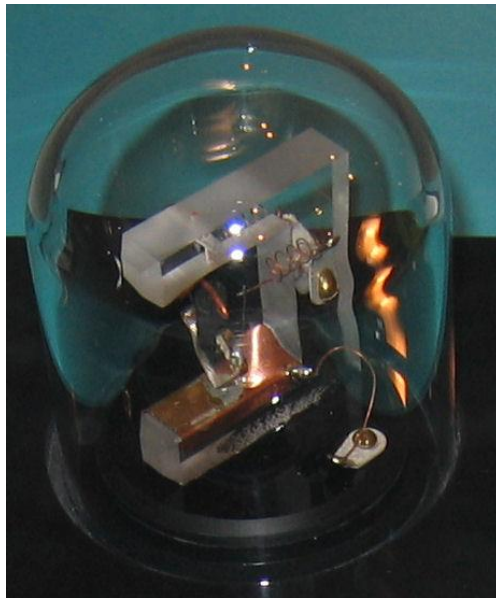


NF-Verstärker

Alfons Reichert



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1. Einleitung	3
2. Einfache Endstufe	4
2.1 Aufbau	4
2.2 Versuche	5
3. Gegentaktendstufe	10
3.1 Aufbau	10
3.2 Versuche	11
4. Operationsverstärker	16
4.1 Aufbau	16
4.2 Versuche	16
5. Integrierte Schaltung	21
5.1 Aufbau	21
5.2 Versuche	22

1. Einleitung

Elektronische Geräte auf Transistorbasis haben innerhalb weniger Jahrzehnte die Medienwelt revolutioniert. Und alles hat mit einem aus heutiger Sicht monströsen Urtransistor begonnen (s. Titelbild). Er bestand aus zwei dicht benachbarten Kontakten, die als Emitter und Kollektor mit einer Büroklammer auf einen Germaniumkristall gepresst wurden, der als Basis diente. Die Miniaturisierung schritt rasch voran, die Bauteile wurden immer kleiner und leistungsfähiger. Aus im Vergleich zu heute nahezu riesigen Röhrenradios in den dreißiger Jahren des vorigen Jahrhunderts sind Miniradios geworden, die in jedes Handy als Zusatzmodul passen. Die Fernsehbildschirme werden immer flacher, die Fotokameras immer kompakter. Die Liste ließe sich fast beliebig fortführen. Und die Mikrotechnologie mit Bauteilen im Mikrometerbereich ist keineswegs der Endpunkt der Entwicklung. Neuere Anwendungen stoßen in Größenordnungen im Nanometerbereich vor. Das Zauberwort heißt Nanotechnologie. Die moderne Computertechnik wäre ohne Transistoren undenkbar sowohl im Bereich der Speichermedien als auch bei den Mikroprozessoren. Die Packungsdichte der Transistoren hat sich in den letzten Jahrzehnten alle paar Jahre verdoppelt, die Speicherchips und die Mikrochips werden immer kleiner. Der berühmte Physiker und Nobelpreisträger Richard Feynman hat berechnet, dass man in einem Würfel mit der Kantenlänge $a = 1 \text{ cm}$ die Informationen sämtlicher Bibliotheken der Welt speichern könnte, wenn es gelänge, 1 Atom als 1 bit zu nutzen. Die Natur macht es uns vor. Sie speichert eine Unmenge an Erbinformationen auf kleinstem Raum.

Die Entwicklung von einer einfachen Transistorschaltung zur integrierten Schaltung soll am Beispiel der Verstärkertechnik für Audiogeräte aufgezeigt werden. Die vorgestellten Schaltungen lassen sich mit etwas Löt- und Bastelerfahrung problemlos nachbauen und mit schulüblichen Geräten testen.

Stolberg, im November 2010 und im Februar 2021

2.Einfache Endstufe

2.1 Aufbau

Abb. 1 zeigt den Schaltplan eines Verstärkers, wie er in ähnlicher Form in den ersten Transistorradios eingesetzt wurde.

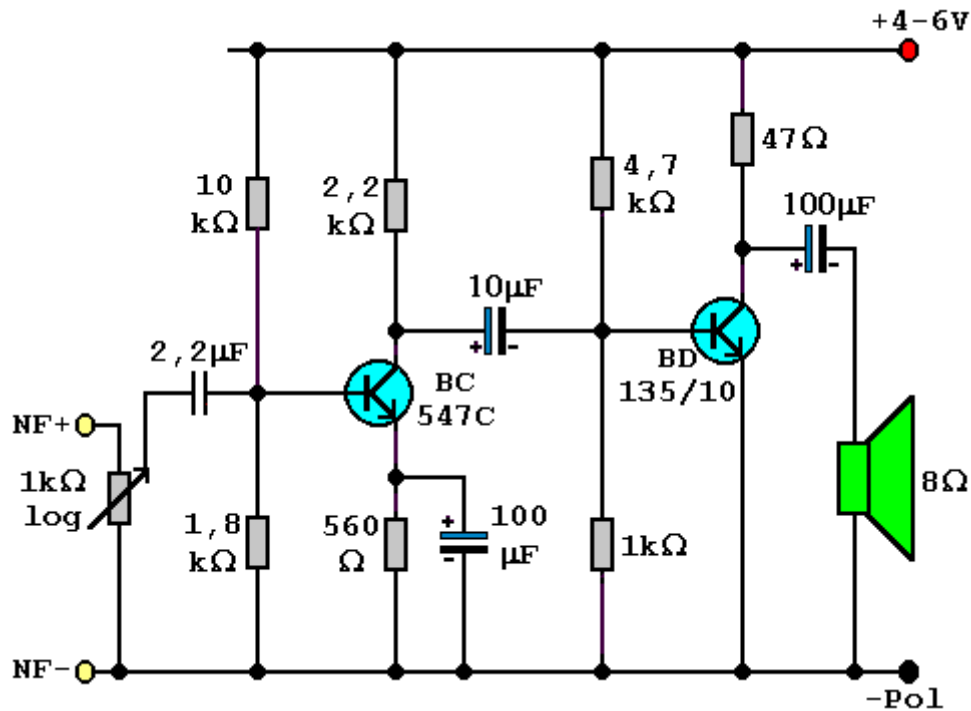


Abb.1: Schaltplan: zweistufiger Transistorverstärker

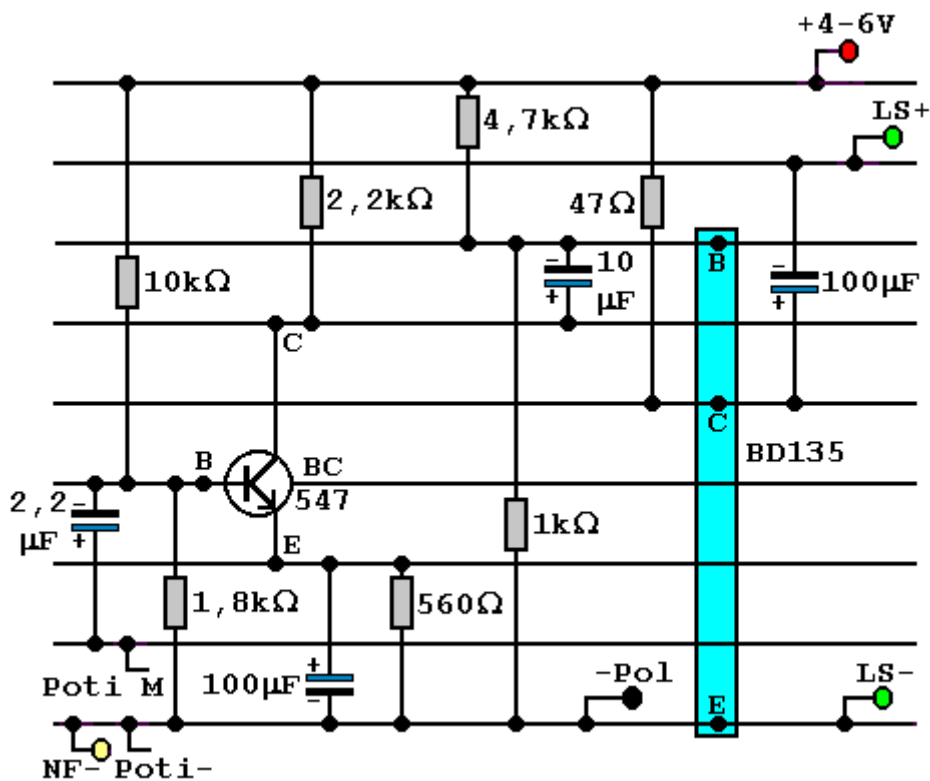


Abb.2: Verschaltung auf einer Lochrasterplatine

Er besteht aus zwei Verstärkerstufen. Die erste sorgt für die erforderliche Ausgangsspannung, die zweite für den benötigten Ausgangsstrom, damit dem Lautsprecher eine genügend hohe Leistung zugeführt wird. Beide sind gleichstrommäßig über einen Kondensator entkoppelt. Als Vorverstärker kann man einen Kleintransistor einsetzen, die Endstufe erfordert einen Transistor mit größerer zulässiger Stromstärke, damit er sich nicht zu sehr erhitzt. Bei größeren Ausgangsleistungen muss er außerdem gekühlt werden. Die Schaltung baut man auf einer Lochrasterplatine auf. Die Verschaltung zeigt Abb. 2. Die fertige Platine kann man in ein Gehäuse einbauen, etwa eine Mon-Cherry- oder Ferrero-Rocher-Dose. Die Ein- und Ausgänge werden mit je einer Telefonbuchse verbunden, einer roten für die positive Spannungsversorgung, einer schwarzen für den Minuspol, zwei gelben für die NF-Spannung und zwei grünen oder blauen für die Lautsprecherausgänge. Außerdem wird das Potentiometer im Deckel der Dose verschraubt. Den positiven Eingang der NF-Quelle verbindet man mit einem Eingang des Potis, den Mittenabgriff des Potis mit dem NF+-Eingang der Schaltung. Um das Verhalten der Schaltung zu untersuchen, führt man die folgenden Versuche durch.

2.2 Versuche

Versuch 1:

Aufbau:

Man schließt an den NF-Eingang des Verstärkers den Ohrhörerausgang eines Radios an und an den Ausgang des Verstärkers einen $8\ \Omega$ -Lautsprecher. Außerdem legt man zwischen die Spannungsversorgung und den Pluspol ein Amperemeter.

Durchführung:

Man stellt die Lautstärke des Ohrhörerausgangs so ein, dass der Verstärker bei einem Drittel seiner vollen Lautstärke ein akustisch einwandfreies Signal liefert. Dann dreht man das Lautstärkepoti voll auf. Danach regelt man das Potentiometer ganz herunter und bestimmt den Ruhestrom bei verschiedenen Betriebsspannungen. Man berührt bei der größten Betriebsspannung den Endtransistor mit einem Finger.

Beobachtung:

Mit größer werdender Lautstärke rauscht und klirrt der Lautsprecher immer mehr, was sich vor allem bei der Sprachwiedergabe unangenehm bemerkbar macht. Der Ruhestrom beträgt $I = 9,2\ \text{mA}$ bei $U = 4\ \text{V}$ und steigt auf $I = 62,6\ \text{mA}$ bei $U = 6\ \text{V}$. Bei der höheren Betriebsspannung ist der Verstärkungsfaktor deutlich größer. Gleichzeitig wird der Endtransistor ein wenig heiß.

Erklärung:

Mit zunehmender Ausgangsleistung werden die Signale immer mehr verzerrt, da die Transistoren an ihre Grenzen stoßen. Um einen hohen Verstärkungsfaktor zu erreichen, muss der Verstärker mit einem hohen Ruhestrom betrieben werden. Dadurch wird die Endstufe heiß, was bei Dauerbetrieb und hohen Betriebsspannungen zur Zerstörung des Transistors führen könnte. Um das zu vermeiden, müsste er gekühlt werden. Außerdem wird die Stromquelle unnötig stark belastet. Um das Verhalten des Verstärkers gegenüber verschiedenen Eingangssignalen genauer zu testen, führt man folgenden Versuch durch.

Versuch 2:

Aufbau:

Man legt an den NF-Eingang des Verstärkers und an den Lautsprecherausgang jeweils einen Kanal eines Zweikanaloszillographen oder eines Picoscopes. Dabei muss man darauf achten, dass beide Geräte eine gemeinsame Erde besitzen. Als NF-Quelle dient ein Funktionsgenerator, der einen Sinuston, einen Rechteckton und einen Dreieckton erzeugen kann.

Durchführung:

Zunächst benutzt man einen Sinuston. Der Funktionsgenerator wird bei voller Lautstärke des Verstärkers auf ungefähr $U_E = 40 \text{ mV}$ eingeregelt. Dann liest man am Oszillographen die Eingangs- und die Ausgangsspannung ab. Alternativ kann man sie auch mit einem Picoscope aufzeichnen. Man schaltet den Funktionsgenerator auf Dreieck- und Rechteckspannung um.

