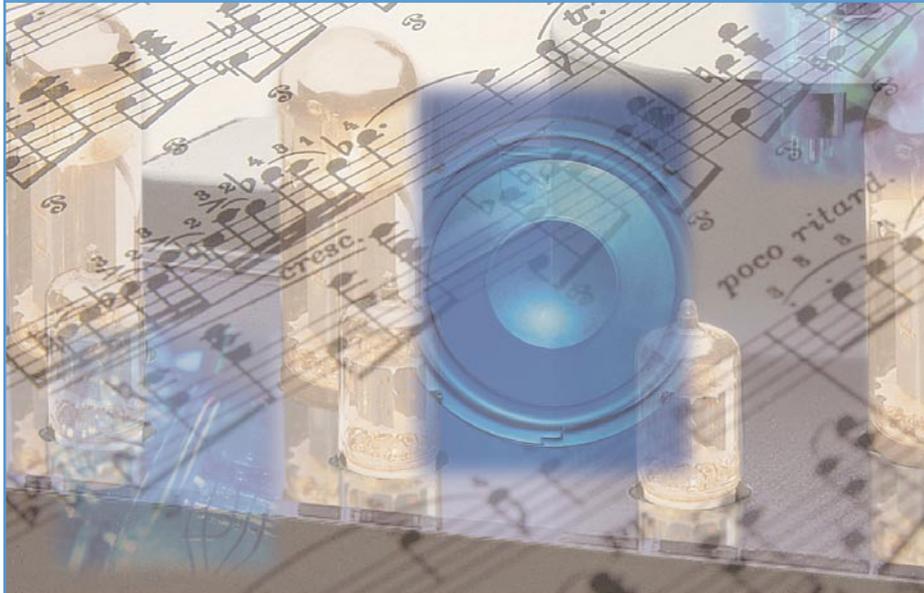


# Verstärkertechnik in der Audiowelt

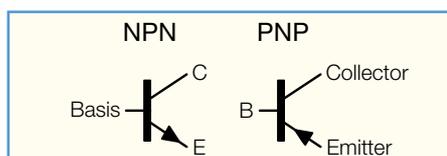


## Teil 4: Halbleiter in der Audio- verstärkertechnik

**Nachdem wir Ihnen einiges über die Historie und die Schaltungstechnik der Audio-Leistungsverstärker gezeigt haben, möchten wir nun einen Blick auf die aktiven Halbleiterbauelemente der Audioverstärkertechnik werfen. Auch hier hat sich seit der Entwicklung der Transistoren 1949 einiges getan.**

### Bipolare Transistoren

Dieses raffinierte Bauteil (Abbildung 1) revolutionierte in den 50er Jahren sämtliche Bereiche der Elektronik. Ein kleines Stück mehrfach dotiertes Germanium oder Silizium ersetzte damals die mechanisch hochkomplizierten und teuren Elektronenröhren. Gut – die Transistoren waren



**Bild 1: Schaltzeichen eines NPN- und eines PNP-Transistors mit Anschlussbezeichnungen**

damals auch nicht billig und die Qualität entsprach noch nicht der der Elektronenröhren, aber das sollte sich in den nachfolgenden Jahren noch ändern. Der große Vorteil der Transistoren war die Baugröße, der geringe Energieverbrauch und man konnte sie in 2 Polaritäten herstellen, also als PNP- und als NPN-Transistoren. Endlich konnte man tragbare Radios herstellen, die man mit preiswerten, handelsüblichen Batterien eine vernünftige Zeit betreiben konnte. Und, und, und.

