

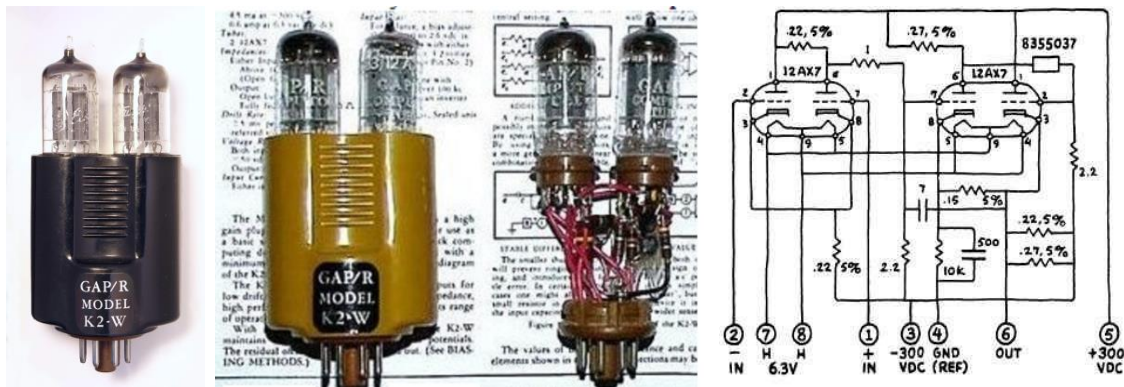
# Bernd Meisers Chipology

## Herz und Hirn

Von Bernd C. Meiser

Seit vielen Jahrzehnten sind Operationsverstärker, kurz OP-Amp oder auch nur OP genannt, aus der Schaltungstechnik nicht wegzudenken. Grund genug, um sich diese kleinen Tausendsassas einmal näher anzuschauen.

In den 1930er Jahren begann man, die ersten Röhren-Differenz-Verstärker zu entwerfen. Zusammen mit der Rückkopplungstheorie von Harold Black und den Arbeiten von Harry Nyquist und Hendrik Bode waren damit zu Beginn der 1940er Jahre die wesentlichen Grundlagen für Operationsverstärker geschaffen. Zunächst noch in das eigentliche Rechen-Board integriert, erkannte man alsbald den Vorteil modularer Systeme - der erste Stand-alone-Operationsverstärker war geboren. Diese Realisation im Röhrenzeitalter erfolgte später mittels zwei Verbund-Röhren des Hi-gain Typs 12AX7 – siehe **Bild 1, Bild 1a und 1b**, welche den ersten kommerziell angebotenen Röhren-OP im Jahre 1952 zeigen. Es war ein richtig „heißer“ OP mit +/- 300 Volt Betriebsspannung, und das alles zu einem Preis von \$ 20.



**Bild 1, 1a, 1b**

Das System „OP“ muss jetzt - schnell gesprochen - folgende Eigenschaften besitzen: Hochohmige Eingänge, sehr hoher Verstärkungsfaktor, geringer Ausgangswiderstand, hohe Gleichtakt-Unterdrückung und einige Phasenbedingungen. Diese Eigenschaften ermöglichen, mathematische Operationen wie Invertieren, Addieren/Subtrahieren, Integrieren/Differenzieren in hoher Präzision durchzuführen. Daher rührt auch der Name: Operations-Verstärker. Der Analog-Rechner war geboren, was insbesondere für die Prozess-Regelungstechnik ein wahrer Segen war – aber auch für das Militär. Weiterhin ermöglichen die OPs, sich nur um die Schaltungsperipherie kümmern zu müssen bzw. die Eigenschaften der Schaltung werden nur noch von der äußeren Beschaltung der OPs dominiert. Der OP wird quasi als „Black Box“ behandelt, dessen Innenleben den Anwender nicht weiter interessiert.

