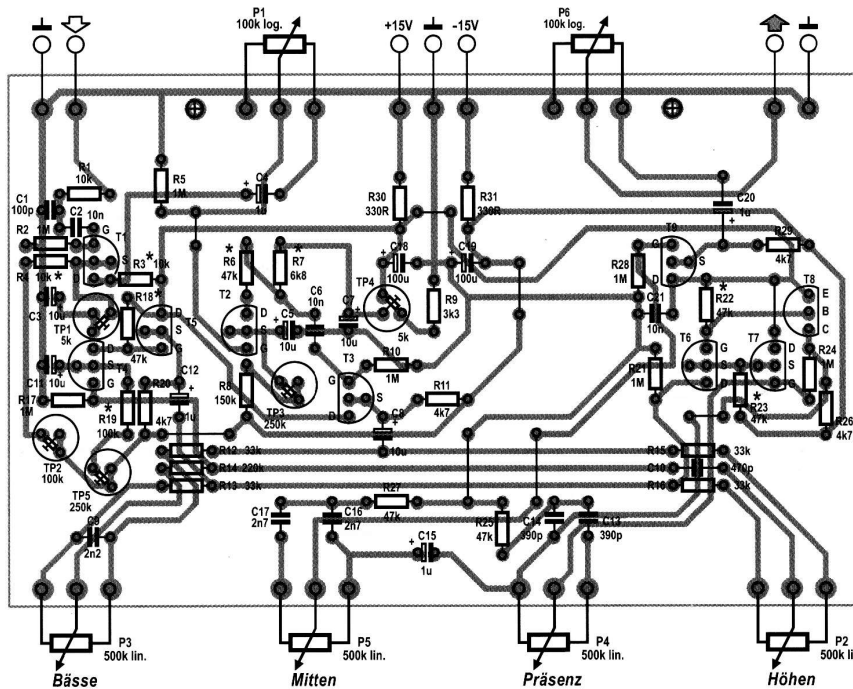
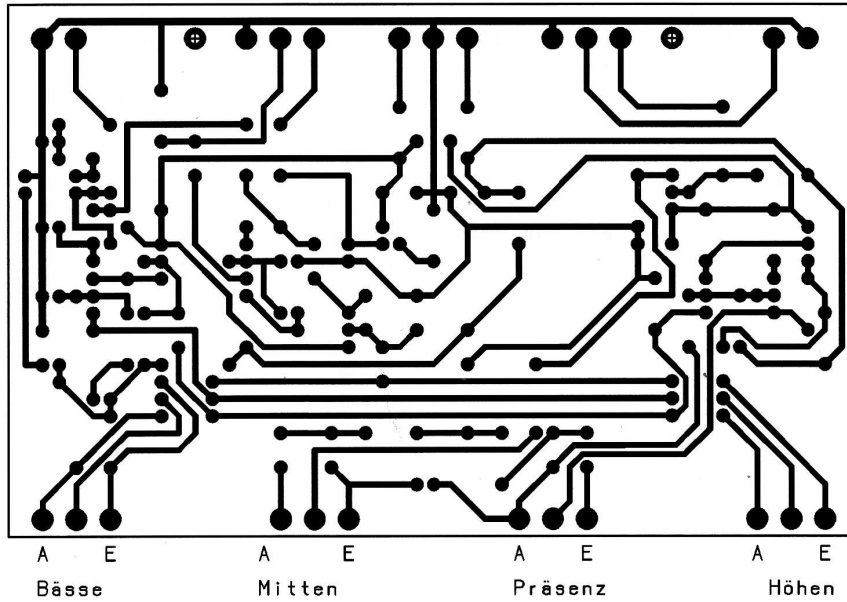


Bild 8. Weich übersteuerbare Gitarrenverstärkervorstufe mit Vierkanal-Klangsteller. Als JFETs sind die Typen BC264, BF245, BF247, BF256 und eventuell noch andere geeignet. Die Werte der mit einem Stern gekennzeichneten Widerstände dienen nur zur ungefähren Orientierung und müssen ggf. passend zu den JFETs abgeändert werden.