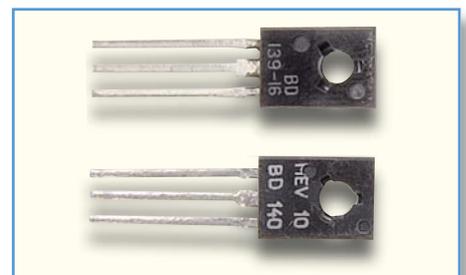
Was gab es jetzt für die Audioverstärker Neues? Nun, anfangs waren die Möglichkeiten gegenüber den Röhren stark eingeschränkt. Die Leistungstransistoren – anfangs waren es noch Germaniumtypen – waren nicht sehr spannungsfest und konnten keine hohen Ströme steuern. Man konnte mit ihnen keine Verstärker



**Bild 2: Transistor 2N3055**

höherer Leistung bauen. Erst Ende der 60er Jahre wurde der 2N3055 entwickelt, ein NPN-Leistungstransistor mit 60 V Sperrspannung, 15 A Spitzenstrom und 115 W maximal zulässiger Verlustleistung bei 25 °C (Abbildung 2). Mit diesem im Vergleich zu heute üblichen Audioleistungstransistoren (fT 30 MHz) extrem langsamen (fT 0,5 MHz) und in der Stromverstärkung nicht-linearen Transistor wurden in den 70er Jahren bereits erstaunlich gute Verstärker gebaut. Natürlich bei moderaten Ausgangsleistungen von 30...40 W. Hohe Ausgangsleistungen waren mit diesem Transistor aufgrund seiner geringen Uce von 60 V nur in Brückenschaltung machbar.

Die Stromverstärkung dieser alten 2N3055 war zum einen stark belastungsabhängig und zum zweiten im Strommaximum sehr gering (Abbildung 6). Je nach Schaltungsauslegung konnte man nur mit 15...30facher Verstärkung rechnen. Man brauchte also in jedem Fall einen guten Treiber. Hierfür haben sich bald die auch heute noch ge-



**Bild 3: Transistor BD139/BD140**

bräuchlichen – in Abbildung 3 dargestellten – „Plastiktransistoren“ BD139 (NPN) und BD140 (PNP) qualifiziert. Mit 80 V/2 A, 25 W (@25 °C) und, man beachte, einer Transitfrequenz von über 50 MHz schon beachtlich gute und schnelle Transistoren.

Die Stromverstärkung dieser Kleinleistungstransistoren war zwar noch nicht berühmt, man konnte aber schon mit 30...50facher Verstärkung rechnen, was zusammen mit den 15...30 des 2N3055 für eine quasikomplementäre Endstufe ausreichte. Die BD139/BD140 waren wegen ihrer hohen Transitfrequenz und ihrer bereits recht passablen Stromverstärkungslinearität auch

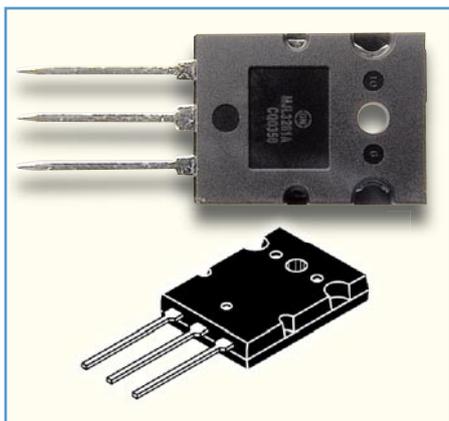
sehr gut für Spannungsverstärkerstufen geeignet. Mit einem ordentlichen Ruhestrom versehen, konnten diese Stufen mühelos die quasikomplementären Ausgangsstufen mit min. 450facher Stromverstärkung treiben.

Jetzt fehlt nur noch die Eingangsstufe. Hierfür benötigte man rauscharme und schnelle Kleinsignaltransistoren. Die Stromverstärkungslinierität ist hier nicht so wichtig, da die Stufen im Class-A-Betrieb laufen und die Signalhübe sehr gering sind. Kleinsignaltransistoren (Abbil-



**Bild 4: Typische Bauformen von Kleinsignaltransistoren**

dung 4) haben meist von Natur aus ein breites Band linearer Stromverstärkung. In den Anfängen der Siliziumtransistoren kamen hier z. B. BC109C zum Einsatz. Dies waren rauscharme Standardtransistoren, die mit den heute üblichen BC550C zu vergleichen sind.