Beobachtung:

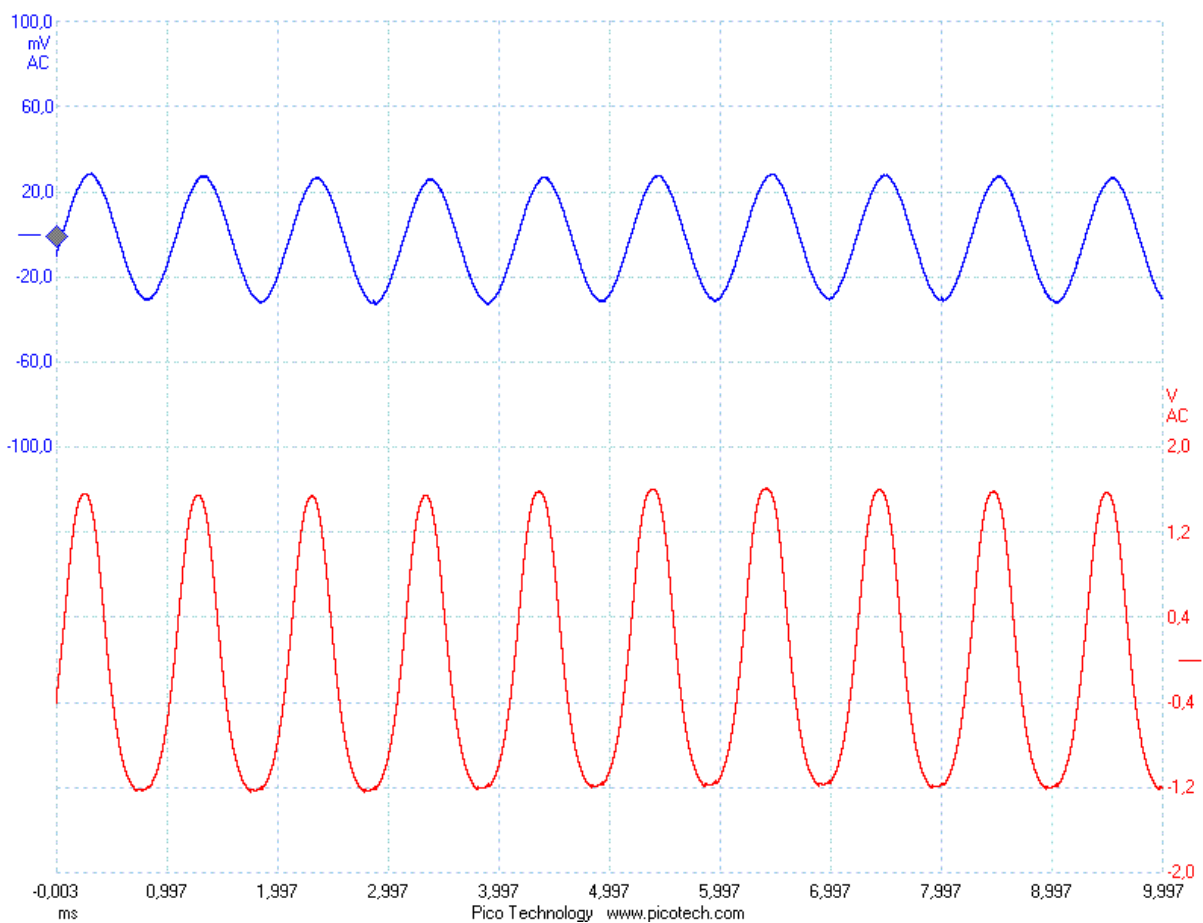
Man erhält die Kurven in Abb. 3.

Auswertung:

Aus der Kurve 3c kann man die maximale Verstärkung ermitteln. Die Eingangsspannung beträgt ungefähr $U_E = 30 \text{ mV}$, die Ausgangsspannung ungefähr $U_A = 1,4 \text{ V}$. Daraus ergibt sich eine Verstärkungsfaktor z von

$$z = \frac{1,4 \text{ V}}{0,03 \text{ V}} = 47.$$

Die Ausgangssignale sind bei allen Spannungsformen leicht verzerrt. Dreht man das Poti in etwa auf halbe Lautstärke, so werden die Signale fast sauber wiedergegeben (s. Abb. 4a-c). Die Eingangsspannung sollte daher bei voller Lautstärke $U_E = 20 \text{ mV}$ nicht übersteigen. Ansonsten müsste der Verstärker anders ausgelegt werden.



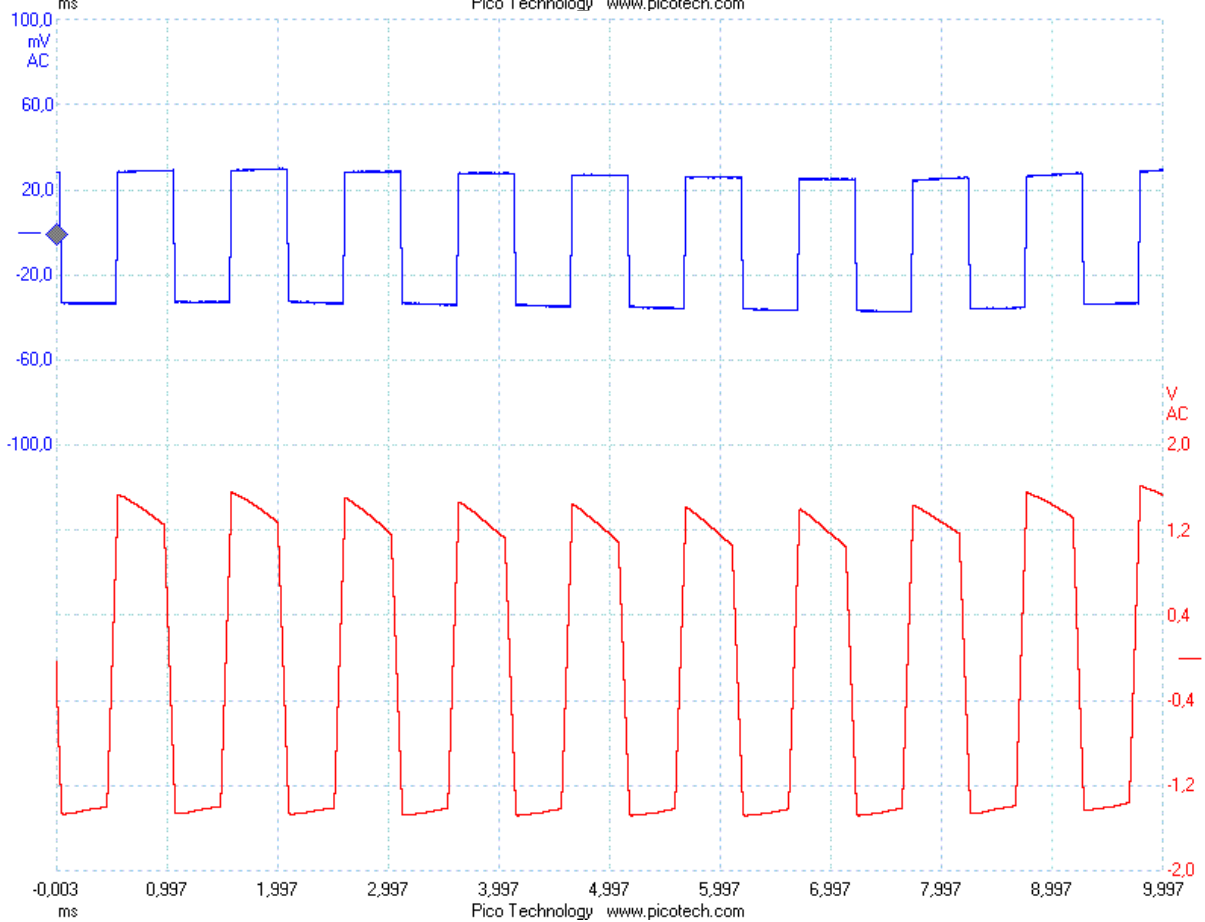
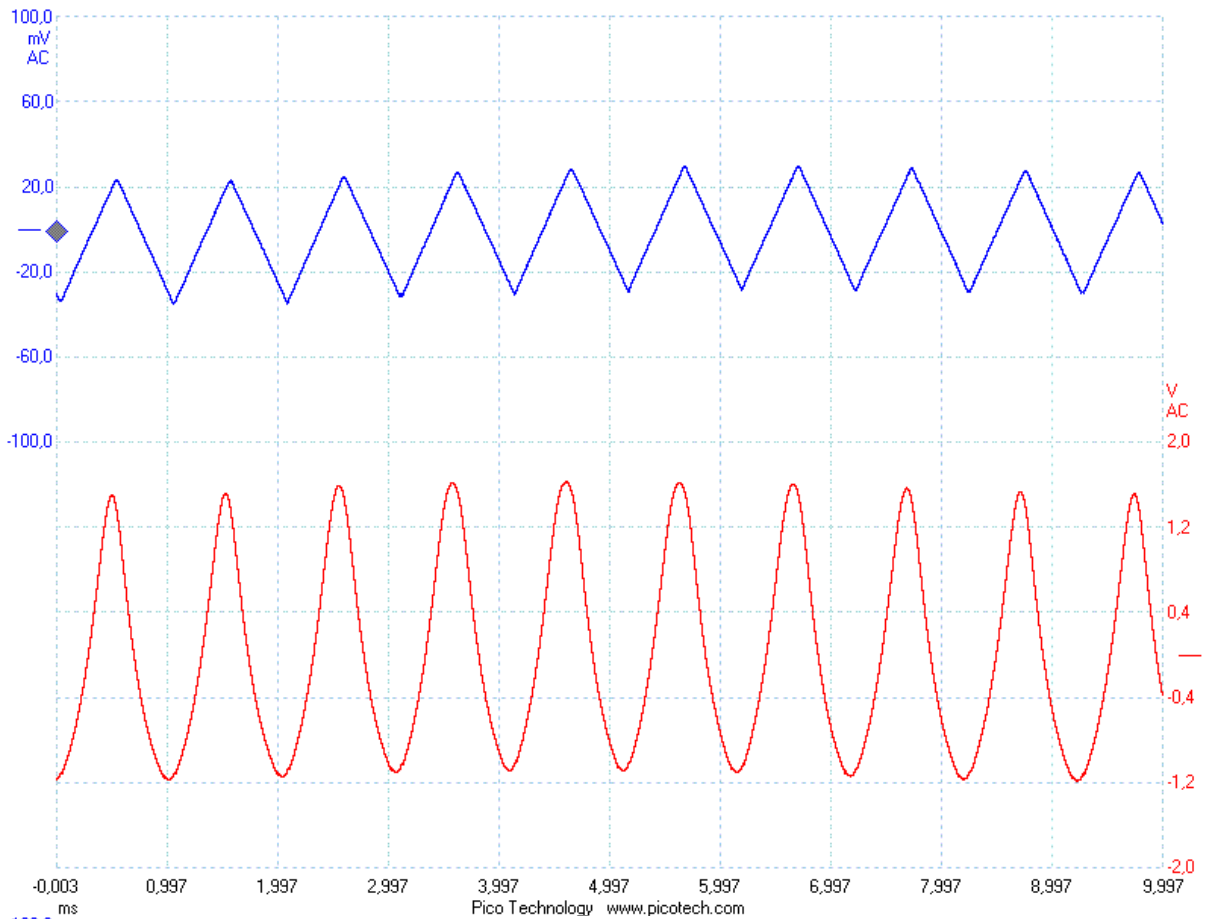
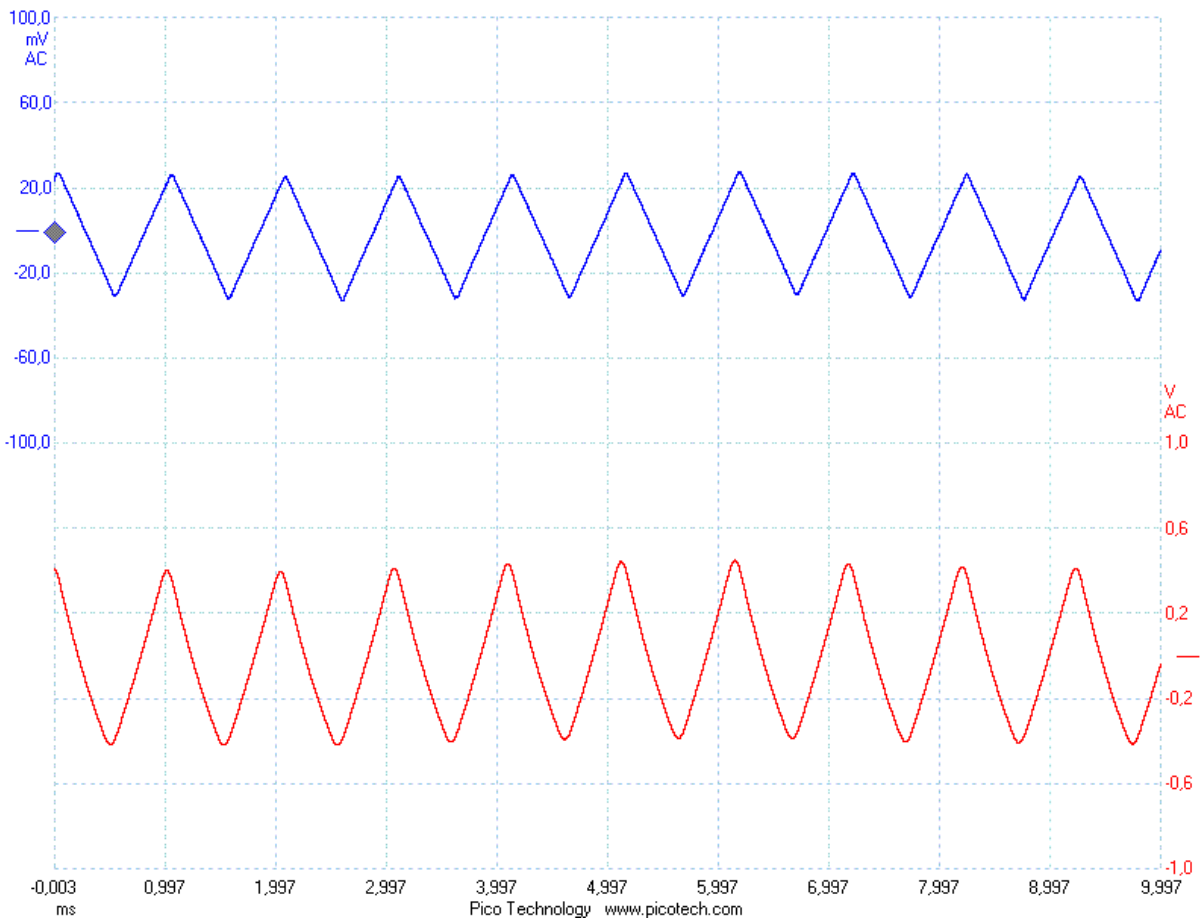
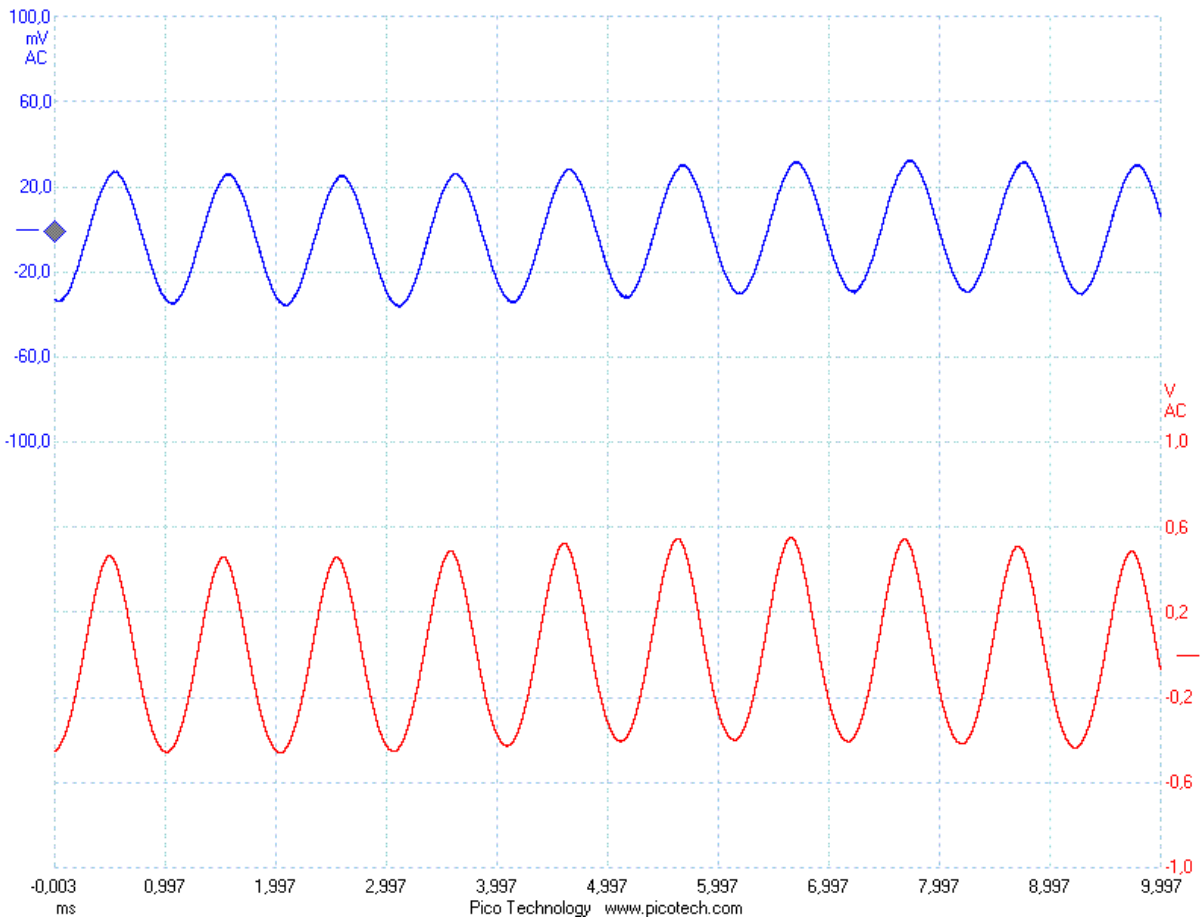