E-Gitarre. Ein einfacher Versuch dazu: Man nehme einen nicht angeschlossenen Lautsprecher und klopfe mit dem Finger leicht auf die Membran. Dann hört man die Eigenresonanzfrequenz. Jetzt schlieÙe man die beiden Anschlussklemmen kurz und klopfe noch

mal. Da hört man die Eigenresonanz auf einmal nicht mehr. Der Lautsprecher ist total bedämpft. Es gibt nun einen Trick, wie man bei einer Transistorendstufe den Innenwiderstand von sehr niedrig auf hoch abändern kann. Hier ist er gezeigt für integrierte Bausteine,

die es mittlerweile massenhaft gibt (z.B. TDA7294, LM3886 und viele andere). Sie benötigen nur ganz wenige externe Bauelemente. Ihr innerer Aufbau hat große Ähnlichkeit mit einem Operationsverstärker, d.h. sie haben einen Differenzgang.



Korrektur

T6  
D  
S  
G

Bild 9. Platinenlayout und Bestückungsplan (Abmessungen 125 mm x 75 mm).

Bild 10a zeigt die Normalbeschaltung wie in HiFi-Verstärkern üblich: Über einen Spannungsteiler geht die Ausgangsspannung auf den invertierenden Eingang zurück, der nicht invertierende Eingang erhält das Eingangssignal. Die Spannungsverstärkung liegt üblicherweise bei etwa 10- bis 20-fach, sie wird durch das Teilverhältnis festgelegt. Die Leerlaufverstärkung dieser Bausteine liegt meist bei einigen 1000. Man kann also die Gegenkopplung auch schwächer einstellen, indem man das Spannungsteilerverhältnis größer macht. Doch um mit dem Innenwiderstand in die gleiche Größenordnung wie bei schwach oder gar nicht gegengekoppelten Röhrenendstufen zu

kommen, reicht das noch nicht. Die Schaltung bleibt mehr oder weniger eine Spannungsquelle.

Sehr viel wirksamer ist ein anderer Weg. Man kann einen solchen Baustein auch als Stromquelle schalten. Dazu wird in die Lautsprecherzuleitung masseseitig ein Widerstand eingefügt, und der invertierende Eingang wird an dessen oberes Ende angeschlossen (Bild 10b). Der Innenwiderstand einer derartigen Endstufe ist jetzt annähernd unendlich, der Dämpfungsfaktor praktisch Null. Die Eigenresonanz des Lautsprechers kommt voll zur Wirkung – für HiFi-Zwecke absolut unbrauchbar. Für Gitarrenwiedergabe ist so etwas verwendbar, voraus-

gesetzt sie liegt unterhalb von 82 Hz, dem tiefsten Gitarrenton. Liegt sie über diesem, dann wird ein enger Frequenzbereich um die Resonanz herum stark überbetont, was stört.

Optimal ist hier ein Innenwiderstand im ein- bis zweistelligen Ohm-Bereich. Dieser ist zu erreichen, indem man zwischen der Spannungsquellen- und der Stromquellen-Schaltung eine Kreuzung vollzieht. Der Spannungsteiler aus der Schaltung 10a wird mit seinem unteren Ende nicht an Masse, sondern an das obere Ende des Widerstands aus der Schaltung 10b angeschlossen (es entsteht die Schaltung nach Bild 10c). Um möglichst