In den 1950er und 1960er Jahren entwickelte sich die Halbleiter-Entwurfstechnik sehr schnell, war doch diese neue Technologie, was Betriebsspannung und Volumenbedarf anbelangt, den Röhrenschaltungen weit überlegen. Bis etwa Mitte 1960er Jahre waren die Transistor-„OPs“ noch diskret und mit möglichst hoher Miniaturisierung ausgeführt. **Bild 2** zeigt einen solchen diskreten OP (GAP/R, Model P45) als Modul von 1966 bei einem Preis von \$120 pro Stück. Durch die konsequente Verwendung der komplementären PNP- und NPN-Transistor-Technologie ließen sich direkt gekoppelte Stufen realisieren, so dass diese OPs als gleichspannungsgekoppelte Systeme keine Koppel-Elkos benötigen, was zu ihrer weiteren Miniaturisierung beitrug. Die Transistorfertigung war eine Sache, die OP-Fertigung eine andere.

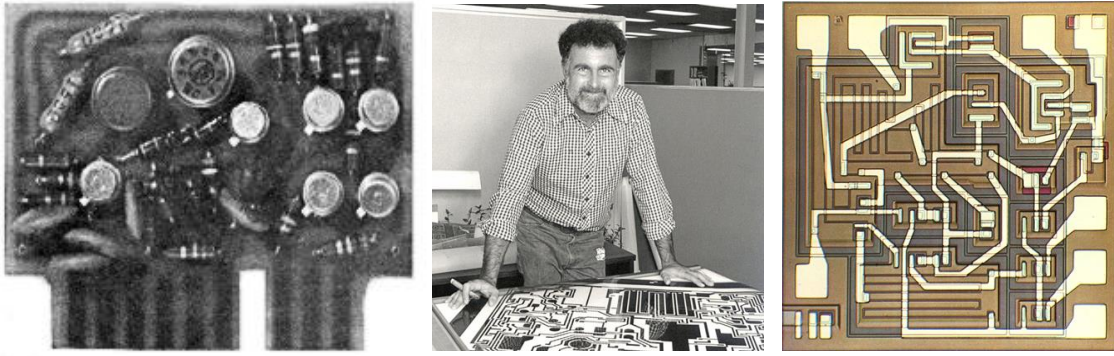


Bild 2, 2a, 2b

## Startschuss

Alles begann in der in San José/Kalifornien (aka „Silicon Valley“) liegenden, 1957 gegründeten Firma Fairchild Semiconductor. Der 26-jährige Robert Widlar, **Bild 2a**, entwarf 1963 dort den ersten Monolithic-OP-Amp in Fairchilds patentierter Planar\*-Epitaxial Technologie, den  $\mu\text{A702}$ , der damals für \$ 300 über die Ladentheke ging. Allerdings nicht für den normalen Endverbraucher, sondern nur für Militär und Raumfahrt. Die leistungsfähige 1965er Neukonstruktion Widlars, der  $\mu\text{A709}$  (**Bild 2b**), kostete bereits nur noch \$ 70 – war diesmal aber für jedermann erhältlich. 1969 war er sogar für \$ 2 zu bekommen. Widlar entwickelte viele Dutzende neuer OPs bei Fairchild, später bei National Semiconductor, danach für Linear Technology.

\*Anmerkung: Das Wesentliche des Planarprozesses besteht darin, dass die Oberfläche des Halbleiters durch Siliziumoxid maskiert und damit das Einbringen von p- und n-Gebieten in das Substrat möglich ist. [Dorendorf: Festkörper-Schaltkreise aus Silizium]

## Volltreffer

Ein großer Wurf gelang 1968 Dave Fullagar, Widlars Nachfolger bei Fairchild, mit dem  $\mu\text{A741}$ , (**Bild 3**), ein mehr als gelungenes Upgrade des 709. Es wurde ein wenige pF kleiner Kondensator zur Schwingneigungs-Kompensation integriert sowie eine Endstufen-Kurzschluss-Schutzschaltung. Damit war der  $\mu\text{A741}$ -Chip bestens ausgestattet, um seinen Siegeszug rund um den Erdball anzutreten!