**Bild 5: Typische Bauform kräftiger Leistungstransistoren**

Mitte der 70er Jahre kamen die japanischen Hi-Fi-Hersteller so richtig in Fahrt und mit ihnen kamen die in einem großen Strombereich linear verstärkenden und extrem schnellen Leistungstransistoren

Tabelle 1:	
Tip 3055 Nachfolger des legendären 2N3055	ON MJL 3281 das Optimum
VCE <sub>max</sub> 60 V	VCE <sub>max</sub> 200 V
IC <sub>max</sub> 15 A	IC <sub>Dauer</sub> 15 A IC <sub>Puls</sub> 30 A
fT 2,5 MHz, Original 2N3055 0,5 MHz	fT 30 MHz !!
β (@4A) 20...70	β (@1A) 35...160β (8A) 35...60!
Pc 115 W (@25 °C)	Pc 200 W (@25 °C)

mit Sperrspannungen bis 150 V auf. Mit diesen Transistoren war es relativ einfach möglich, Verstärker mit hohen Leistungen und sehr geringen Verzerrungen zu bauen, solange man die Transistoren im linearen Verstärkungsbereich eingesetzt hat. Dieser lineare Bereich reichte je nach Typ bis zu 5 A. Bei den neusten Typen von Motorola reicht er sogar bis 8 A (Abbildung 5).

Was zeichnet diese neue Transistorgeneration aus?

Sehen wir uns doch einfach mal einige der technischen Daten in Tabelle 1 an.

Was uns sofort ins Auge sticht, ist die hohe Sperrspannung des modernen Japantransistors. Gut – wir haben hier eine Variante mit sehr hoher Sperrspannung. Die modernen Audiotransistoren sind üblicherweise mit 150, 200, 230 und neuerdings auch mit ca. 350 V zu haben, wobei die Versionen mit sehr hoher Sperrspannung ab 230 V nicht immer die hohen Transitfrequenzen von über 20 MHz aufweisen.

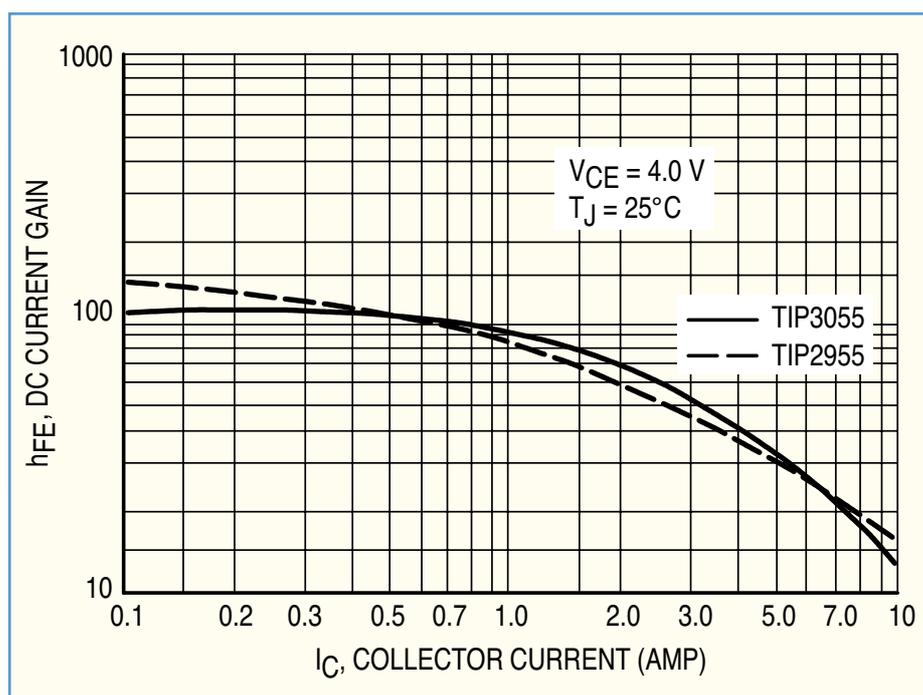
Weiterhin sind sie in der Lage, neben hohen Dauerströmen noch deutlich höhere Pulsströme zu verarbeiten, was uns bei Musiksignalen sehr entgegenkommt.

