

# Verstärkertechnik in der Audiowelt



## Teil 2: Die klassischen Schaltungstechniken von Audio-Leistungsverstärkern

***In diesem und den nächsten Artikeln möchten wir Ihnen die zeitliche Entwicklung der Schaltungstechnik von Leistungsverstärkern näher bringen und Sie auf eine Bauanleitung für einen hochwertigen Leistungsverstärker hinführen. Aus den aufgeführten Beispielen werden wir eines herausnehmen und dieses im Vergleich zu anderen analysieren. Wir möchten hier zuerst einige Beispiele der klassischen Schaltungen aus den 70er und Anfang der 80er Jahre vorstellen und etwas erläutern. Eine exakte Analyse aller Schaltungen würde den Rahmen der Artikel sprengen. Wir beschränken uns hier auf das Wichtigste.***

### Entwicklung der Transistorverstärker

Im vorhergehenden Artikel haben wir eine kurze Einführung in die Audioelektronik ab 1900 gegeben und die Techniken der Röhren- und Transistorelektronik kurz angerissen.

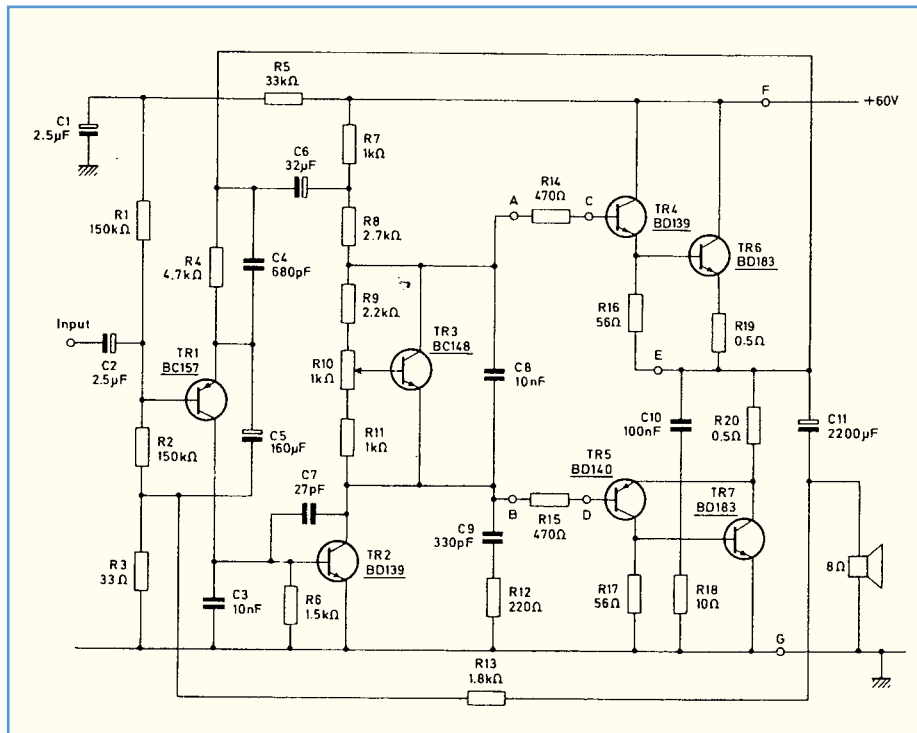
Ende der 60er Jahre ging es mit den Entwicklungen bei den Transistorverstärkern so richtig los. Zu dieser Zeit wurden auch die ersten kräftigen Leistungstransistoren auf den Markt gebracht. Der auch heute noch produzierte 2N3055 dürfte der bekannteste sein. Endlich war es möglich, kräftigere Transistorverstärker zu bauen, wobei hier die Ausgangsleistung durch die, im Vergleich zu heute, geringe Kollektor-Emit-

ter-Spannung der Leistungstransistoren begrenzt war. (2N3055:  $U_{CE_{max}} = 60\text{ V}$ ). Einige Urversionen der heutigen Schaltungen stammen übrigens aus den Labors der Röhrenhersteller, wie z. B. Valvo oder Mullard (Abbildung 1). In den ersten transformatorlosen Transistorschaltungen, wie auch in dieser von Mullard entworfenen Schaltung, wurde die Vorstufe, meist 2-stufig, in „Eintakt-Widerstandsverstärkerschaltung“ ausgeführt und auf hohe Leerlaufverstärkung „gebootstrapt“. C 6 übernimmt hier diese Bootstrap-Funktion in der 2. Stufe und erzeugt im Kollektorkreis eine hochohmige Stromquelle, die der Stufe (TR 2) eine hohe Spannungsverstärkung einprägt. Die Leistungsstufe, fast immer eine Darlington-Schaltung, war immer mit NPN-Ausgangstransistoren als „quasikom-

plementäre Endstufe“ ausgeführt, da zu dieser Zeit noch keine kräftigen PNP-Leistungstransistoren zur Verfügung standen. Eine quasikomplementäre Ausgangsstufe besteht immer aus zwei Ausgangstransistoren gleicher Polarität, in der der eine in Emitterschaltung (TR 7) und der zweite in Kollektorschaltung (TR 6) arbeitet. Meist besteht die Treiberstufe aus einem NPN- und einem PNP-Transistor, so dass der Ausgangstristor in Emitterschal-

#### Bitte beachten Sie!

Diese Serie enthält schaltungstechnische Details, die zum Teil patentrechtlich geschützt sind und somit nicht ohne weiteres gewerblich genutzt werden dürfen!