Gesamtschaltbild des Universal-Operationsverstärkers 741

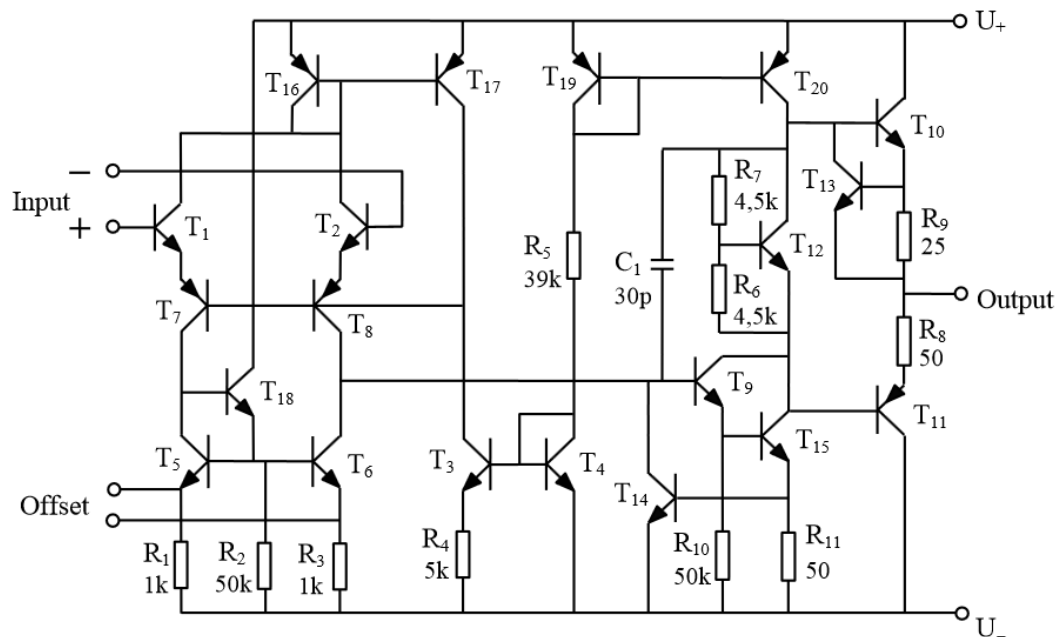
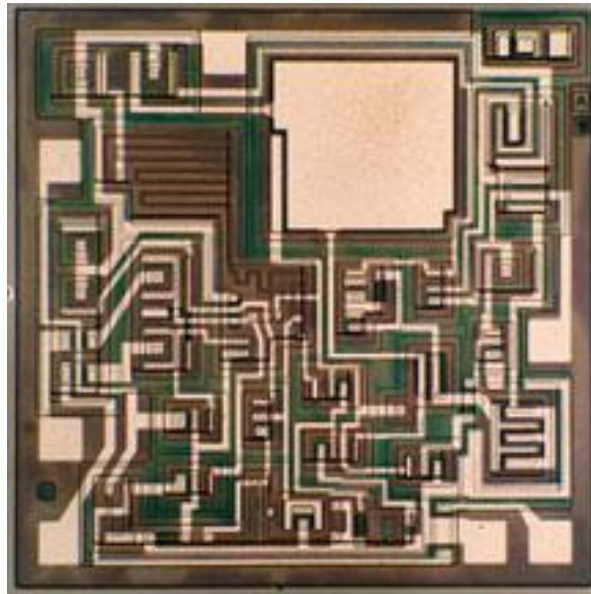


Bild 3 Schaltbild  $\mu\text{A741}$

So ein OP-Chip ist mit einer Vielzahl von Transistoren auf einem einzelnen Substrat/wafer bestückt. Ohne jetzt auf die „Innereien“ näher eingehen zu wollen, zeigt das **Bild 3** den Systemaufbau und Topologie dieses 741 und was alles dazu benötigt wird, um die Spezifikationen, die der OP zu leisten hat, zu realisieren. Fast die Hälfte der Transistoren erfüllen Systemarbeiten wie Konstantstromquellen, Stromspiegel verschiedenster Art, sowie  $U_{be}$ -Multipliiert. Besagte Systemtransistoren ersetzen in vielen Fällen den gemeinen Widerstand oder eine Diode, und liefern stattdessen an dieser Stelle ein dem Gesamtsystem dienendes besseres Arrangement. **Bild 5** zeigt den realen Chip 741 mit seiner kompletten Topologie, befreit von Anschluss-Beinchen und Gehäuse.