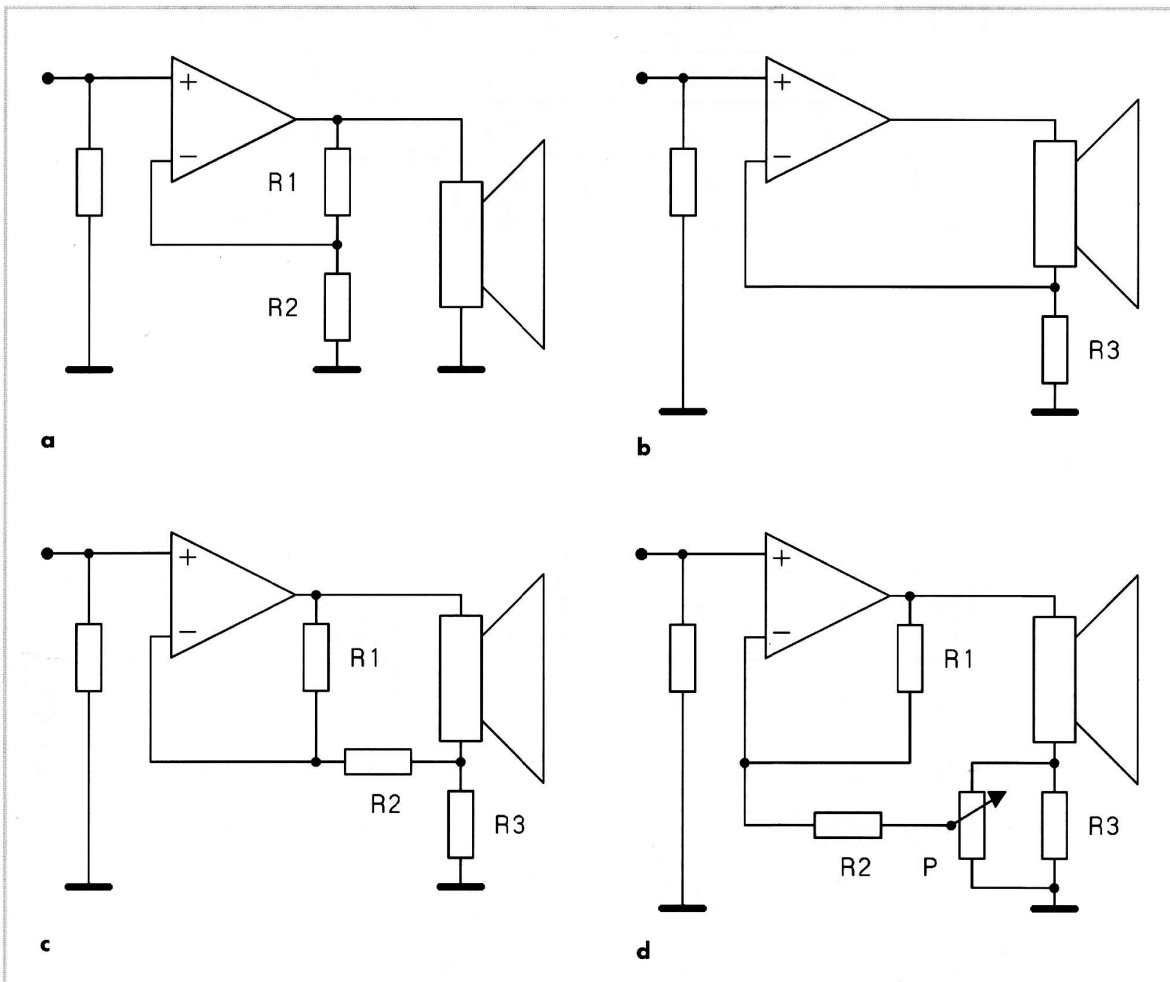


Bild 10. Schaltungsmöglichkeiten mit integrierten Transistorendstufen (TDA7294, LM3886 u.ä.):  
 a) HiFi-Schaltung, Spannungsquelle, Innenwiderstand fast Null,  
 b) Stromquellen-Schaltung, Innenwiderstand sehr hoch,  
 c) mit mittlerem Innenwiderstand,  
 d) mit einstellbarem Innenwiderstand.

wenig Ausgangsleistung zu verlieren, wird dieser sehr klein gemacht, typisch  $0,22 \Omega$  bis  $0,33 \Omega$ . Der Innenwiderstand dieser Schaltung ist jetzt mittelgroß, er beträgt näherungsweise Fußpunkt-widerstand mal Spannungsverstärkung. Ein Beispiel: Die Spannungsverstärkung wird mit dem Spannungsteiler auf etwa 100 eingestellt ( $100 \text{ k}\Omega : 1 \text{ k}\Omega$ ), der Fußpunkt-widerstand wird zu  $0,22 \Omega$  gewählt. Dann ist der Innenwiderstand  $22 \Omega$ . Das ist bereits ein typischer Wert für Gitarren-Endstufen. Dieser Trick ist mittlerweile weit verbreitet. Studiert man die Schaltungen von kommerziellen Transistor-Gitarrenverstärkern, dann findet man ihn sehr häufig.