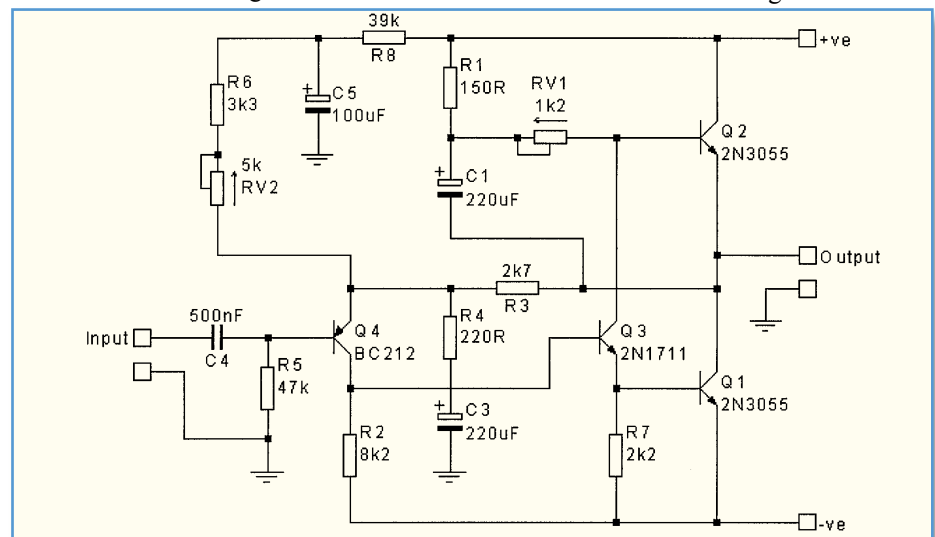
**Bild 1: Eine der ersten transformatorlosen Transistorschaltungen von Mullard**

nung als Stromentlastungs-Transistor (R5, TR7) und der Ausgangstransistor in Kollektorschaltung als 2. Emitterfolger in Darlington-Schaltung arbeitet (TR4, TR6). TR3 sorgt, in thermischem Kontakt zu den Leistungstransistoren, für einen nahezu konstanten Ruhestrom über den gesamten Betriebstemperaturbereich. Ohne diese Maßnahme würde sich die Endstufe bei Erwärmung selbst zerstören, weil sich die Basis-Emitter-Spannungen der Transistoren bei Erwärmung um  $2 \text{ mV}/^\circ\text{K}$  verringern und so der Ruhestrom bei konstanter Basisvorspannung über die Erwärmung der Leistungstransistoren immer weiter ansteigt. Wir bekommen eine thermische Mitkopplung bis zur Zerstörung der Leistungstransistoren. Diese und ähnliche Formen der Temperaturkompensation sind in fast allen analogen Leistungsendstufen zu finden.

**Es geht auch einfacher ...**

Die von John Linsley Hood 1969 vorgestellte Schaltung (Abbildung 2), eine 10-W-Class-A-Schaltung, ist deutlich einfacher als die Mullard-Schaltung. Hier wird die Treiberstufe mit der 2. Verstärkerstufe zusammengefasst (Q3). C1 bildet zusammen mit R1 und RV1 die Bootstrap-Stromquelle für die hohe Spannungsverstärkung von Q3. Gleichzeitig dient der Strom der Bootstrap-Stromquelle zur Einstellung des Ruhestroms durch die Leistungstransistoren Q1, Q2. Die Ausgangstransistoren arbeiten wieder als quasikomplementäre Ausgangsstufe. RV1 dient zur Ruhestromeinstellung, mit RV2 wird der Gleichspan-

nungsoffset auf ein Minimum justiert. Interessant ist, dass JLH hier schon mit symmetrischen Betriebsspannungen und ohne Koppel-Elko arbeitet. Eine Technik, die erst Mitte der 70er Verbreitung fand. Mit modernen hochverstärkenden Transistoren im Ausgang könnte man sich diese Schaltung auch mit höherer Ausgangsleistung vorstellen. Noch weniger aktive Bauelemente im Signalweg geht eigentlich nicht mehr, und das ist auch der Reiz an dieser Schaltung. Je weniger Nichtlinearitäten im Signalweg sind, um so besser der Klang, falls 10 W Ausgangsleistung ausreichen. Schaltungen dieser Art sind heute nicht nur in Selbstbaukreisen wieder aktuell. Mit den heutigen, deutlich besseren Transistoren und Kondensatoren lassen sich mit Variationen dieser Schaltung Verstärker mit er-