Und dann die hohe Transitfrequenz! Es wurden Leistungstransistoren in der Klasse 120 V/8 A bis 90 MHz hergestellt. Dies ermöglicht die Herstellung extrem breitbandiger Verstärker. Die australische Firma Metaxas drang mit ihren Verstärkern bis in den MHz-Bereich vor. Man könnte mit diesen Verstärkern einen kleinen Mittelwellensender betreiben! Klar, für einen Audioverstärker ist dies nun wirklich nicht notwendig, aber man zeigt ja gern, was man kann. Zum anderen gehörten die Metaxas-Verstärker in den 90ern zum Besten, was man damals kaufen konnte.

Was ist an den modernen Leistungstransistoren anders? Wenn wir uns das Verstärkungsverhalten eines modernen Audio-Leistungstransistors im Vergleich zu einem Kleinsignaltransistor moderner Bauart ansehen, so ist deren Verhalten identisch, wenn man über die Absolutwerte der Ströme hinwegsieht. Auch die Transitfrequenz ist vergleichbar.

Haben wir es mit einer Parallelschaltung von Kleinsignaltransistoren zu tun? Ja!

Die ersten so genannten Ringemitter-Leistungstransistoren für Audioanwen-



**Bild 6: Das Stromverstärkungsverhalten des 2N3055-Nachfolgers**

**Tabelle 2:  
Die gebräuchlichsten Audiotransistoren**

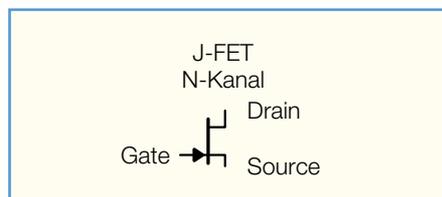
<b>Power</b> Toshiba Motorola Motorola Sanken  - Klassiker: Motorola	2SA1943/2SC5200 MJL 1302 A/MJL 3281A MJ 21193/MJL 21194 2SA1294/2SC 3263  2N 3055/2N 2955 BD 249C/BD 250C MJ 15003/MJ 15004	230 V/15 A/150 W/30 MHz 200 V/15 A/200 W/30 MHz 230 V/16 A/200 W/4 MHz 230 V/15 A/130 W/35 MHz  60 V/15 A/115 W/0,5 MHz (heute 3 MHz) 100 V/25 A/125 W/3 MHz heute TIP 35C/TIP 36C 140 V/20 A/250 W/4 MHz
<b>Treiber/Low Power</b> Toshiba  Motorola  - Klassiker: Philips	2SA 1930/2SC 5171 2SA 1360/2SC 3423 MJ 15032/MJ 15033 MJE 340/MJE 350  BD139/BD 140	180 V/2 A/20 W/200 MHz 150 V/50 mA/5 W/200 MHz 250 V/8 A/50 W/30 MHz 300 V/500 mA/20 W  80 V/2 A/25 W/>50 MHz
<b>Vorstufe</b> Toshiba  Hitachi Motorola  - Klassiker: Philips	2SA 1048/SC 2458 2SA 970 /SC 2240 2SB 647A/2SD 667A MPSA 92/MPSA 42  BC 550C/BC560C BC 639/BC 640	50 V/150 mA/200 mW/80 MHz 120 V/100 mA/300 mW/100 MHz 120 V/1 A/900 mW/140 MHz 300 V/500 mA/625 mW/50 MHz  45 V/100 mA/500 mW/100 MHz 80 V/1 A/830 mW/100 MHz

dungen bestanden tatsächlich aus vielen Kleinsignal- bzw. Kleinleistungstransistoren, die über eine Art Ringleitung parallel geschaltet wurden. Ein sehr aufwändiger Fertigungsprozess, der sich auch im Preis niederschlug. Heute werden diese Transistoren zum Teil auch mit einer perforierten Emitterschicht dotiert, was einen ähnlichen Effekt erzeugt.