Bei der Schaltung von Bild 10c ist der Innenwiderstand natürlich fest. Man kann ihn aber auch variabel machen. Dazu muss man den Fußpunkt des Spannungsteilers sozusagen zwischen den beiden Enden des Fußpunkt-widerstandes hin- und herfahren. Potentiometer mit  $0,22 \Omega$  werden nun allerdings nicht hergestellt. Deshalb legt man ein größeres parallel. Der genaue Wert ist unkritisch, z. B.  $100 \Omega$  bis  $1 \text{ k}\Omega$  (Bild 10d). Damit kann man dann den Innenwiderstand kontinuierlich einstellen, von mehr „transistorartig“ (sehr niedrig) bis mehr „röhrenartig“ (hoch).

Wenn man die anderen Eigenschaften von Röhrenverstärkern mit Halbleitern imitieren will, wird es allerdings ausgesprochen schwierig.

1. Übersteuerungsverhalten: Das Abkappen kann härter oder weicher vor sich gehen, das ist bei verschiedenen Röhrenverstärkern sehr unterschiedlich. Es hängt ab von Röhrentyp, von der Gegenkopplung und von der Impedanzanpassung. Antiparallele Dioden vor dem Eingang der Endstufe können hartes Abkappen verhindern. Sie bringen zumindest eine Annäherung, eine perfekte Imitation des Röhrensounds allerdings noch nicht.

2. Magnetische Sättigung des Ausgangsübertragers: Hierdurch entstehen Stufen in der Mitte der Signalkurve. Das ist mit eisenlosen Transistor-Endstufen prinzipiell nicht zu erreichen. Dazu müsste man den Übertrager wieder einführen. Solche Endstufen gab es in den 60er Jahren, meistens noch mit Germanium-Transistoren. Die letzteren wiederzubeleben, wäre technischer Unfug. Einen Übertrager für Silizium-Bipolartransistoren oder MOS-FETs zu konzipieren, wäre möglich, allerdings mit einigem Arbeitsaufwand verbunden. Es ist ziemlich unwahrscheinlich, dass sich jemand da daran macht.

3. Veränderung der Hüllkurve, Kompressionseffekt: Dieser Effekt hängt damit zusammen, dass das Netzteil von Röhrenverstärkern üblicherweise nicht stabilisiert ist, sondern einen erheblichen Innenwiderstand hat. Bei starker Aussteuerung wird – bei einer üblichen AB-Endstufe – hoher Strom entnommen, wodurch die Spannung sinkt. Bei niedrigerer Ver-

sorgungsspannung sinkt aber der Verstärkungsfaktor der Endstufe. Wie stark, hängt entscheidend von der Gegenkopplung ab. Wie schnell, von der Größe der Ladekondensatoren. Die Vorgänge sind hier überaus komplex und bisher erst wenig erforscht, hier scheint auch die Schirmgitterspannung mit hineinzuspielen. Bei echten A-Endstufen tritt er nicht auf. Der Vox AC30 hat diesen nicht (wie vielfach angenommen), sondern einen sehr hoch eingestellten AB-Betrieb. Dadurch ist die Kompression bei diesem schwächer. Den Effekt mit Halbleitern zu imitieren, wäre vielleicht möglich, würde aber hohen Schaltungsaufwand und eine lange Entwicklungszeit erfordern. Dem Autor ist bisher kein Hersteller bekannt, der das versucht hätte. Einen Vorteil könnte das zumindest bieten: Man könnte den Effekt variabel machen, während seine Stärke bei den üblichen Röhrenverstärkern immer fest vorgegeben ist. Vielleicht macht sich ja noch mal irgendein ganz spitzfindiger Tüftler da dran. ♦

Dieser Artikel ist im Juni 2011 im Elektor-Sonderheft "Special Project Röhren 7" erschienen