Abb.3a-c: Signale bei voller Lautstärke



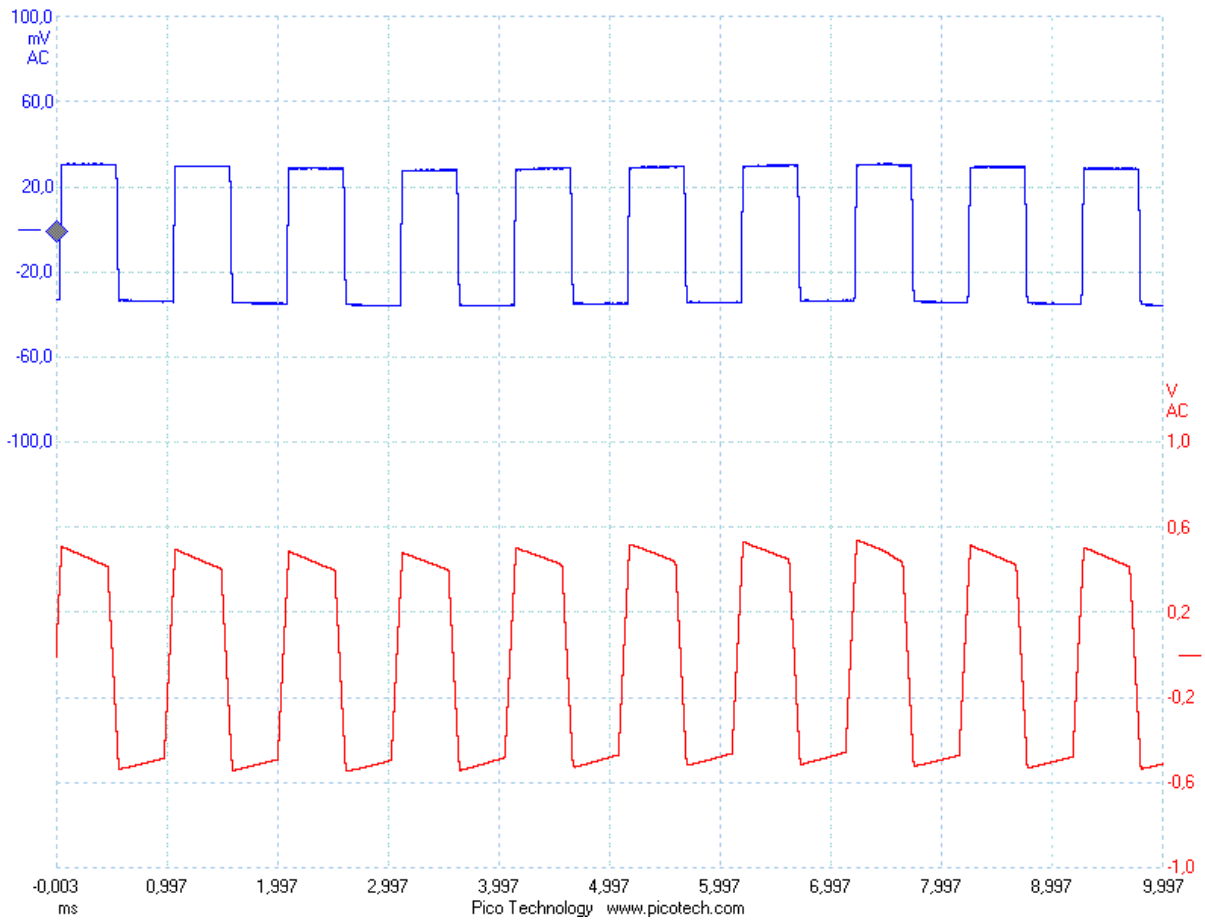


Abb.4a-c: Signale bei halber Lautstärke

3. Gegentaktendstufe

3.1 Aufbau

Um den Ruhestrom zu reduzieren und damit die Stromquelle weniger zu belasten, wurde die Gegentaktendstufe entwickelt.

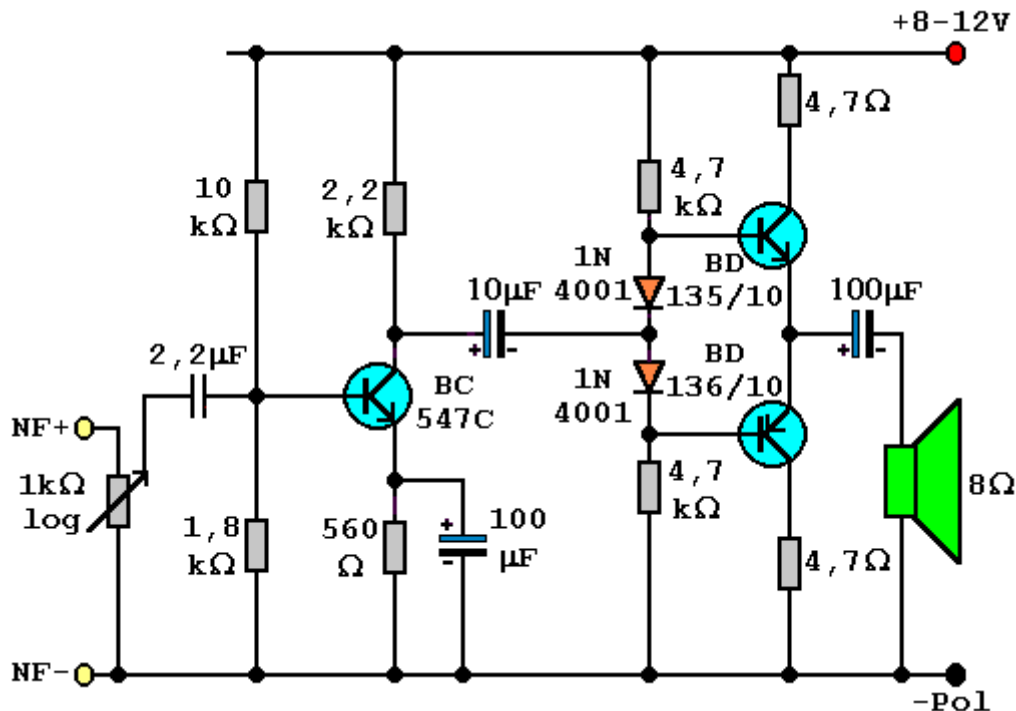


Abb.1: Verstärker mit Gegentaktendstufe

In der einen Halbwelle schaltet der npn-Transistor BD135/10 durch, der pnp-Transistor BD136/10 sperrt, in der anderen Halbwelle ist es umgekehrt. Da der Lautsprecher außerdem über einen Kondensator an die beiden Transistoren angekoppelt ist, kann kein Gleichstrom fließen. Der Ruhestrom ist idealerweise null, wenn die Endstufe genau symmetrisch arbeitet. Das wird durch die beiden Dioden am Eingang der Gegentaktstufe gewährleistet und durch die gleichen Widerstände im Basiskreis der beiden Transistoren. Als Spannungsvorverstärker dient wiederum ein Kleintransistor. Man benötigt die doppelte Betriebsspannung im Vergleich zum Verstärker ohne Gegentaktendstufe, da beide Transistoren in Reihe geschaltet sind. Alternativ könnte man auch mit einer symmetrischen Spannungsversorgung mit $\pm 4-6$ V arbeiten. Die Verschaltung auf einer Lochrasterplatine zeigt Abb.2. Die fertige Platine kann man in ein Gehäuse einbauen, etwa eine Mon-Cherry- oder Ferrero-Rocher-Dose. Die Ein- und Ausgänge werden mit je einer Telefonbuchse verbunden, einer roten für die positive Spannungsversorgung, einer schwarzen für den Minuspol, zwei gelben für die NF-Spannung und zwei grünen oder blauen für die Lautsprecherausgänge. Außerdem wird das Potentiometer im Deckel der Dose verschraubt. Den positiven Eingang der NF-Quelle verbindet man mit einem Eingang des Potis, den Mittenabgriff des Potis mit dem NF+-Eingang der Schaltung. Mit ihr führt man die folgenden Versuche durch.