**Bild 2: Eine 10-W-Class-A-Schaltung von John Linsley Hood**

staunlicher Klangqualität realisieren. Aber Achtung: Diese Schaltung funktioniert nur im Class-A-Betrieb und erzeugt eine sehr hohe Verlustleistung, etwa das 5fache der Ausgangsleistung. Genau genommen ist es eine Eintakt-Class-A-Schaltung – daher die hohe Verlustleistung.

Diese Schaltung lädt ihrer Einfachheit wegen geradezu zum Experimentieren ein. Probieren Sie es doch mal mit modernen, hochlinearen Leistungstransistoren.

Vorsicht, die schnellen Versionen sind sehr schwingfreudig!

Viel Spaß beim Experimentieren!

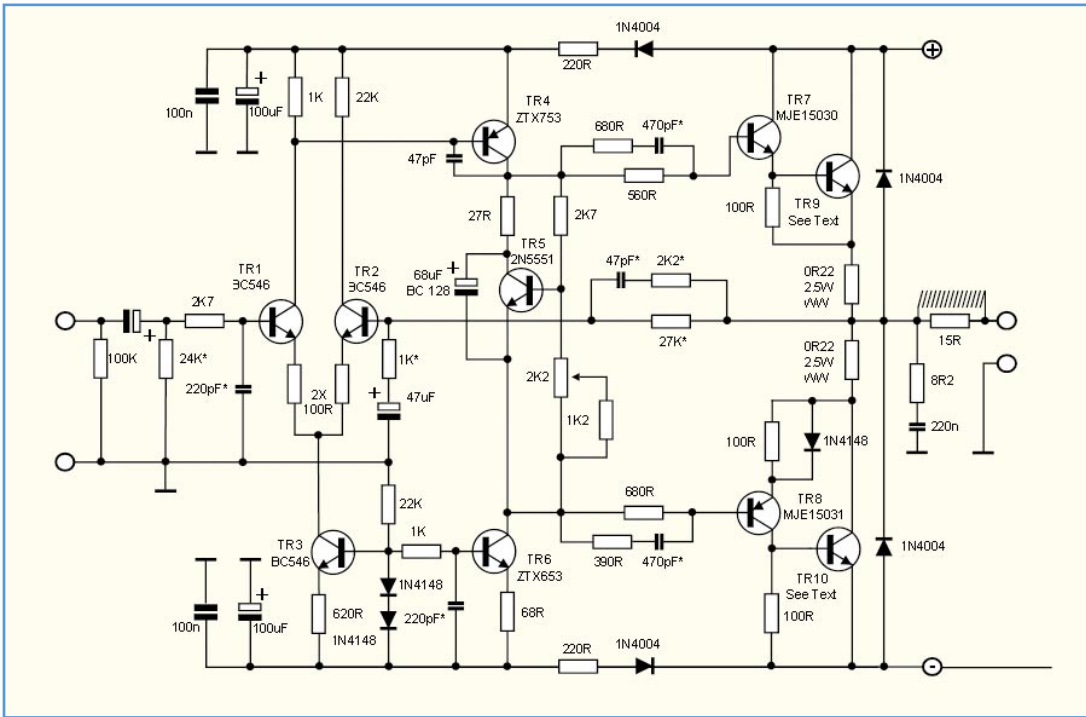
**Der Differenzverstärker, das Schaltungselement der modernen Leistungsverstärkertechnik**

Abbildung 3 zeigt eine der Standard-Schaltungen von Leistungsverstärkern überhaupt, die von vielen Entwicklern als die klanglich beste gekürt wird (u. a. wurde eine Variante dieser Schaltung in den bekannten Threshold-Verstärkern eingesetzt). Varianten dieser Schaltung, z. T. mit zwei Differenzstufen hintereinander, z. T. mit J-FETs bestückt, sind auch in vielen integrierten Audio-Operationsverstärkern zu finden.

**Wie funktioniert's?**

TR1 und TR2 bilden den besagten Differenzverstärker, ein bei gepaarten Transistoren und guter thermischer Kopplung sehr präziser Gleichspannungsverstärker mit hoher Verstärkung und geringer Drift. Die exakte Funktionsbeschreibung des Differenzverstärkers möchten wir uns hier des Umfangs wegen sparen. Sie ist in der Fachliteratur ausführlichst beschrieben.