Bei den Kleinleistungstransistoren für die Vorstufen hat sich eigentlich nicht viel verändert. Die anfänglich geringen Sperrspannungen von 20...30 V wurden je nach Anwendungsgebiet auf 50...300 V erweitert. Für besonders rauscharme Vorstufen, z. B. für Moving-Coil-Abtaster oder Bändchenmikrofone, gibt es Spezialtransistoren mit sehr niedrigen Basisbahnwiderständen. Es handelt sich meist um Parallelschaltungen aus bis zu 20 Transistoren auf einem Chip. Das ist aber nur für sehr niederimpedante Quellen wie z. B. dynamische Mikrofone oder Moving-Coil-Abtaster sinnvoll.

### JFET

Sperrschicht-Feldeffekttransistoren sind im Vergleich zu den bipolaren Transistoren ladungsgesteuert und selbstleitend. Während beim bipolaren Transistor ein Strom über Basis und Emitter fließen muss, um einen Strom vom Kollektor zum Emitter



**Bild 7: Schaltzeichen eines N-Kanal JFET**

auszulösen, fließt beim JFET (Junction-FET) sozusagen von Haus aus ein Strom von Drain nach Source, auch wenn das Gate kein Potential hat, also mit Source verbunden ist. Der Transistor verhält sich wie eine Stromquelle mit einem im Kristall eingepprägten Strom. JFETs haben eine Kennlinienschar ähnlich einer Triode und sind unter den Kleinsignaltransistoren für viele Audioanwendungen das Feinste vom Feinen. Leider sind die wirklich verstärkertauglichen Typen mit hoher Steilheit immer seltener zu bekommen. Toshiba ist der bekannteste Hersteller für steile JFETs. Die meisten Standardtypen lassen durch ihre geringe Steilheit keine hohen Spannungsverstärkungen zu. Ein weiterer Wermutstropfen sind die gegenüber den bipolaren Transistoren wesentlich höheren Fertigungstoleranzen. Beim Einsatz in Differenzverstärkern ist eine Selektion

unumgänglich. Selektierte Paare sind kaum noch zu bekommen und schon gar nicht mit hoher Steilheit. JFETs sind fast ausschließlich Kleinsignaltransistoren. Nach unseren Informationen gibt es nur die Firma Lovoltec, die auch JFET-Leistungstransistoren herstellt. Ob diese auch in Deutschland erhältlich sind, ist uns nicht bekannt. Die Audioszene um Nelson Pass in den USA beschäftigt sich schon eifrig mit diesen Transistoren und lobt sie in höchsten Tönen ([www.Passdiy.com](http://www.Passdiy.com)).

### MOSFET



**Bild 8: Schaltzeichen eines N-Kanal- und P-Kanal-MOSFET**

Der Leistungs-MOSFET hat einige Vorteile gegenüber dem bipolaren Leistungstransistor.

Er wird, wie der JFET, über eine Ladung gesteuert mit dem Unterschied, dass die gängigen Leistungs-MOSFETs selbstsper-