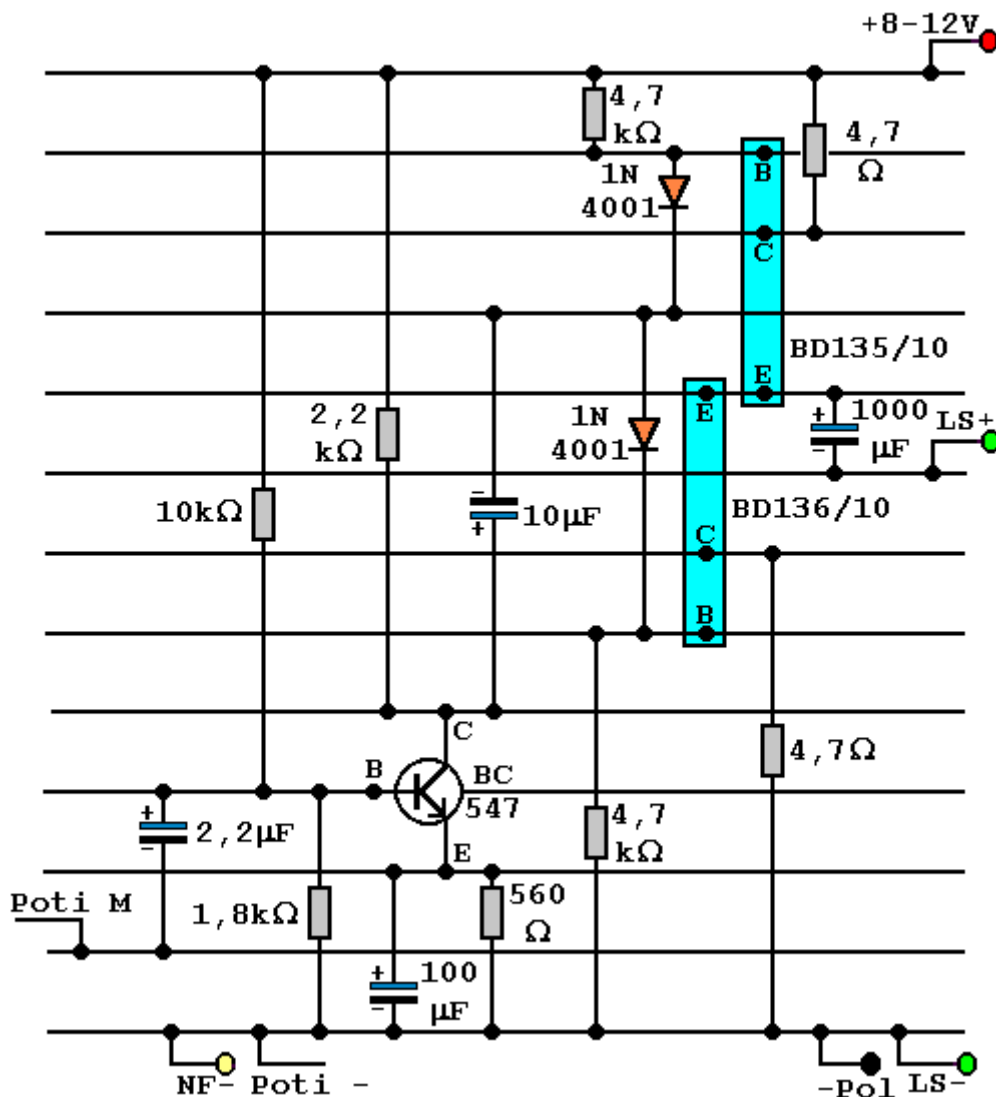


Abb.2: Verschaltung auf einer Lochrasterplatte

3.2 Versuche

Versuch 1:

Aufbau:

Man schließt an den NF-Eingang des Verstärkers den Ohrhörerausgang eines Radios an und an den Ausgang des Verstärkers einen 8 Ω–Lautsprecher. Außerdem legt man zwischen die Spannungsversorgung und den Pluspol ein Amperemeter.

Durchführung:

Man stellt die Lautstärke des Ohrhörerausgangs so ein, dass der Verstärker bei einem Drittel seiner vollen Lautstärke ein akustisch einwandfreies Signal liefert. Dann dreht man das Lautstärkepoti voll auf. Danach regelt man das Potentiometer ganz herunter und bestimmt den Ruhestrom bei verschiedenen Betriebsspannungen. Man berührt bei der größten Betriebsspannung die Endtransistoren mit einem Finger.

Beobachtung:

Mit größer werdender Lautstärke rauscht und klirrt der Lautsprecher immer mehr, was sich vor allem bei der Sprachwiedergabe unangenehm bemerkbar macht. Allerdings ist der Effekt wesentlich weniger ausgeprägt wie mit der Schaltung ohne Gegentaktsstufe. Der Ruhestrom

beträgt $I = 4,2 \text{ mA}$ bei $U = 8 \text{ V}$ und steigt auf $I = 9,3 \text{ mA}$ bei $U = 12 \text{ V}$. Bei der höheren Betriebsspannung ist der Verstärkungsfaktor etwas größer. Die Transistoren werden nicht heiß.

Erklärung:

Mit zunehmender Ausgangsleistung werden die Signale immer mehr verzerrt, da die Transistoren an ihre Grenzen stoßen. Der Ruhestrom hat sich wesentlich verringert im Vergleich zum einfachen Verstärker. Die Endtransistoren werden nicht heiß. Die Qualität der Wiedergabe hat sich deutlich verbessert, erreicht aber noch nicht die Qualität der in den folgenden Kapiteln beschriebenen Verstärker, da die Schaltung nach wie vor mit einfachen Transistoren arbeitet. Weil der Ruhestrom der Endtransistoren unabhängig von der Betriebsspannung recht klein ist, hängt die Lautstärke nur geringfügig von der Betriebsspannung ab. Lediglich der Verstärkungsfaktor der Vorverstärkerstufe steigt etwas an. Um das Verhalten des Verstärkers gegenüber verschiedenen Eingangssignalen genauer zu testen, führt man folgenden Versuch durch.

Versuch 2:

Aufbau:

Man legt an den NF-Eingang des Verstärkers und an den Lautsprecherausgang jeweils einen Kanal eines Zweikanaloszillographen oder eines Picoscopes. Dabei muss man darauf achten, dass beide Geräte eine gemeinsame Erde besitzen. Als NF-Quelle dient ein Funktionsgenerator, der einen Sinuston, einen Rechteckton und einen Dreieckton erzeugen kann.

Durchführung:

Zunächst benutzt man einen Sinuston. Der Funktionsgenerator wird bei voller Lautstärke des Verstärkers auf ungefähr $U_E = 40 \text{ mV}$ eingeregelt. Dann liest man am Oszillographen die Eingangsspannung und die Ausgangsspannung ab. Alternativ kann man sie auch mit einem Picoscope aufzeichnen. Man schaltet den Funktionsgenerator auf Dreieck- und Rechteckspannung um.

Beobachtung:

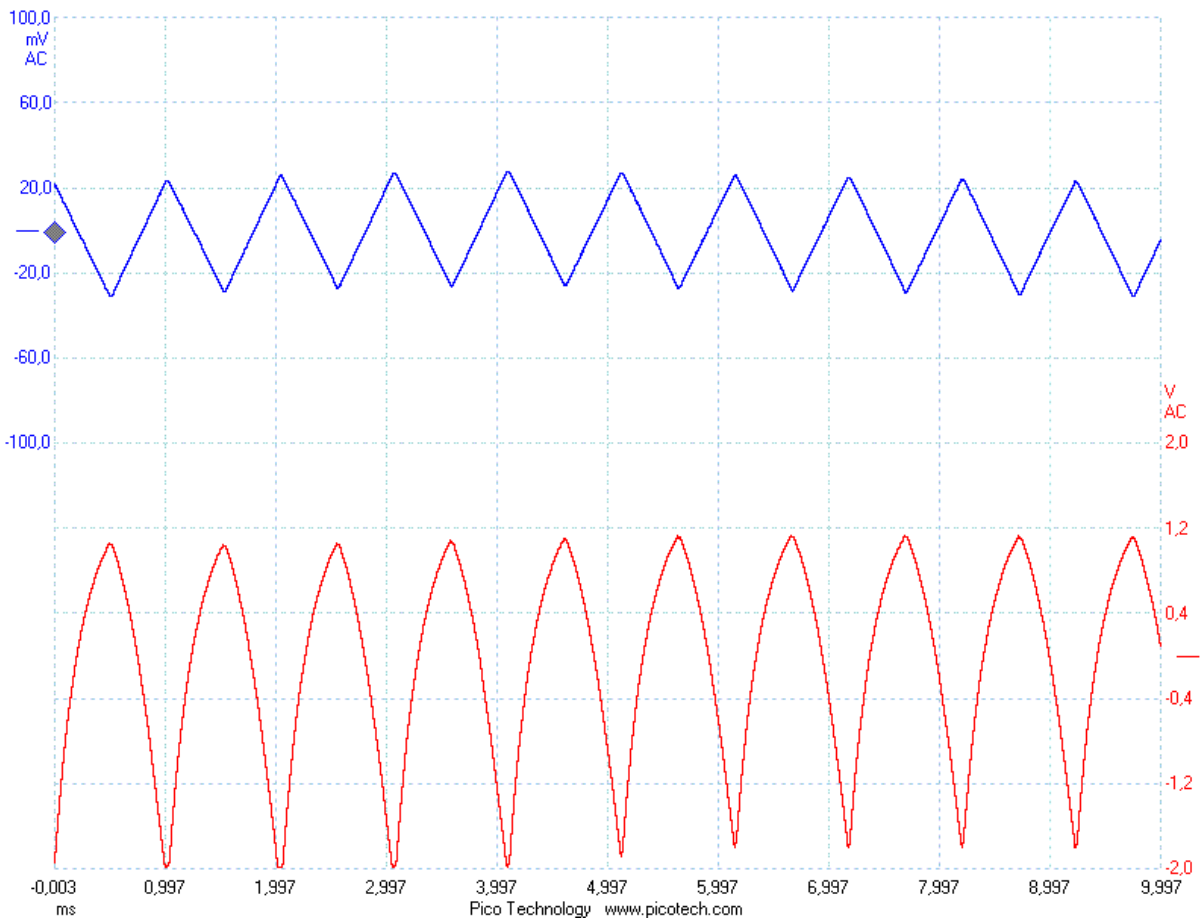
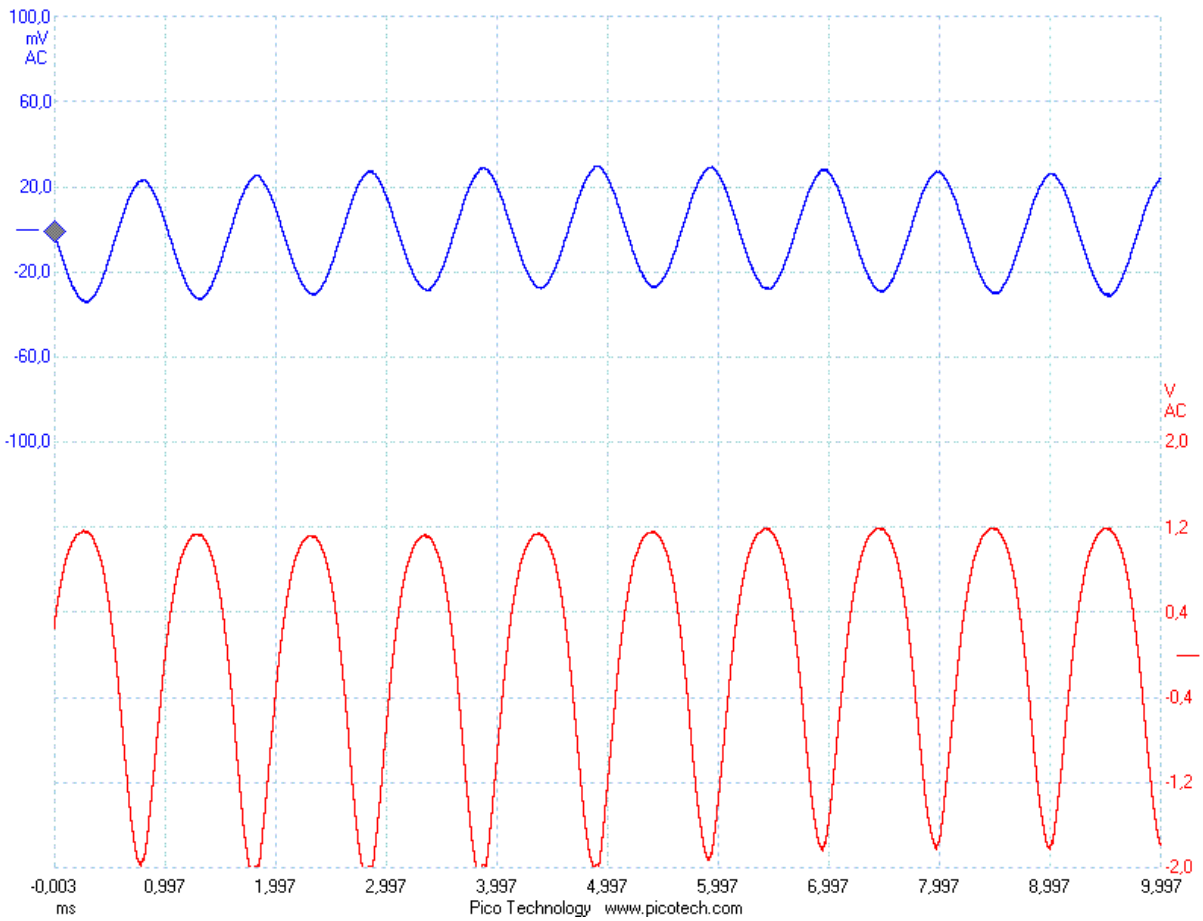
Man erhält die Kurven in Abb. 3.