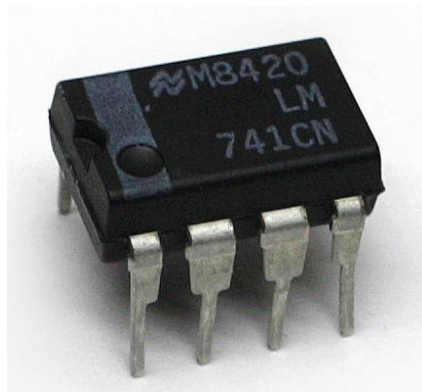


**Bild 5** Chipfoto  $\mu A$  741

---

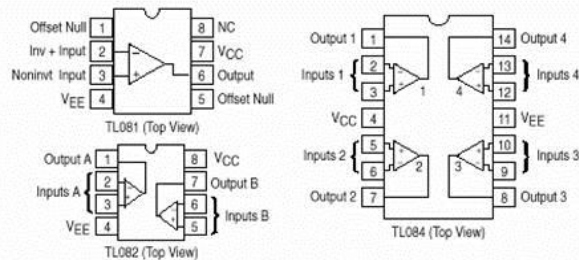
## ***Anfänge in der Musikelektronik***

Der damalige absolute Überflieger erschien 1970 mit dem  $\mu A1458$ , ebenfalls von Fairchild. Es ist ein Dual OP mit 2 OPs des Typs  $\mu A741$  in einem Gehäuse. Bewährt hat sich hier ein DIP8 Gehäuse (Dual-Inline-Package) **Bild 4**.



**Bild 4**  $\mu A$  741 im DIL- (Dual-In-Line) Gehäuse

**Bild 7** zeigt die Pinbelegung. Die beiden Chips,  $\mu$ A741 und  $\mu$ A1458 sind auch die ersten, die bei Effektgeräten eine größere Rolle spielten. Der Urahn  $\mu$ A709 spielte eine vergleichsweise geringe Rolle, war seine Ausgangsstufe nicht kurzschlussfest und seine Eingangs Impedanz mittelohmig. Da hatte der 741 dann doch mit 2MegOhm deutlich die Nase vorn gegenüber den 150kOhm des 709. Die ersten Phaser (Schulte Compact Phasing A, MXR Phase 90) waren mit diesen 741, oder dem 1458 (Ibanez PT 900, Oberheim PS-1) ausgerüstet. Die verwendeten OPs arbeiteten die Funktion als Allpass der Phaser völlig zufriedenstellend ab. Es rauschte zwar etwas, da die damalige Technologie noch keine Low-noise-Designs zuließ, aber das nahm man gerne in Kauf für diesen neuen, spacigen Effekt. Auch die ersten Distortion-Modelle waren mit dem 741 bestückt (MXR Dist +).



**Bild 7** Pinbelegungen von Single- und Mehrfach-OpAmps am Beispiel des TL081-TL084 im DIL-Gehäuse

## Dual OPs

Jetzt war der  $\mu$ A1458 (nominaler Strombedarf von 2,3mA) Anfang der 1970er Jahre zwar das Arbeitspferd der Elektronik, aber kein sonderlich heißblütiges. Die Chip Entwicklung ruhte sich natürlich nicht aus, sondern stieß unentwegt neue OPs aus, Upgrades oder völlig Neues. Durchsetzen werden sich, neben der üblichen Bipolar Technologie, nicht nur die bipolaren Eingangsstufen, auch werden vermehrt JFET Eingangsstufen benutzt, um extrem hochohmige Eingänge zu kreieren.