Die Widerstände in den Emitterkreisen von TR1, TR2 dienen als lokale Gegenkopplung zur Verstärkungsreduzierung und Klirrfaktorminderung. Sie reduzie-



**Bild 3:** Eine der Standard-Schaltungen von Leistungsverstärkern

ren auch den Einfluss von Transistortoleranzen auf das Differenzverstärkungsverhalten. Bei kräftiger lokaler Gegenkopplung durch Emittterwiderstände kann hier auf selektierte Transistoren verzichtet werden. TR 3 bildet hier eine Stromquelle, die den Arbeitspunkt des Differenzverstärkers definiert. Der 1-k $\Omega$ -Widerstand im Kollektorkreis von TR 1 dient zur Signalkopplung und Vorspannungseinstellung der folgenden Spannungsverstärkerstufe. In dieser Spannungsverstärkerstufe arbeitet der Transistor TR 4 in Eintakt-Class-A-Schaltung mit einer Stromquelle TR 6 und erzeugt die gewünschte hohe Ausgangsspannung. Die Stromquelle hat hier den Vorteil, dass sie dem Transistor TR 4 bei relativ hohen Strömen (5...10 mA) einen hohen dynamischen Widerstand bietet (>100 k $\Omega$ ) und somit der Stufe eine hohe Spannungsverstärkung verpasst. In früheren Schaltungen wurde dies mit Bootstrapping realisiert (siehe Mullard-Schaltung R 7, R 8, C 6). TR 5 dient in thermischem Kontakt zu den Leistungstransistoren als variable Zener-Diode für die Einstellung und Konstanthaltung des

Ruhestroms durch die Leistungstransistoren. Die Leistungsstufe ist hier wie bei den frühen Entwicklungen als quasikomplementäre Leistungsstufe ausgeführt. Die Netzwerke in den Basissträngen von TR 7 und TR 8 reduzieren die Schnelligkeit der Ausgangsstufe und verhindern damit Klingeleffekte bei schnellen Impulsen und Rechtecksignalen. Diese Maßnahme ist bei sehr schnellen Transistoren besonders wichtig (TR 7, TR 8). Weiterhin ist das Netzwerk aus 1 k $\Omega$  und 47  $\mu$ F an der Basis von TR 2 wichtig.

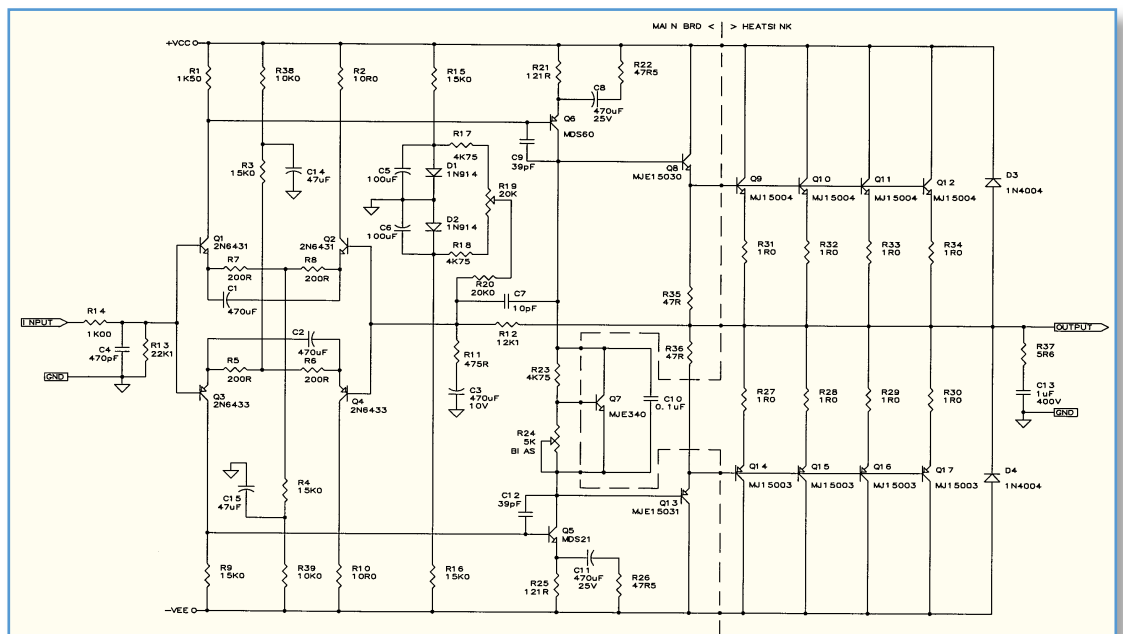
Hiermit wird eine Separierung der Gegenkopplung für Gleich- und Wechselspannungssignale vorgenommen. Der Differenzverstärker produziert immer einen gewissen Gleichspannungsoffset, der nicht mitverstärkt werden soll. Deshalb

wird die Verstärkung für Gleichspannungen durch den 47- $\mu$ F-Kondensator auf 1 reduziert.