Auswertung:

Aus der Kurve 3c erhält man mit einer Eingangsspannung $U_E = 30 \text{ mV}$ eine Ausgangsspannung $U_A = 1,4 \text{ V}$. Damit ergibt sich eine maximale Verstärkung wie in Versuch 2.2 von

$$z = \frac{1,4 \text{ V}}{0,03 \text{ V}} = 47.$$

Die Ausgangssignale sind bei allen Spannungsformen deutlich verzerrt und nicht symmetrisch zur Nulllinie. Bei halber Lautstärke werden die Signale wesentlich sauberer und fast symmetrisch wiedergegeben (s. Abb. 4a-c).



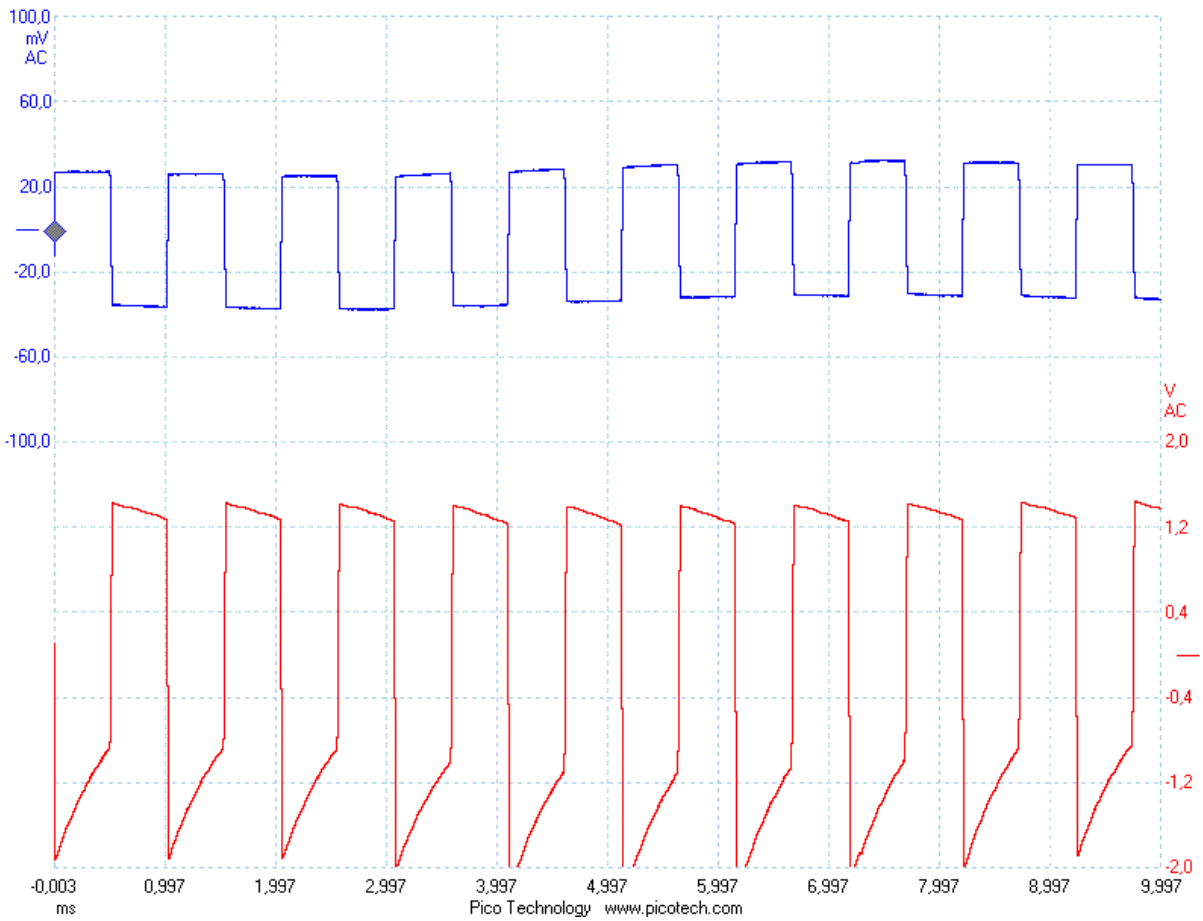
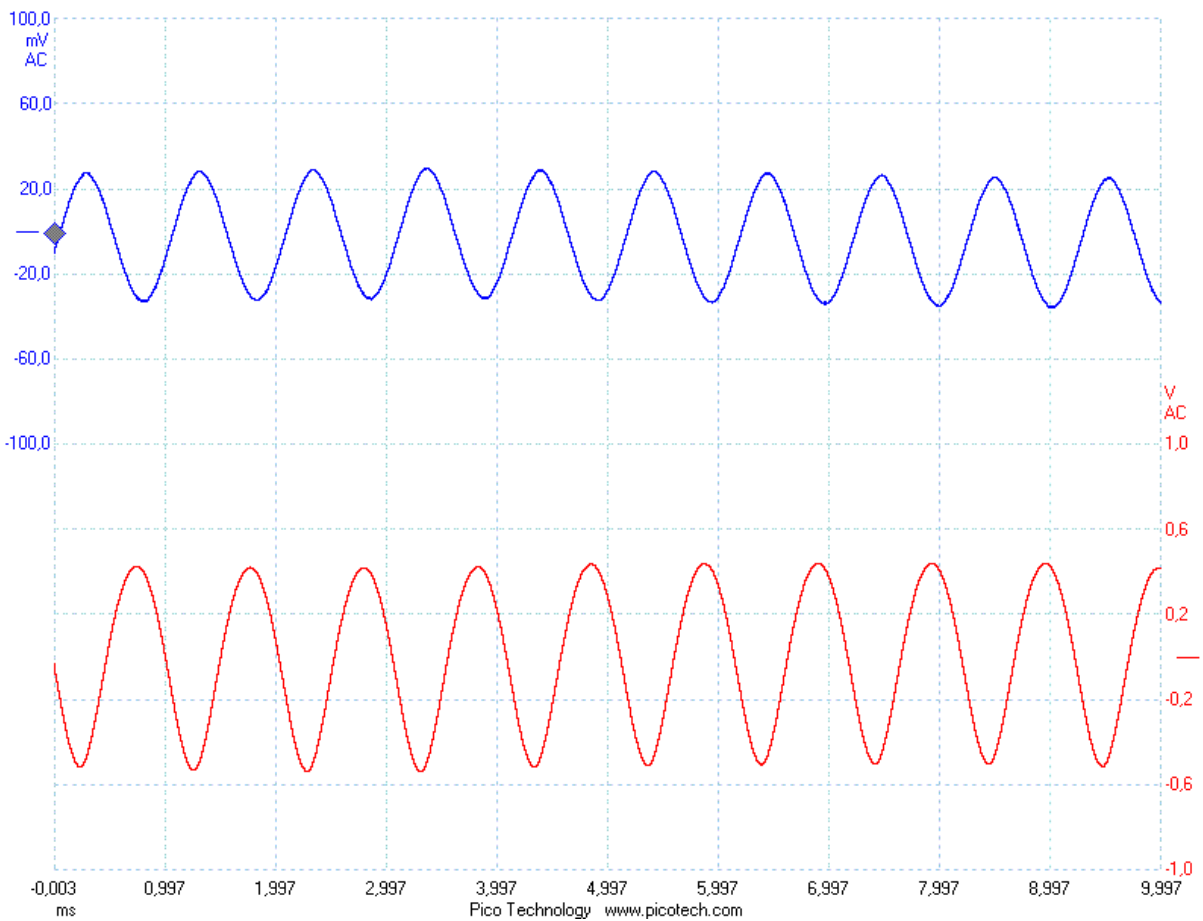