Die erste Neuerung, die in die Musik-Electronik Einzug hielt, war der 1974 erschienene  $\mu$ A4558, gefertigt von verschiedenen Herstellern. Wie bei allen OPs, variiert der pre-suffix zB  $\mu$ A4558, NJM4558, LM4558, RC4558 etc. von Hersteller zu Hersteller, der Post-Suffix gibt speziellere Selektionen und/oder Gehäuseformen an. Die Zeit des 1458 war abgelaufen, der 4558 mit seinen 3,5mA Strombedarf beherrschte den Markt.

Der 4558 war immer noch nichts Besonderes, betrachtet aus dem heutigen Blickwinkel, wäre da nicht der erfolgreiche 1982er Ibanez TS9, der fast unverändert bis in die heutige Zeit gebaut wird – ein Ende ist nicht abzusehen. Dieses Gerät ist ein Overdrive-Pedal - ein Distortion-Effekt mit hinzu gemischten Original-Anteil des Gitarrensings, das Ganze noch mit Treble-Booster Frequenzgang-Verhalten. All diese Funktionen musste ein OP bewerkstelligen, der verbleibende OP des 4558 Chips bearbeitete den Ton.

Hier war man sich schnell an vielen Orten einig, insbesondere aber bei den Pedal-Freaks und Sammlern, dass der damalige Chip des Herstellers Japan Radio Company JRC4558D der vermeintlich bestklingende in dem TS9 Design war. Wissenschaftlich hingegen auf der Basis der Werksapplikationen lässt sich diese vermeintliche Dominanz nicht recht bestätigen. Betrachtet man sich die komplette Aufgabenliste, die der 4558 im Overdrive-Circuit abuarbeiten hatte, wird erkennbar, dass es offensichtlich die kleinen Fehler zu sein scheinen, die dieser OP beim Abarbeiten womöglich generiert, denn von den Datenblättern her lässt sich diese vermeintliche Sound-Dominanz nicht herleiten. Ein offensichtlicher konstruktiver Schwachpunkt im TS Schaltkreis wäre, dass die nominal garantierten Daten des 4558 erst ab einer Last von größer 2kOhm gelten - leider wird aber dieser Wert hier im TS teilweise unterschritten - mit schwer einzuschätzenden akustischen Folgen.

Es sei auch angemerkt, dass ein jeder Chip-Hersteller über variierende Produktionsverfahren sowie über eigenes Knowhow verfügt, so dass geringfügige Abweichungen der Dotierungs-Topologien und vieles andere existieren und so in Grenzbereichen gewisse „Variationen“ von Chip-

Hersteller zu Chip-Hersteller herrschen. Jedenfalls waren all diese 4558 OPs sehr preiswert und fanden so den Einzug in die Stompboxes. Hochpreisige OPs wurden aller Orten vermieden.

Als der gelungene Nachfolger des recht langsamen 4558 (Slewrate=  $0,5\text{V}/\mu\text{s}$ ) ist der mittelschnelle **NJM4580D** (Slewrate=  $5\text{V}/\mu\text{s}$ ) anzusehen. Mit 6mA Strombedarf doppelt so viel wie sein Vorgänger, nicht gerade wenig für ein Batterie-betriebenes Pedal.

Als ein modernes Arbeitspferd entwickelte sich das 1973er Texas Instruments-Design mit JFET Arrangement am Eingang, so dass dieser extrem hochohmig ist. Der **TL072** (der **TL062** ist die low-power Version mit 0,4mA) ist ein äußerst preiswerter und schneller ( $16\text{V}/\mu\text{s}$ ) Allrounder mit 2,4 mA Strombedarf, aber nicht so verzerrungsarm wie der noch zu nennende 5532 oder 833. Wo das Anwendungsdesign jedoch einen „idealen“ OP Eingang mit Hochohmigkeit erwartet, ist der JFET Eingang des 072 dem klassischen BJT Eingang des 5532 überlegen. Steht eine geringe Stromaufnahme zur Diskussion, ist der TL062 erste Wahl. Der Chip ist etwas weniger gut geeignet für niederohmige Last, denn seine Endstufe kann nicht sonderlich viel Strom zur Verfügung stellen. Hauptanliegen war bei seinem Design, Chips mit höherem Stromverbrauch zu ersetzen, ohne jedoch die System Performance nachteilig zu beeinträchtigen. Dieser 072-Chip ist wirklich ein guter Allrounder.