**Tabelle 3:  
Gängige MOSFET-Typen für den Audiobereich**

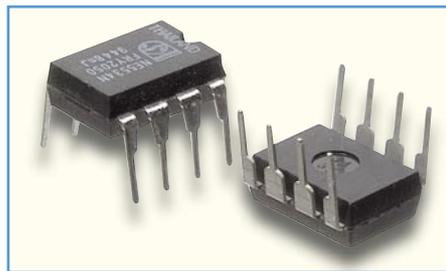
<b>Power</b> International Rectifier	IRF 610/IRF9610 IRF 540/IRF9540 IRF 640/IRF9640 IRFP240/IRFP9240	200 V/+3,3 A/-2,3 A/36 W 100 V/+28 A/-19 A/150 W 200 V/+18 A/-11 A/125 W 200 V/+20 A/-12 A/150 W
<b>Klassiker:</b> Hitachi	2SK135/2SJ50	140 V/7 A/100 W
<b>Kleinsignal</b> Zetex	ZVN 3310/ZVP 3310	100 V/140 mA/625 mW

rend sind, d. h. es muss eine Spannung, je nach Typ zwischen 0,5 und 4 V, zwischen Gate und Source angelegt werden, damit der MOSFET leitend wird. Es entsteht hier schnell der Eindruck, die MOSFETs könnten leistungslos angesteuert werden. Dem ist, besonders bei Leistungs-MOSFETs, nicht so, da diese Bauteile beachtliche Kapazitäten beinhalten, die besonders im Impulsbetrieb erhebliche Probleme bereiten. Starke Leistungs-MOSFETs müssen dynamisch oft mit Treiberströmen von mehreren Ampere angesteuert werden, damit sie das tun, was sie sollen. Im Audioverstärker ist dies nicht so dramatisch, da die Impulsflanken recht flach sind (Bandbreiten bis 100 kHz sind üblich). Doch bei Spannungsteilern und Eingangsstufen sollte man die Kapazitäten im Auge behalten, um den Frequenzgang nicht einzuschränken und die Quellen nicht unnötig zu belasten. Hat man diese Randbedingungen im Griff, dann zeigt sich der MOSFET als recht audiophil, ganz besonders in Leistungsendstufen. Kräftig durchgesteuert, in einen Class-A-Verstärker, hat er ein sehr lineares Übertragungsverhalten und bietet einen sehr luftigen feinen Klang. Im Class-AB-Betrieb sollte er eine etwas kräftigere Gegenkopplung oder eine Feed-Forward-Korrektur bekommen, damit er klirrarmer arbeitet. Unter Belastung zeigt er sich von seiner besten Seite. Mit sehr hohen Maximalströmen bei kleiner Bauform sind MOSFETs besonders für Stromentlastungsschaltungen geeignet. Die Firma EXPOSURE z. B. setzt MOSFETs zusammen mit schnellen Kleinleistungstransistoren in einer Stromentlastungsschaltung in der Ausgangsstufe ein und erreicht damit beachtliche Audioqualitäten mit geringem Aufwand.

Ein weiterer Vorteil der hohen Spitzenströme: Man kann bei Leistungs-MOSFETs durchaus auf eine elektronische Übersicherung verzichten und Schmelzsicherungen einsetzen. Elektronische Überstromsicherungen haben ja immer den Nachteil, dass sie unter Umständen zu früh ansprechen und das Musiksignal verzerren. Dieses Problem gibt es bei Schmelzsicherungen nicht.

MOSFETs sind im Audiobereich vorwiegend im Leistungsteil von Endstufen zu finden, da ihr Rauschniveau relativ hoch liegt. In Vorstufen, bei kleinen Pegeln werden fast ausschließlich bipolare Transistoren und JFETs eingesetzt. Bei hohen Pegeln stört das Rauschen der MOSFETs nicht.

### Integrierte Operationsverstärker



**Bild 9: Bild eines OPs mit 8 Pins**

Nicht alle Audioschaltungen sind diskret mit Transistoren aufgebaut. Man bedient sich schon lange der Operationsverstärker. Sind diese genauso gut wie ausgefuchste diskrete Konzepte? Nun – mittlerweile ja.

Die wirklich audiotauglichen OPs wie z. B. TL072 oder der heute noch aktuelle NE5534 sind schon in den 70ern entwickelt worden. Der NE5534, ursprünglich von Valvo entwickelt, zeichnet sich durch sehr geringen Klirrfaktor, niedriges Rauschen und hohe Geschwindigkeit aus. Klanglich gehört er eher zu den kühlen Analytikern.