Abb.3a-c: Signale bei voller Lautstärke



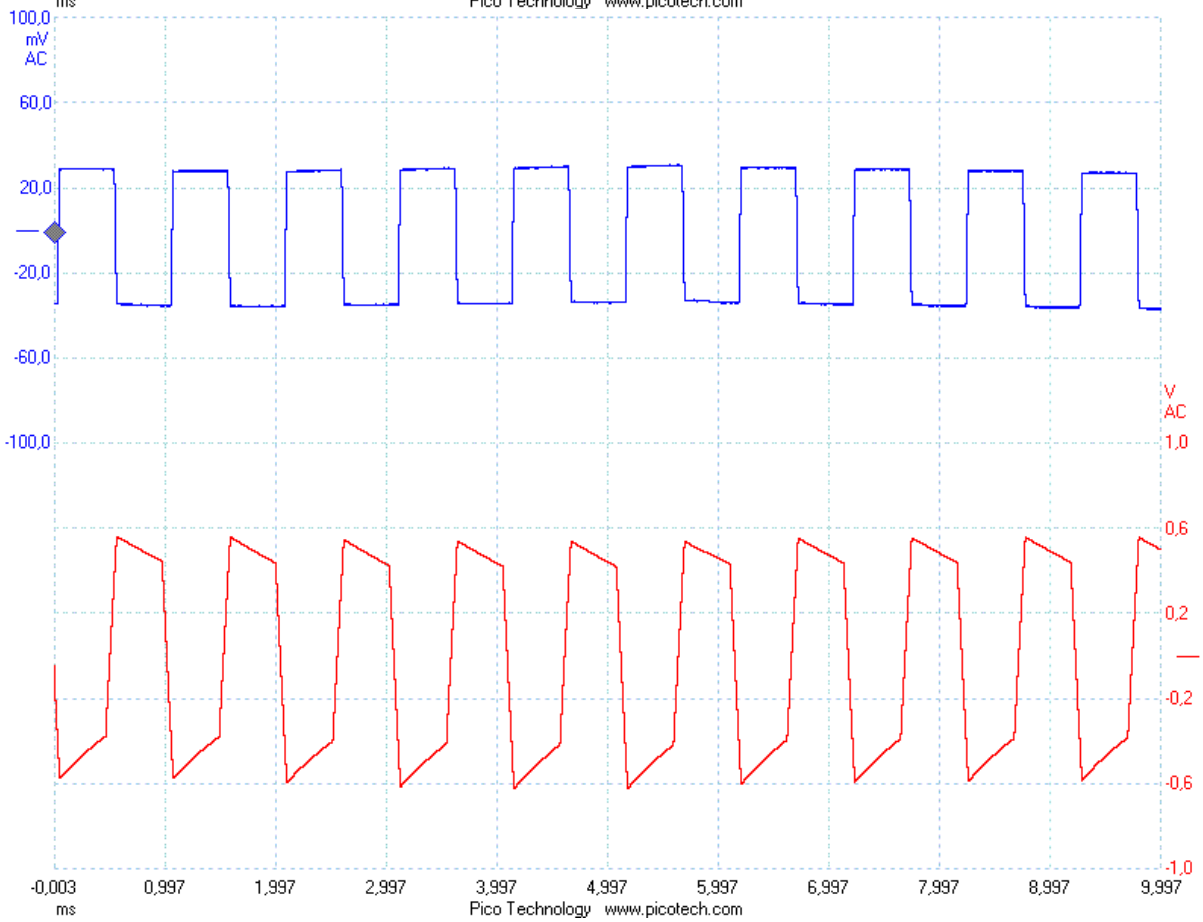
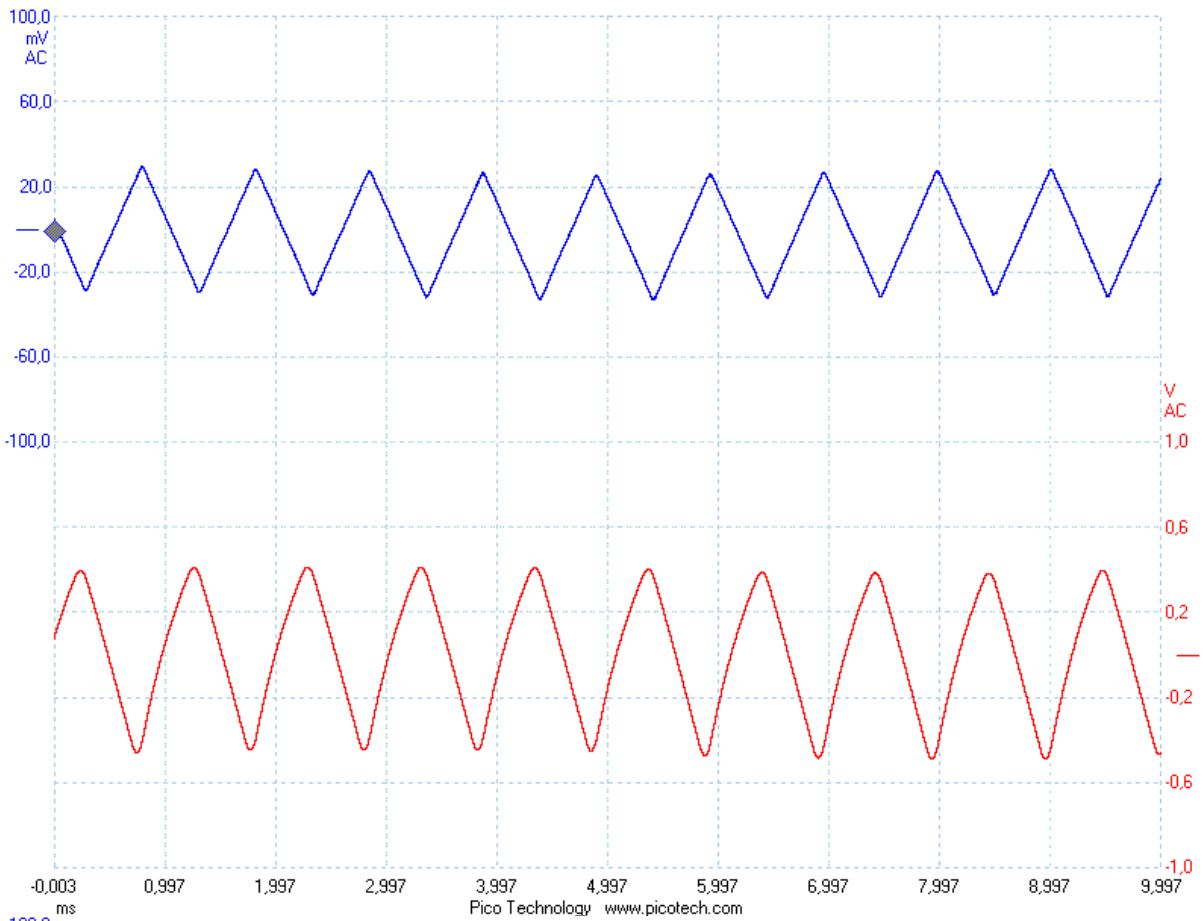


Abb.4a-c: Signale bei halber Lautstärke

4. Operationsverstärker

4.1 Aufbau

Um die Verzerrung der Signale zu verringern, muss man als Vorverstärker einen Operationsverstärker OP einsetzen. Abb. 1 zeigt den Schaltplan eines solchen Verstärkers, wie er in ähnlicher Form in diversen Audiogeräten benutzt wird. Um den Ruhestrom möglichst gering zu halten, kombiniert man ihn mit einer Gegentaktendstufe.

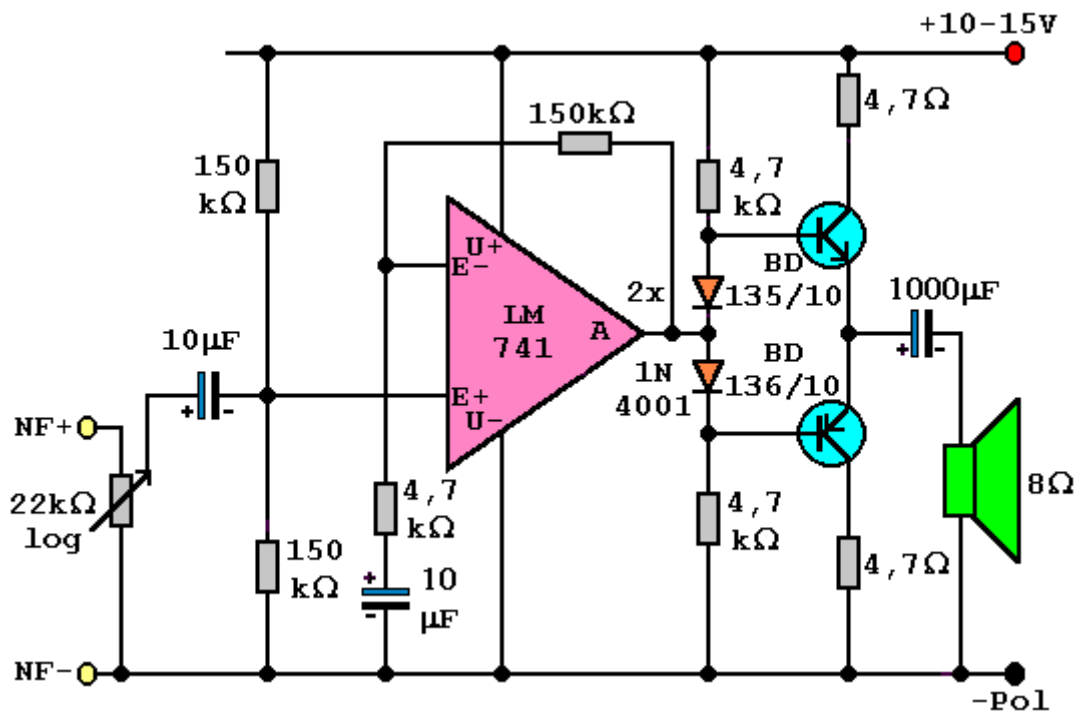


Abb.1: Verstärker mit OP als Vorverstärker

Die Schaltung baut man auf einer Lochrasterplatine auf. Die Verschaltung zeigt Abb.2. Die fertige Platine kann man in ein Gehäuse einbauen, etwa eine Mon-Cherry- oder Ferrero-Rocher-Dose. Die Ein- und Ausgänge werden mit je einer Telefonbuchse verbunden, einer roten für die positive Spannungsversorgung, einer schwarzen für den Minuspol, zwei gelben für die NF-Spannung und zwei grünen oder blauen für die Lautsprecherausgänge. Außerdem wird das Potentiometer im Deckel der Dose verschraubt. Den positiven Eingang der NF-Quelle verbindet man mit einem Eingang des Potis, den Mittenabgriff des Potis mit dem NF+-Eingang der Schaltung. Mit ihr führt man die folgenden Versuche durch.

4.2 Versuche

Versuch 1:

Aufbau:

Man schließt an den NF-Eingang des Verstärkers den Ohrhörerausgang eines Radios an und an den Ausgang des Verstärkers einen 8 Ω–Lautsprecher. Außerdem legt man zwischen die Spannungsversorgung und den Pluspol ein Amperemeter.

Durchführung:

Man stellt die Lautstärke des Ohrhörerausgangs so ein, dass der Verstärker bei einem Drittel seiner vollen Lautstärke ein akustisch einwandfreies Signal liefert. Dann dreht man das Laut-

stärkepoti voll auf. Danach regelt man das Potentiometer ganz herunter und bestimmt den Ruhestrom bei verschiedenen Betriebsspannungen. Man berührt bei der größten Betriebs-
spannung die Endtransistoren mit einem Finger.

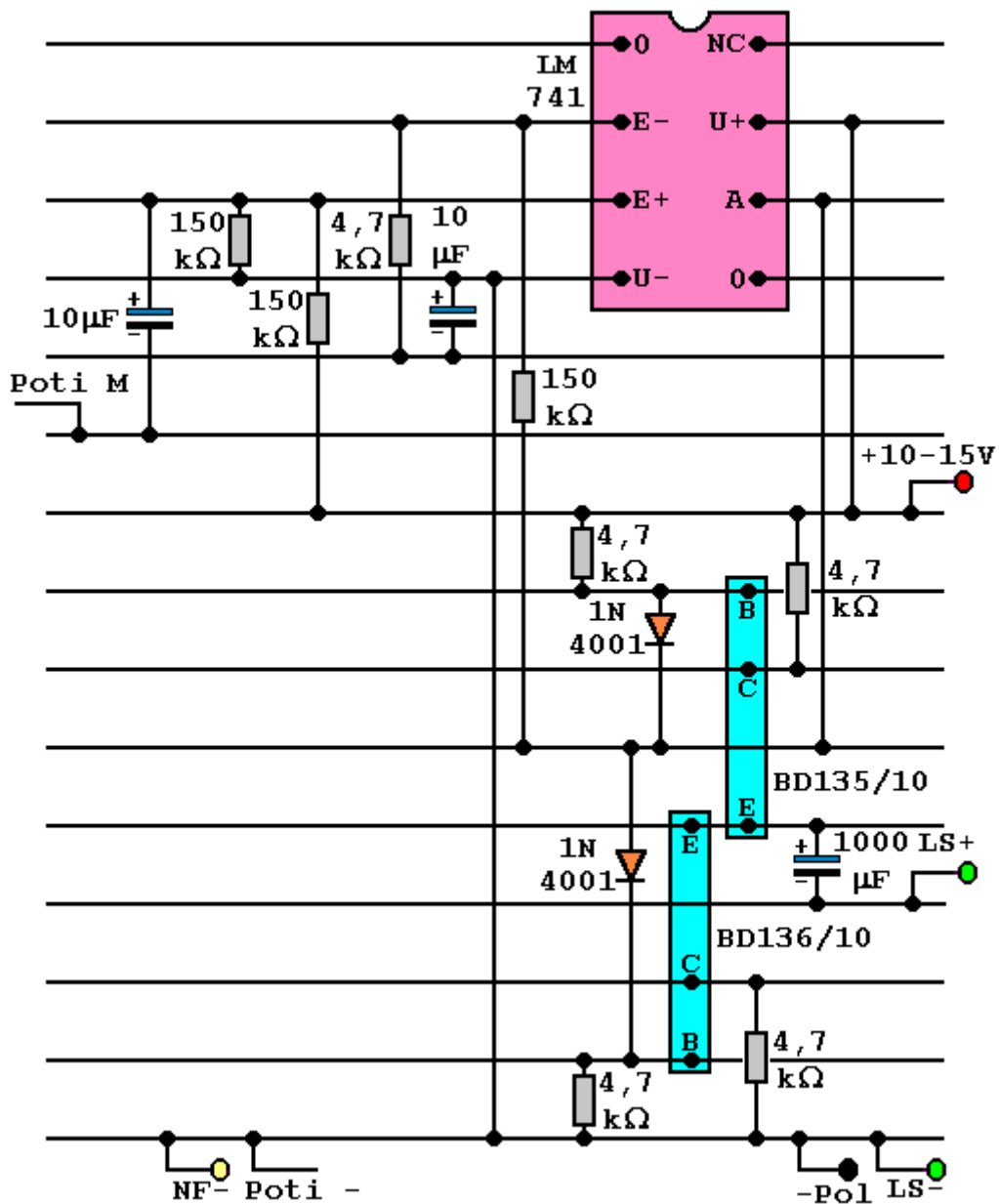


Abb.2: Verschaltung auf einer Lochrasterplatine

Beobachtung:

Auch mit größer werdender Lautstärke rauscht und klirrt der Lautsprecher kaum. Der Ruhestrom beträgt $I = 1,6 \text{ mA}$ bei $U = 10 \text{ V}$ und steigt auf $I = 3,1 \text{ mA}$ bei $U = 15 \text{ V}$. Bei der höheren Betriebsspannung ist die Verstärkung kaum größer. Die Endtransistoren werden nicht heiß.