Am Lautsprecher Ausgang finden wir noch ein Netzwerk aus einer Serienschaltung eines 8,2- $\Omega$ -Widerstands und eines 220-nF-Kondensators. Dieses so genannte Boucherot-Netzwerk dient zur Kompensation des Impedanzanstiegs im Hochtonbereich bei dynamischen Lautsprechern und den dabei entstehenden Phasendrehungen.

Das Netzwerk aus der Parallelschaltung einer kleinen Induktivität (ca. 10  $\mu$ H und einem Lastwiderstand, hier 15  $\Omega$ ) sorgt für eine Impedanzhöhung bei hohen Frequenzen und verhindert somit hohe Ströme und Schwingneigung bei kapazitiven Belastungen durch lange Lautsprecherka-

ren auch den Einfluss von Transistortoleranzen auf das Differenzverstärkungsverhalten. Bei kräftiger lokaler Gegenkopplung durch Emittterwiderstände kann hier auf selektierte Transistoren verzichtet werden. TR 3 bildet hier eine Stromquelle, die den Arbeitspunkt des Differenzverstärkers definiert. Der 1-k $\Omega$ -Widerstand im Kollektorkreis von TR 1 dient zur Signalkopplung und Vorspannungseinstellung der folgenden Spannungsverstärkerstufe. In dieser Spannungsverstärkerstufe arbeitet der Transistor TR 4 in Eintakt-Class-A-Schaltung mit einer Stromquelle TR 6 und erzeugt die gewünschte hohe Ausgangsspannung. Die Stromquelle hat hier den Vorteil, dass sie dem Transistor TR 4 bei relativ hohen Strömen (5...10 mA) einen hohen dynamischen Widerstand bietet (>100 k $\Omega$ ) und somit der Stufe eine hohe Spannungsverstärkung verpasst. In früheren Schaltungen wurde dies mit Bootstrapping realisiert (siehe Mullard-Schaltung R 7, R 8, C 6). TR 5 dient in thermischem Kontakt zu den Leistungstransistoren als variable Zener-Diode für die Einstellung und Konstanthaltung des



**Bild 4:** Das Leistungsteil einer Krell KSA100 von 1983

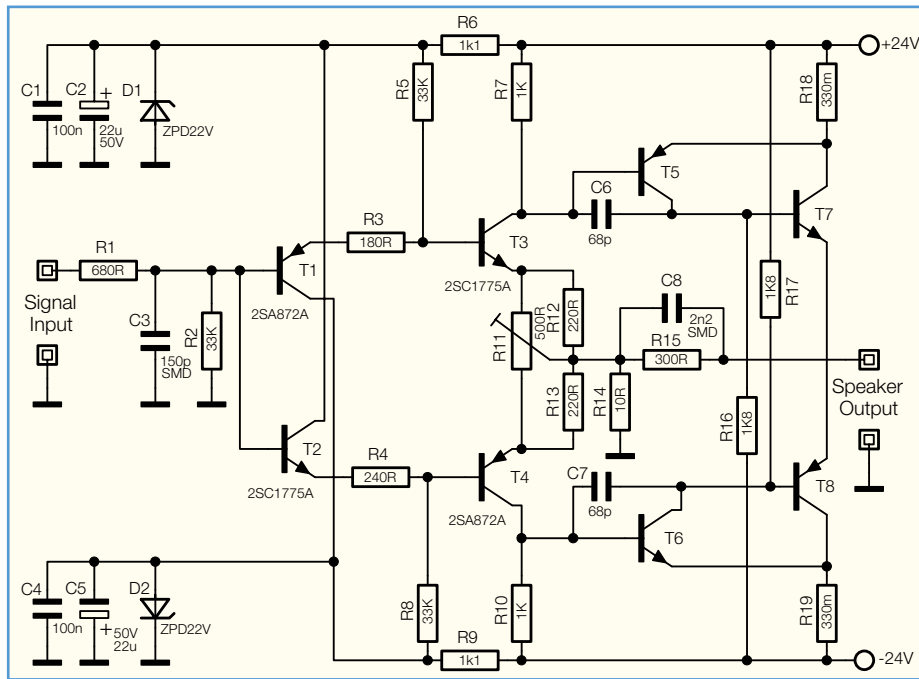


Bild 5: Schaltung der „Le Class A“ von Jean Hiraga

bel. Dies ist besonders bei stark gegengekoppelten Endstufen wichtig.

Die Schaltung entspricht der lange Zeit von der englischen Firma Naim eingesetzten Schaltung und ist in Abwandlung auch in vielen europäischen und asiatischen Geräten zu finden.