Der TL072, ursprünglich von Texas Instruments entwickelt, ist mit einer JFET-Eingangsstufe ausgestattet und ist von den technischen Daten dem NE5534 weit unterlegen. Klanglich zeigt er sich aber eher von der musikalischen und wärmeren Seite. Er ist immer wieder in kleinen, feinen Hi-Fi-Vollverstärkern der 80er und 90er Jahre zu finden. Der NE5534 kam vorwiegend im professionellen Bereich und in Phono-Vorstufen zum Einsatz, wo er mit Rausch- und Klirrarmer glänzt.

Bis heute wurden die OPs im Audiobereich massiv weiterentwickelt. Rauschen und Klirren sowie höchste Geschwindig-

keiten sind kein Thema mehr. Auch klangliche Aspekte wie das Oberwellenspektrum im Klirrfaktor spielen eine große Rolle im Design moderner Audio-OPs.

Besonders hervorheben möchten wir den OPA604, ein JFET-OP mit hoher Betriebsspannung bis 2 x 25 V und zweistufigem Aufbau, sowie den extrem klirrarmer und im Vergleich zum OPA604 rauschärmeren OPA134, ebenfalls ein JFET-Typ. Beide sind, was das Preis-Leistungs-Verhältnis betrifft, momentan die obere Messlatte für gehobene Anwendungen und werden von Burr-Brown hergestellt. Der OPA604 eignet sich aufgrund der hohen möglichen Ausgangsspannungen zum Treiben kleiner bis mittelstarker Endstufen (besonders in Brückenschaltung). In audiophilen Kreisen werden gelegentlich OPA627 und OPA637 eingesetzt. Es handelt sich hier um audiophile Weiterentwicklungen der legendären OP27 und OP37. Diese sind aber extrem teuer und die Performance liegt nicht weit über dem der heute üblichen Standards.

In der professionellen Audiowelt wird sehr häufig der MC33078 von Motorola eingesetzt. Er ist extrem billig, schnell und sehr rausch- und klirrarmer. Über die Klangqualitäten im highfidelen Sinn kann man sich streiten oder auch nicht. Er ist aufgrund seiner Rauschmutter für Mikrofon-, Instrumenten- und Phonovorverstärker bestens geeignet. Sein Übersteuerungsverhalten ist allerdings mit Vorsicht zu genießen. Er begrenzt nicht wie herkömmliche OPs, sondern geht bei Übersteuerung in einen taktenden Zustand über, der ziemlich hässlich klingende Oberwellen erzeugt.

Das Aufzählen weiterer Audio-OPs möchten wir uns hier sparen, da die Liste beinahe unendlich lang wäre. Jeder Hersteller bringt laufend neue Modelle mit immer besseren Daten auf den Markt. Der neuste Technologietrend liegt bei immer geringeren Betriebsspannungen und Betriebsströmen für batteriebetriebene Geräte. Die Klirrfaktoren liegen weit unter den Hörgrenzen, die Geschwindigkeiten werden immer größer.

So, das soll eine grobe, aber für den Anwender völlig ausreichende Übersicht über die speziellen Halbleiter der Audioverstärker sein. Die Datenblätter und selbstverständlich auch die Bauteile sind, sofern nicht in unserem Sortiment, im Internet erhältlich. Bei den Bauteilbezeichnungen ist allerdings Vorsicht geboten. Besonders bei den bipolaren Leistungstransistoren verbergen sich gelegentlich bei unterschiedlichen Herstellern unter derselben Bezeichnung unterschiedliche Typen.

Im nächsten Beitrag sehen wir uns die technischen Daten eines Audioverstärkers etwas genauer an und analysieren Sinn und Unsinn mancher Angaben.

Also, bis dann ...

ELV