Erklärung:

Mit zunehmender Ausgangsleistung werden die Signale kaum stärker verzerrt, da der OP über einen großen Bereich wie ein idealer Verstärker arbeitet. Der Ruhestrom ist noch geringer wie beim vergleichbaren Verstärker ohne OP, da der Operationsverstärker im Idealfall stromlos ist. Es entfällt somit der Ruhestrom für den Vorverstärker. Die Qualität der Wiedergabe hat sich deutlich verbessert. Da der Ruhestrom der Endtransistoren unabhängig von

der Betriebsspannung fast null ist, hängt die Lautstärke nur geringfügig von der Betriebsspannung ab. Die Endtransistoren werden nicht heiß. Außerdem bleibt der Verstärkungsfaktor des OP konstant, da er nur von der Eingangsbeschaltung beeinflusst wird. Um das Verhalten des Verstärkers gegenüber verschiedenen Eingangssignalen genauer zu testen, führt man folgenden Versuch durch.

Versuch 2:

Aufbau:

Man legt an den NF-Eingang des Verstärkers und an den Lautsprecherausgang jeweils einen Kanal eines Zweikanaloszillographen oder eines Picoscopes an. Dabei muss man darauf achten, dass beide Geräte eine gemeinsame Erde besitzen. Als NF-Quelle dient ein Funktionsgenerator, der einen Sinuston, einen Rechteckton und einen Dreieckton abgeben kann.

Durchführung:

Zunächst benutzt man einen Sinuston. Der Funktionsgenerator wird bei voller Lautstärke des Verstärkers auf ungefähr $U_E = 40 \text{ mV}$ eingeregelt. Dann liest man am Oszillographen die Eingangsspannung und die Ausgangsspannung ab. Alternativ kann man sie auch mit einem Picoscope aufzeichnen. Man schaltet den Funktionsgenerator auf Dreieck- und Rechteckspannung um.

Beobachtung:

Man erhält die Kurven in Abb. 3.

Auswertung:

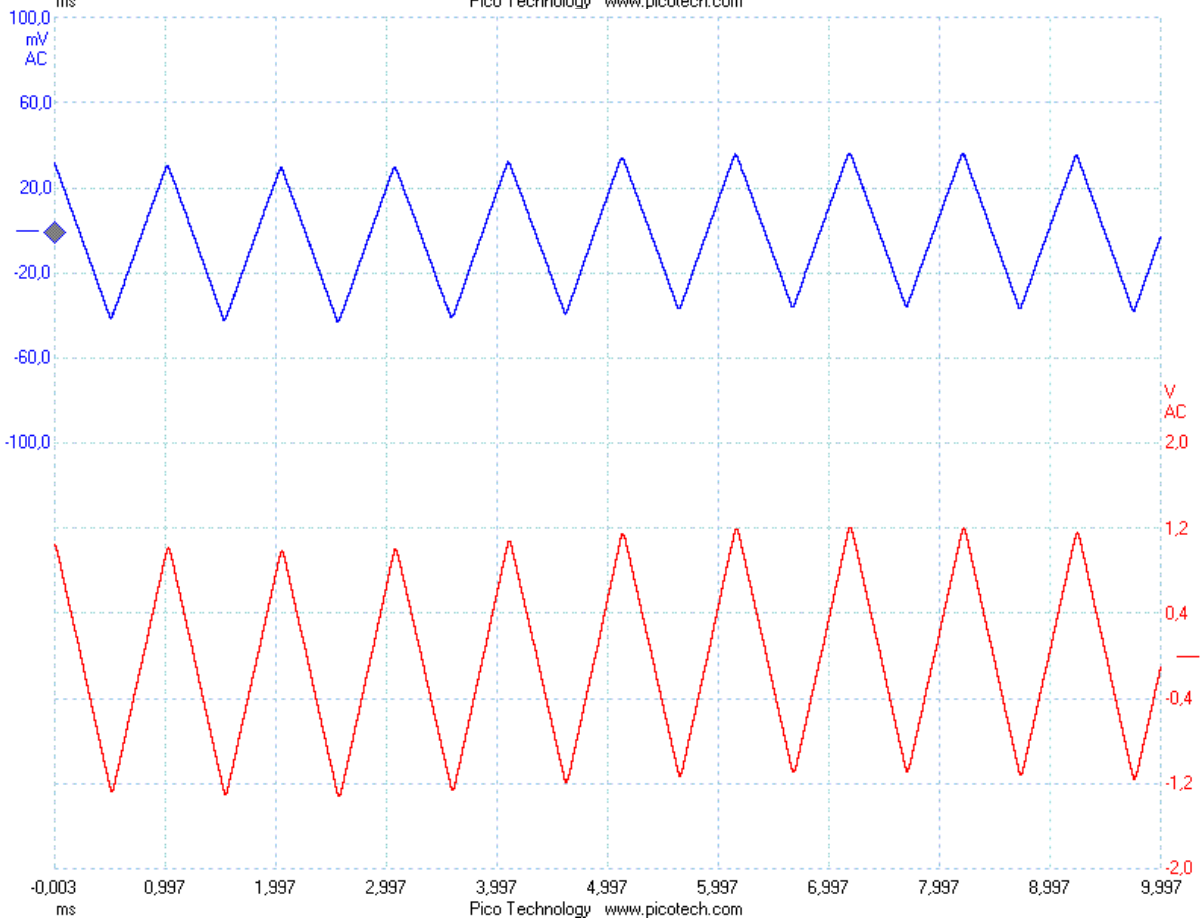
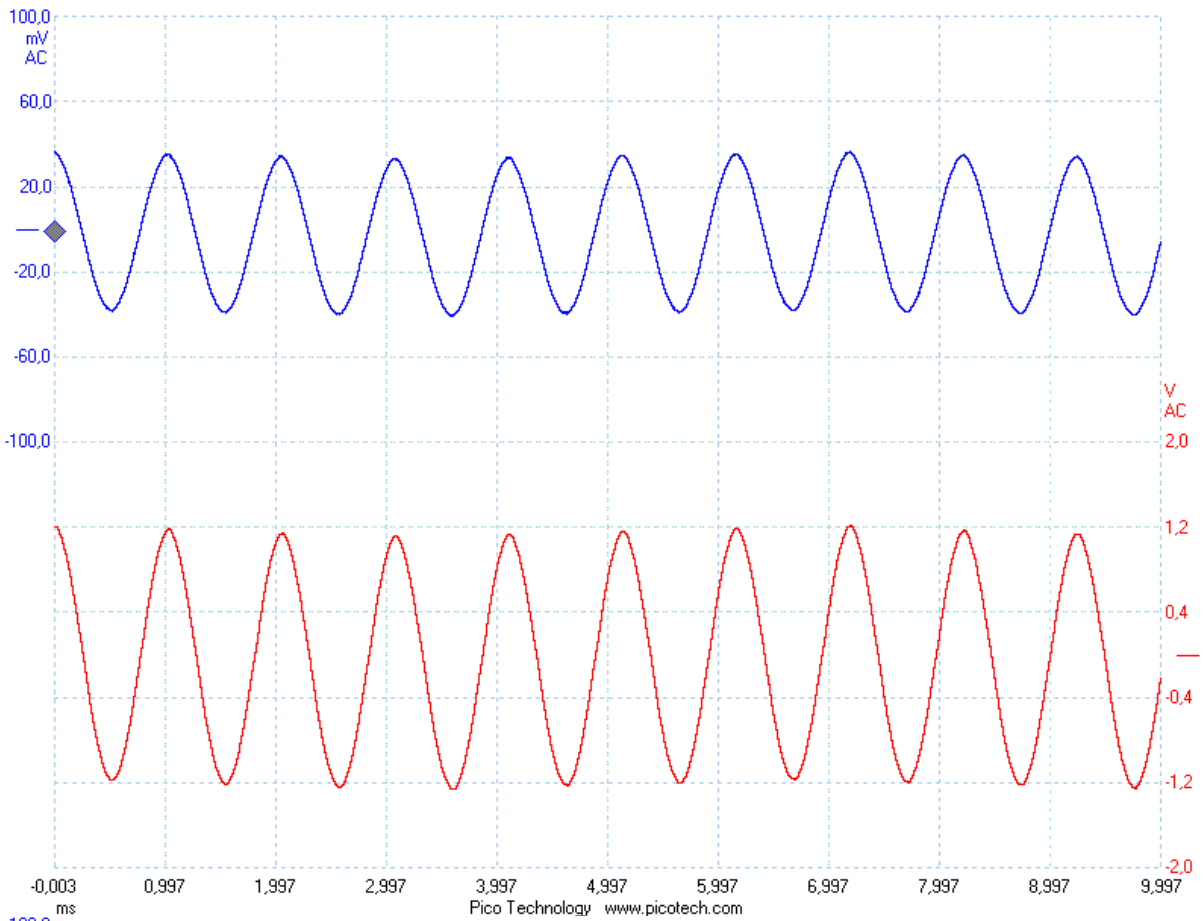
Aus der Kurve 3c erhält man mit einer Eingangsspannung $U_E = 35 \text{ mV}$ und einer Ausgangsspannung $U_A = 1,2 \text{ V}$ einen maximalen Verstärkungsfaktor von

$$z = \frac{1,2 \text{ V}}{35 \text{ mV}} = 34,3.$$

Die Ausgangssignale sind bei allen Spannungsformen nicht verzerrt und symmetrisch zur Nulllinie. Erhöht man die Eingangsspannung auf ca. $U_E = 120 \text{ mV}$, so steigt die Ausgangsspannung entsprechend an, ohne verzerrt zu werden. Das gilt für alle drei Signalformen. Der OP arbeitet wie ein idealer Verstärker. Aufgrund der Eingangsbeschaltung müsste er einen Verstärkungsfaktor z aufweisen, für den gilt:

$$z = \frac{150\text{k}\Omega}{4,7\text{k}\Omega} = 32$$

was fast genau dem gemessenen Wert entspricht.