Dann kam 1979 der mittelschnelle ( $9\text{V}/\mu\text{s}$ ) rauscharme **NE5532**, ein wirklich feiner Doppel OP speziell für Filter- und Audio-Anwendung auf den Markt. Er liefert in seinen Design-Anwendungen stets einen tadellosen Klang. Er kam damals wegen seines Preises nicht serienmäßig in Stompboxes zur Anwendung, ist aber -wie alle hier vorgestellten Doppel-OPs- pinkompatibel zu dem 4558. Er ist eine gute Wahl bei Chorus- & Delay-Pedalen in deren Filter-Position und auch bei HiFi hat sich dieser Chip bestens bewährt. Er kann wegen seiner leistungsstarken Ausgangsstufe niederohmige Lasten problemlos bewältigen, benötigt aber 8mA Strom. Da wählen viele für Batteriebetrieb den 833 als Alternative.

Auch ein gelungenes upgrade mit einigen neuen Details ist der mittelschnelle ( $7\text{V}/\mu\text{s}$ ) **LM833N** von Texas Instruments. Das ist ein feiner, rauscharmer Audio OP, der 5mA Strom benötigt. Er ist dank seinen hochohmigeren Eingängen dem 5532 bei entsprechenden Anwendungen überlegen.

Und hier jetzt noch ein mittelschneller ( $12\text{V}/\mu\text{s}$ ) Präzisions-Dual Op Amp, der auch im Tube Screamer TS9 einen feinen Sound abgibt, der **LT1213** von Linear Technology. Mit 6mA Strombedarf ist er aber bei Batterie-Betrieb nicht sonderlich empfehlenswert. Sein Output kann aber wie der 5532 niederohmige Lasten treiben.

Der **OP275** von Analog Device ist einer der ersten „Superchips“ – schnell ( $22\text{V}/\mu\text{s}$ ), extrem klirr- & rauscharm und mit neuartigem „Butler“ Front-End-Amplifier (eine sinnvolle Mischung aus BJT- und JFET-Technologien). Kommt als hoch-dekorierter Chip aus dem Hi-End Lager hier in die Stompbox-Liga rüber geschwappt. Analytischer, aber doch „musikalisch angenehmer“ Sound so ein Terminus aus der Hi-End Ecke, für Modulationspedale wirklich gut geeignet.

Auch der neue **OPA2134PA** (Burr Brown,  $20\text{V}/\mu\text{s}$ ) hat eine überragende Performance und wurde speziell für Audio Anwendungen höchster Ansprüche designt. Man streitet da im Hi-End Lager, ob dieser oder der 275 die Nase vorne hat. Viele bescheinigen dem OP275, der musikalischer klingendere zu sein ...

Wer einmal eine Neukonstruktion, ein sog Bi-Fet Design probieren will, wird von dem schnellen  $16\text{V}/\mu\text{s}$  Low-Noise Präzisions-Dual OP **AD712JN** von Analog Device nicht enttäuscht. Ein wirklich sehr guter und auch preiswerter OP. In der gleichen Liga spielt der noch schnellere  $25\text{V}/\mu\text{s}$  Audio Chip **OPA2604** von Burr Brown. In der Szene liegen sie Kopf an Kopf für Custom-Shop Overdrive-Pedale. Beide OPs klingen frischer als der 5532.

Die modernen sog. rail-to-rail Op-Amps zeichnen sich durch eine Aussteuerbarkeit aus, die bis knapp an die Betriebsspannungsgrenzen reicht und liegen daher schon merklich über dem Output der üblichen OPs. Gerade bei 9Volt Betriebsspannung ist das mitunter ein entscheidender Vorteil. In einigen Schaltungen klingen diese daher einen Deut lauter und dort auch gut definiert. Der **TLC2272** von Texas Instruments sei hier stellvertretend für diese Klasse von Op-Amps genannt, zumal der TLC2272 wie auch der Stromsparer TLC2262 in Overdrive-Schaltungen einen sehr guten Klang generiert.