### Die vollsymmetrische Schaltung

In der vollsymmetrischen Variante mit Differenzverstärker (Abbildung 4) verhält sich alles so wie bei der asymmetrischen Version, bis auf den Unterschied, dass ein PNP- und ein NPN-Differenzverstärker (Q 1 bis Q 4) eine aus zwei Transistoren im Gegentakt arbeitende Spannungsverstärkerstufe ansteuern (Q 5, Q 6). Die Leerlaufverstärkung dieser Schaltung ist um einiges höher als bei der unsymmetrischen Variante und sollte deshalb mit lokalen Gegenkopplungen reduziert werden (R 5 bis R 8, R 22, R 26), damit der Verstärker stabil bleibt. Diese Schaltung wird vorwiegend für Verstärker mit hoher Ausgangsleistung und sehr geringem Klirrfaktor verwendet, weil durch die hohe Leerlaufverstärkung eine starke Gegenkopplung möglich ist. Gleichzeitig ist der Eigenklirrfaktor der Vorstufe durch die lokalen Gegenkopplungen sehr gering. Die lokale Gegenkopplung der Spannungsverstärkerstufe ist hier für Gleichspannungen (R 21, R 25) und Wechselspannungen (R 22, R 26) unterschiedlich. Eine Technik, mit der die Verstärkung unabhängig vom Ruhestrom eingestellt werden kann. Schaltungen dieser Art sind in der Lage, ohne Über-Alles-Gegenkopplung hohe Leistungen mit Bandbreiten bis über 50

kHz mit Klirrfaktoren bis unter -60 dB bei 1 kHz (0,1 %) bei Nennleistung abzugeben. Die Vorstufe (Differenzverstärker und Spannungsverstärker) schafft ohne Probleme Bandbreiten bis weit über 100 kHz bei Klirrfaktoren unter -80 dB (0,01 %) ohne Über-Alles-Gegenkopplung. Hierzu müssen alle Vorstufen entsprechend stark lokal gegengekoppelt werden (mit entsprechend großen Emitterwiderständen), und in der Leistungsstufe muss die Ansteuerung der Endtransistoren im Class-A-Betrieb stattfinden. Der Einsatz von speziellen Audio-Transistoren mit einer linearen Stromverstärkung in einem großen Strombereich ist für die hohe Performance ebenfalls notwendig.

Im Highend-Bereich, sprich in audiophilen Kreisen der Audiotechnik, entstand Mitte der 70er Jahre in Frankreich eine sehr interessante Schaltung für audiophile Class-A-Verstärker. Der Franko-Japaner Jean Hiraga sah damals das Problem, optimale Differenzverstärker zu beschaffen oder zu bauen. Ausgemessene, audiotaugliche Transistorpaare waren damals fast nicht zu bekommen und wenn, dann zu astronomischen Preisen. Zwei Transistoren exakt auszumessen und thermisch zu koppeln, damit sie das optimale gewünschte Differenzverstärkerverhalten bekommen, war auch nicht so einfach. Also musste eine andere, sehr interessante Schaltung her (Abbildung 5).

Jean Hiraga bediente sich einer Schaltungstechnik aus der HF-Technik und der sehr stabilen, schwer beeinflussbaren Stromgegenkopplung. T 1 bis T 4 bilden einen niederohmigen Buffer mit der Spannungsverstärkung 1. In der Mitte

des 500-Ω-Potis, mit dem man die Symmetrie einstellt, wird damit ein virtueller Massepunkt kreiert. Auf diesen virtuellen Massepunkt wirkt die Gegenkopplung mit den Widerständen 300 Ω und 10 Ω. Über den rückgeführten Strom wird die Verstärkung in den Transistoren der 2. Stufe geregelt.

Die unterschiedlichen Basisvorwiderstände (180 Ω/240 Ω) für T 3 und T 4 braucht man für die Balance der Arbeitspunkte der 2. Stufe. Die Stromverstärkungen der nachfolgenden PNP- und NPN-Transistoren differierten zu stark für den symmetrischen Betrieb. Mit den „Umkehr-Darlingtonen“ (TR 5 bis TR 8) am Ausgang wird sowohl die Spannungs- als auch die Stromverstärkung vorgenommen. Die Umkehr-Darlingtonen beinhalten zwei unterschiedliche Verstärkerstufen. Die Treiberstufen (T 5, T 6) arbeiten in Emitterschaltung und sorgen für die Spannungsverstärkung, die Ausgangstransistoren (T 7, T 8) arbeiten in Kollektorschaltung und verstärken den Strom der Emitterschaltung der Treiberstufe. Interessant ist der Wegfall jeglicher Kompensationsnetzwerke am Lautsprecherausgang.

Das Klirrvverhalten dieser Schaltung ist vom Absolutwert her gesehen nicht vorbildlich (bei Nennleistung ca. 1 %). Selbst das Oberwellenspektrum und die Intermodulationsverzerrungen sind atypisch für gut klingende Verstärker.

Bei kleinen Ausgangsleistungen zeigt sich die Schaltung als klirrfarm, was dieser Schaltung einen Röhrencharakter verleiht.