## Single OPs

Nicht immer wählt der Designer einen Platz-sparenden Doppel-OP aus, sondern zieht aus verschiedenen Gründen einen Single-OP vor. Ein Grund ist der entstandene Sound bei den Prototypen. Wenn der Entwickler „seinen“ OP gefunden hat, schaut er sicherlich nach, ob dieser auch als Dual-OP in einem Chip zu haben ist – wenn nicht, benutzt der eben zwei Einzelchips. Im Hi-End-Lager wird häufig auf Single-OPs zurückgegriffen, um interne Verkopplungen innerhalb eines Dual-OP zu umgehen. Oder aber die Schaltung ist recht einfach aufgebaut, wie zB. die frühen Distortion Pedale (MXR Distortion+ mit einem  $\mu$ A741) und braucht nur einen Single-OP.

Der  $\mu$ A741 ist hier der geschätzte Urahn. Der wurde natürlich alsbald durch leistungsfähigere OPs ersetzt, wobei man dem 741 in einigen Pedalen eine feine Performance nachsagt. Schon bald wurde der altgediente Recke durch zB. den **LM308** ersetzt. Auch er überzeugte den Gitarristen mehr durch seinen Klang (Stichwort: recht geringes Gain-Bandwidth-Produkt) zB. in Proco's „The Rat“, als durch seine nominale Performance – war halt immer noch ein Chip alter Schule. Genauso wie der **LM307**, ein Standard Chip, der seine Aufgabe als Input-Amp in den frühen Preamps der Music Man-Verstärker recht ordentlich erledigte.

Einen richtigen Schub nach vorne bot der **LM356** mit seiner JFET Eingangs Stufe, denn er war schnell, rausch- und recht verzerrungsarm. Die Single OP Version des 072 wäre der **TL071**.

Ein Einzel-OP war dann auch der **NE5534**, es gilt hier das Gesagte über den 5532. Wenn es auf den Stromverbrauch und eine hochohmige Eingangsimpedanz nicht ankommt, ist das ein empfehlenswerter OP.

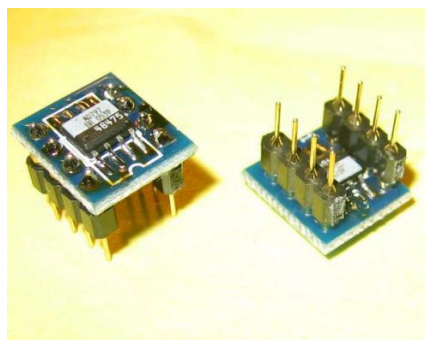
Auch der feine OP275 hat eine kleinere Single Chip Version am Start, den **OP27**. Wie sein großer Bruder einer der besten Chips.

Der **OPA134PA** ist die Single Chip Version des OPA2134PA.

Ein lohnenswerter Kandidat zB als Ersatz für dem LM308 (im Pedal: The Rat) ist der langsame (0,3V/us) OP07, ein Präzisions-OP. Er zeichnet sich vor allem durch eine extrem kleine Offset-Spannung und geringe Drift aus, ist also formal erste Wahl bei sog. Instrumenten- und Mess-Verstärkern mit seinen guten Kenndaten. Er wird hier erwähnt, um eine hochwertige langsame Alternative zu den schnelleren Chips zu nennen.

## Single Hi-End-OPs

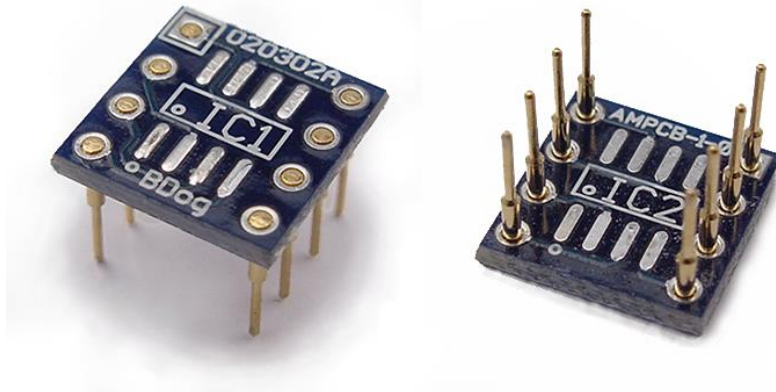
Der Single-OP **AD797** von Analog Device gilt in der Hi-End Szene womöglich als der beste Audio-Chip; ein schneller (20V/ $\mu$ s), ultra Low-Noise-, ultra Low-Distortion-OP. Er ist, laut Datenblatt, sicherlich das Beste, was man kaufen kann. Da aber in anderen Anwendungen häufig Doppel-OPs benötigt werden, existiert ein Adapter siehe **Bild 6**, bei dem zwei Stück AD797 in Small-Outline Gehäuse in einen DIL8 Sockel eingelötet und so verschaltet sind, als wäre das Gebilde jetzt ein Doppel OP (googeln mit „ad797 adapter“). Ob dieser Überflieger in aktiv Klang-erzeugenden FX-Units wie Distortion, Overdrive, etc sich auch allerfeinst verhält, ist nicht hinreichend verifiziert – aber höchst wahrscheinlich. Für Modulations-Pedale hingegen wäre er das finale Upgrade.



**Bild 6** Adapter für Single-OPs

Wer einen extrafeinen, ultra-schnellen  $55\text{V}/\mu\text{s}$  Single-Chip testen will, dem sei der **OPA627** von Burr Brown sehr zu empfehlen. Es ist ein Präzisions-High-Speed Design, ein sog. Laser-trimmed DiFet Operational Amplifier. Er spielt in etwa in der gleichen Liga wie der 797. Ihn gibt es auch als „Dual-OP“ in Bauform eines vorbestückten Adapters – siehe 797.

Übrigens, wer sich seinen Adapter selbst bestücken will, für den gibt's natürlich Vorgefertigtes als „Browndog“ Adapter, siehe **Bild 8**. Ein Nachteil sei bei diesen „gestackten“ Chips nicht unerwähnt: In einigen wenigen engen Pedalgehäusen könnte es bei ihrem Einsatz ihrer Höhe wegen etwas kritisch werden.



**Bild 8** „Browndog“-Adapter zum Selberbestücken von 2 Single-OPs

Lassen wir es hiermit genug sein, es gibt noch eine Unzahl von weiteren feinen Chips, die aber hier nicht alle aufgezählt werden können.

## ***Schlusswort***

Man kann es drehen und wenden, wie man will. Betrachtet man sich das ganze Spektrum der FX-Pedale und die verschiedenen Anforderungen, die ein jeder Pedal-Typ an den OP stellt, dann kann man gemäß Datenlage sicherlich einen passenden Chip finden. Aber wie wir von einigen Pedalen wissen, klingen gerade die alten, billigen Chips beim Produzieren ihrer kleinen Fehler sehr reizvoll.

Es wird sich in naher Zukunft auch nicht ändern, einen vermeintlich gut klingenden Chip laut Datenblatt einfach so zu greifen, genügt nicht. Immer noch muss man hier mit Erfahrung an die Sache rangehen und – das ist der Kernpunkt, seinem Gehör vertrauen. Noch gibt es kein Datenblatt, das einen guten Sound verspricht, wohl aber eine möglichst neutrale Signal-Bearbeitung garantiert. Und da wiederum gibt es viele Pedaltypen, die hiervon profitieren, aber eben nicht alle. Deshalb hat der alte JRC4558D auch heute noch die gleiche Daseinsberechtigung wie der feine OPA2134PA.

Dieser Beitrag ist schon in gekürzter Form in der Zeitschrift Gitarre & Bass erschienen und wird mit deren freundlicher Genehmigung von GITEC veröffentlicht.