Die „Le Class A“ konnte sich damals klanglich zusammen mit geeigneten Lautsprechern (die mit 30 W Leistung auskommen) in die Referenzklasse einnisten und hat den Klangcharakter von sehr guten Triodenverstärkern. Eine sehr genaue Selektion der Transistoren ist bei sehr hoher Klangqualität absolut notwendig. Ebenso wie ein sehr aufwändiges Netzteil mit riesigen Sieb-Elkos. Die Ansteuerung einiger Transistoren erfolgt gegen die Betriebsspannungen und die Schaltung arbeitet im Class-A-Betrieb mit ca. 1 A Ruhestrom pro Kanal.

Weiterentwicklungen dieser Schaltung kommen heute in den Eingangsstufen von Marantz- und Accuphase-Endstufen zum Einsatz und sorgen dort für exzellenten Klang.

Hier sind nun schon die ersten Zeichen gesetzt worden, dass der Absolutwert des Klirrfaktors bei Nennleistung wohl kein Qualitätsmerkmal für guten Klang darstellt, wo wir doch Klirrfaktoren von 0,01 % bei hochwertigen Geräten gewöhnt sind. Selbst die gefürchteten Intermodulationsverzerrungen dieser Geräte sind relativ hoch.

Ist dies nur eine seltsame Ausnahme?

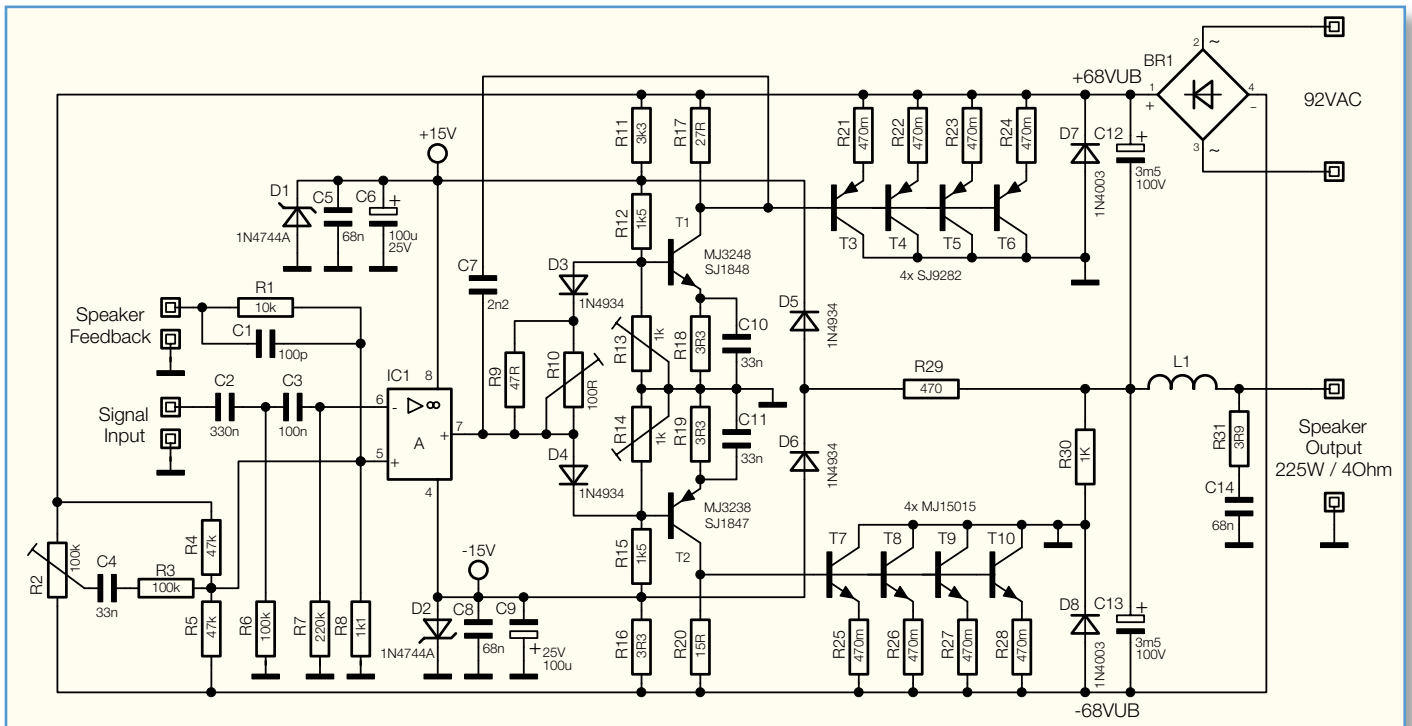


Bild 6: Das Leistungsteil der QSC A32 von 1980

## Ein Ausflug in die Beschallungstechnik

### Long live Rock 'n' Roll!

Diese Musik steht für lauten, druckvollen Sound, der nur mit großen Lautsprechern und viel Verstärkerleistung machbar ist. Eine der bekanntesten Firmen der Beschallungs-Verstärkertechnik ist u. a. die Firma QSC in Amerika. Diese Firma wendet für die Realisierung von Hochleistungsverstärkern die raffinierte „Grounded-Source-Technik“ an (Abbildung 6).

Bei analogen Endstufen ist die Verlustwärme im mittleren Teillastbereich schon sehr hoch, weil in diesem Betriebszustand die Leistungstransistoren noch nicht voll durchgesteuert sind und dennoch schon beachtliche Lautsprecherströme fließen. In den Leistungstransistoren entstehen so gewaltige Verlustleistungen in Form von Abwärme, die über große Kühlkörper und kräftige Lüfter aus den Transistoren und den Geräten abgeführt werden müssen. Je höher nun die Ausgangsleistungen werden, um so mehr Wärme entsteht in den Leistungstransistoren und um so schwieriger wird es, die Verlustwärme aus dem Chip der Leistungstransistoren abzuführen. Nun ist bei Leistungstransistoren das Substrat (Basismaterial) des Chips und somit auch die „Grundplatte“ bzw. das Gehäuse der Leistungstransistoren, auf dem der Chip montiert wird, im Allgemeinen mit dem Kollektor verbunden. Die optimale Kühlung der Leistungstransistoren erreicht man, wenn sie direkt, ohne Isolierscheibe, aber mit viel Wärmeleitpaste auf einen Kühl-

körper montiert sind. Wenn man diesen Kühlkörper dann auch noch preiswert ohne Isoliermaßnahmen mit dem Gehäuse verschrauben kann und man zur Ansteuerung nur eine sehr einfache Schaltung benötigt, hat man „gewonnen“. Aus diesen Anforderungen an eine Schaltung ergibt sich dann die „Grounded-Source-Technik“, wie sie im obigen Schaltbild in ihrer einfachsten Form zu sehen ist. „Grounded Source“ deswegen, weil die Versorgungsleitung der Transistoren (Source = Quelle), der Kollektor, auf Massepotential (Ground) liegt. Mit den Leistungstransistoren in Emitterschaltung wird die Betriebsspannung moduliert und über die Sieb-Koppel-Elkos auf den Lautsprechergekoppelt. Die Leistungstransistoren in Emitterschaltung lassen sich mit zwei Transistoren und einem OP sehr leicht gegen die Betriebsspannung ansteuern. Der OP braucht keine großen Signale zu liefern, da sämtliche Transistoren in Emitterschaltung arbeiten und spannungsverstärkend sind. Als Leistungstransistoren kommen heutzutage nur schnelle Audio-Transistoren zum Einsatz, und somit ist auch die Ausgangsstufe in „langsamer“ Emitterschaltung kein Problem für die Performance der Beschallungstechnik.

Erfreulich ist zudem noch, dass die Sieb-Koppel-Elkos zugleich noch eine Lautsprecherschutzschaltung gegen Gleichspannung bilden. Es liegt bei einem Defekt immer ein Elko in Serie zur Betriebsspannung. Besser und einfacher geht es eigentlich nicht. Sind die Sieb-Koppel-Elkos stromstarke, hochwertige Low-ESR-Typen, so steht auch der Audio-Performance nichts im Weg. Diese Variante ist heute

nicht mehr üblich. Aus Kostengründen (gute Elkos sind teuer) werden zum Lautsprecherschutz im Falle eines Verstärkerdefekts Thyristoren und Triacs eingesetzt, die im Fehlerfall den Lautsprecherausgang kurzschließen und damit die Schmelzsicherungen des Netzteils auslösen.

An diesen fünf Beispielen haben wir Ihnen die wesentlichen Grundschaltungen der Verstärkertechnik bis in den Anfang der 80er Jahre gezeigt.

Es gibt natürlich zig Varianten der Verstärker mit Differenzeingang, sei es mit mehreren Differenzstufen hintereinander oder mit den raffiniertesten Stromquellen und Kaskodenschaltungen.

Auch die raffinierte „Grounded-Source-Schaltung“ fand Gefallen bei vielen Herstellern und wurde immer weiterentwickelt. Die Firma Crown z. B. wendet sie in Brückenschaltung in ihren analogen Endstufen an.

Im nächsten Artikel möchten wir Ihnen unter anderem eine spezielle Variante der Differenzverstärkerschaltung, wie sie heute verwendet wird, zeigen, in der Kaskoden- und Stromlastungsschaltungen zum Einsatz kommen. **ELV**

### Quellen:

<http://www.Passlabs.com>  
<http://www.QSC.com>  
<http://www.Krellaudio.com>  
 John Linsley Hood Valve and Transistor Audio Amplifiers  
 L'Audiophile No. 10