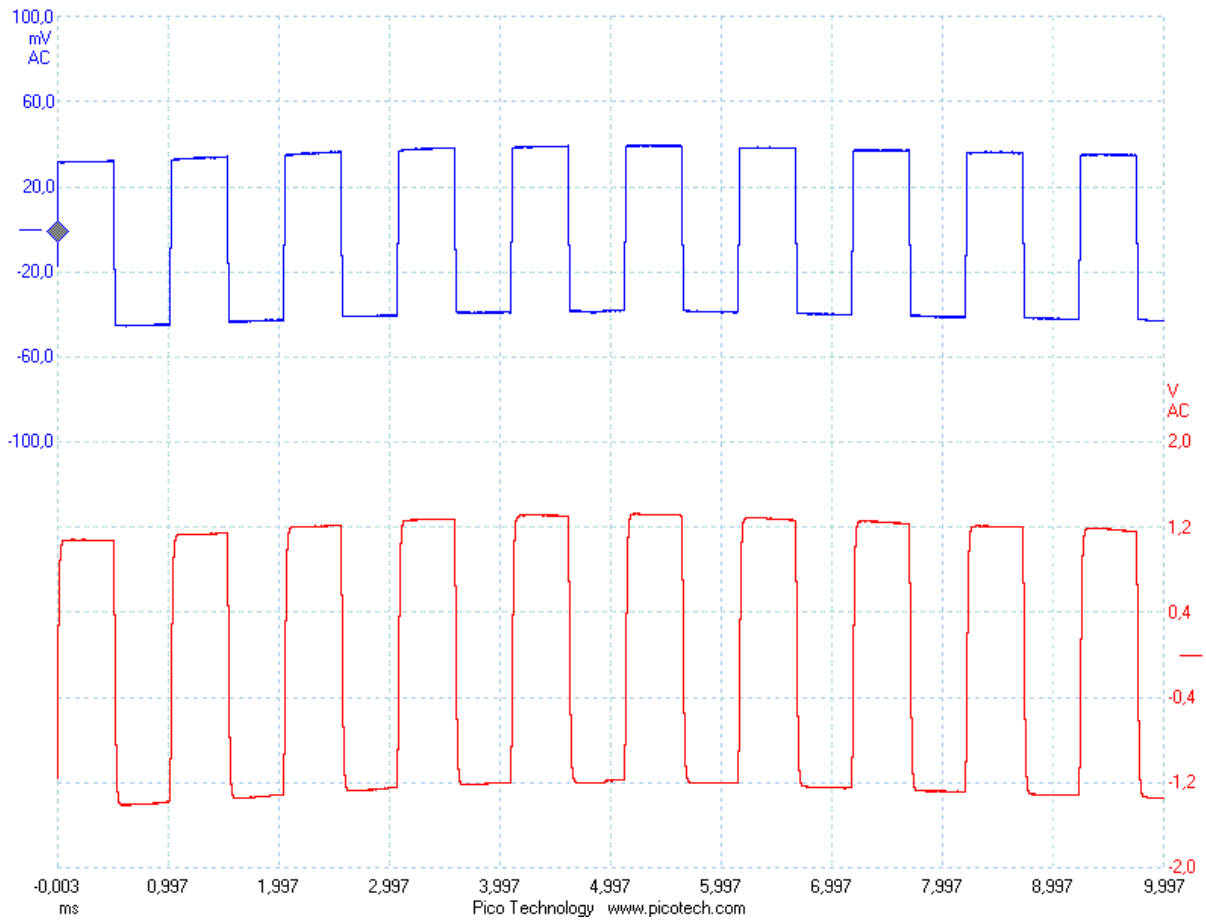


Abb. 3a-c: Signale bei voller Lautstärke

5. Integrierte Schaltung

5.1 Aufbau

Den Endpunkt der Entwicklung stellen integrierte Schaltungen dar, die alle Baugruppen eines Verstärkers, den Vorverstärker und die Endstufe in einem IC vereinen. Eine Vielzahl solcher Schaltungen findet man im Sortiment aller Elektronikfirmen, die für verschiedene Leistungen und Betriebsspannungen ausgelegt wurden. Meist sind nur noch wenige externe Bauteile nötig, etwa um den Verstärkungsfaktor den genauen Bedürfnissen anzupassen. Zudem besitzen die ICs häufig zusätzliche Schutzmechanismen, die z.B. verhindern sollen, dass das IC falsch gepolt wird oder sich überhitzt. Außerdem sind sie meist kurzschlussfest. Als Beispiel für eine solche Schaltung habe ich den TDA 2006 ausgewählt. Er ist ein Mono-Verstärker, arbeitet in einem großen Versorgungsspannungsbereich und kann sowohl mit einer symmetrischen ($\pm 4\text{ V}$ bis $\pm 15\text{ V}$), als auch mit einer einzelnen, asymmetrischen Versorgungsspannung (8 V bis 30 V) betrieben werden. Bei einer Betriebsspannung von 12 V wird eine Ausgangsleistung von 8 W an einem $8\ \Omega$ -Lautsprecher bei einem Gesamtklirrfaktor von maximal $0,5\%$ erreicht. Der Ausgang kann aber auch mit einem $4\ \Omega$ -Lautsprecher beschaltet werden. Verwendet wird der integrierte Verstärker in Autoradios, tragbaren Radiogeräten, Fernsehgeräten und Aktivboxen. Eine mögliche Schaltung mit einer asymmetrischen Stromversorgung zeigt Abb.1.

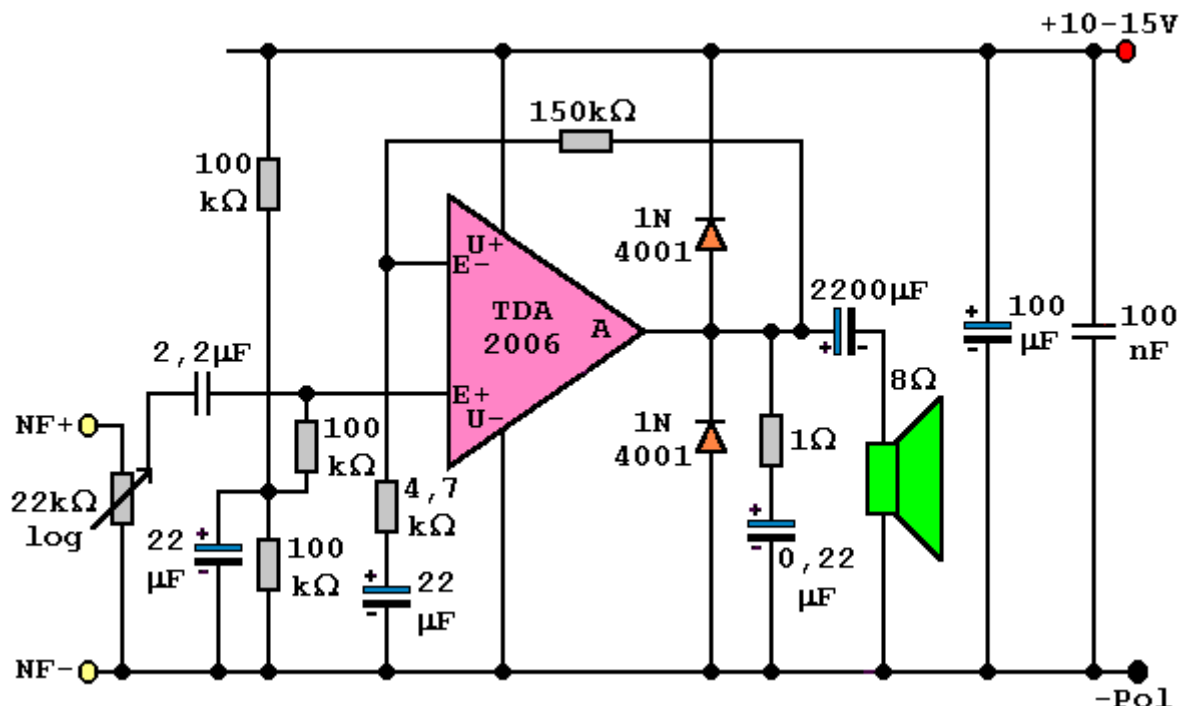


Abb.1: Verstärker mit einem IC

Die Schaltung kann man auf einer Lochrasterplatine verlöten. Die Verschaltung zeigt Abb. 2. Die fertige Platine baut man in ein Gehäuse ein, etwa eine Mon-Cherry- oder Ferrero-Rocher-Dose. Die Ein- und Ausgänge werden mit je einer Telefonbuchse verbunden, einer roten für die positive Spannungsversorgung, einer schwarzen für den Minuspol, zwei gelben für die NF-Spannung und zwei grünen oder blauen für die Lautsprecherausgänge. Außerdem wird das Potentiometer im Deckel der Dose verschraubt. Den positiven Eingang der NF-

Quelle verbindet man mit einem Eingang des Potis, den Mittenabgriff des Potis mit dem NF+-Eingang der Schaltung. Mit ihr führt man die folgenden Versuche durch.

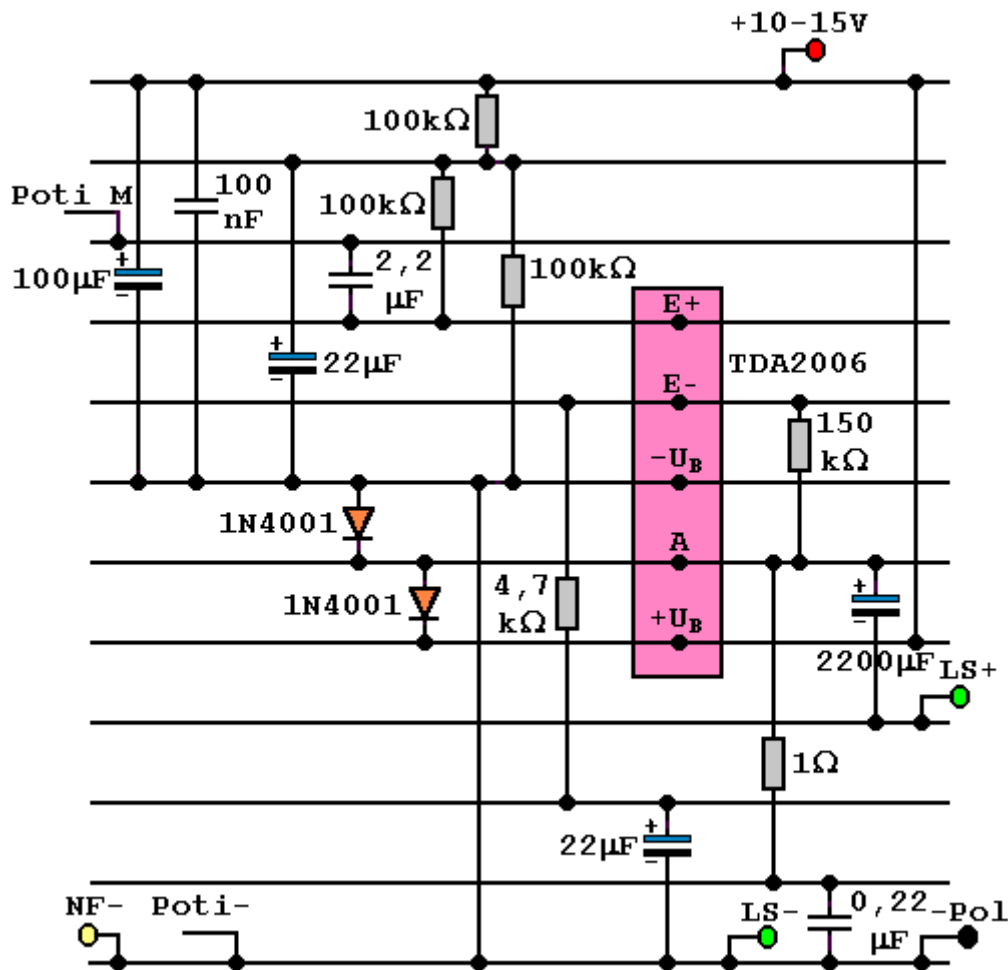


Abb.2: Verschaltung auf einer Lochrasterplatine

5.2 Versuche

Versuch 1:

Aufbau:

Man schließt an den NF-Eingang des Verstärkers den Ohrhörerausgang eines Radios an und an den Ausgang des Verstärkers einen 8 Ω–Lautsprecher. Außerdem legt man zwischen die Spannungsversorgung und den Pluspol ein Amperemeter.

Durchführung:

Man stellt die Lautstärke des Ohrhörerausgangs so ein, dass der Verstärker bei einem Drittel seiner vollen Lautstärke ein akustisch einwandfreies Signal liefert. Dann dreht man das Lautstärkepoti voll auf. Danach regelt man das Potentiometer ganz herunter und bestimmt den Ruhestrom bei verschiedenen Betriebsspannungen. Man berührt bei der größten Betriebsspannung das IC mit einem Finger.

Beobachtung:

Auch mit größer werdender Lautstärke rauscht und klirrt der Lautsprecher nicht, zumindest nicht hörbar. Der Ruhestrom beträgt $I = 26,4 \text{ mA}$ bei $U = 10 \text{ V}$ und bleibt auch bei $U = 15 \text{ V}$

mit $I = 26,6\text{mA}$ nahezu konstant. Die Lautstärke ändert sich kaum mit der Betriebsspannung. Das IC wird ein wenig warm.

Erklärung:

Mit zunehmender Ausgangsleistung werden die Signale nicht stärker verzerrt, da das IC über einen großen Bereich wie ein idealer Verstärker arbeitet. Der Ruhestrom ist im Vergleich zum Verstärker mit einem OP recht hoch, bleibt aber über einen großen Versorgungsspannungsbereich nahezu konstant. Daher wird das IC leicht warm. Außerdem ändert sich der Verstärkungsfaktor des ICs mit steigender Betriebsspannung nicht, da er nur von der Eingangsbeschaltung beeinflusst wird. Um das Verhalten des Verstärkers gegenüber verschiedenen Eingangssignalen genauer zu testen, führt man folgenden Versuch durch.

Versuch 2:

Aufbau:

Man legt an den NF-Eingang des Verstärkers und an den Lautsprecherausgang jeweils einen Kanal eines Zweikanaloszillographen oder eines Picoscopes an. Dabei muss man darauf achten, dass beide Geräte eine gemeinsame Erde besitzen. Als NF-Quelle dient ein Funktionsgenerator, der einen Sinuston, einen Rechteckton und einen Dreieckton abgeben kann.

Durchführung:

Zunächst benutzt man einen Sinuston. Der Funktionsgenerator wird bei voller Lautstärke des Verstärkers auf ungefähr $U_E = 40\text{ mV}$ eingeregelt. Dann liest man am Oszillographen die Eingangsspannung und die Ausgangsspannung ab. Alternativ kann man sie auch mit einem Picoscope aufzeichnen. Man schaltet den Funktionsgenerator auf Dreieck- und Rechteckspannung um.

Beobachtung:

Man erhält die Kurven in Abb. 3.

Auswertung:

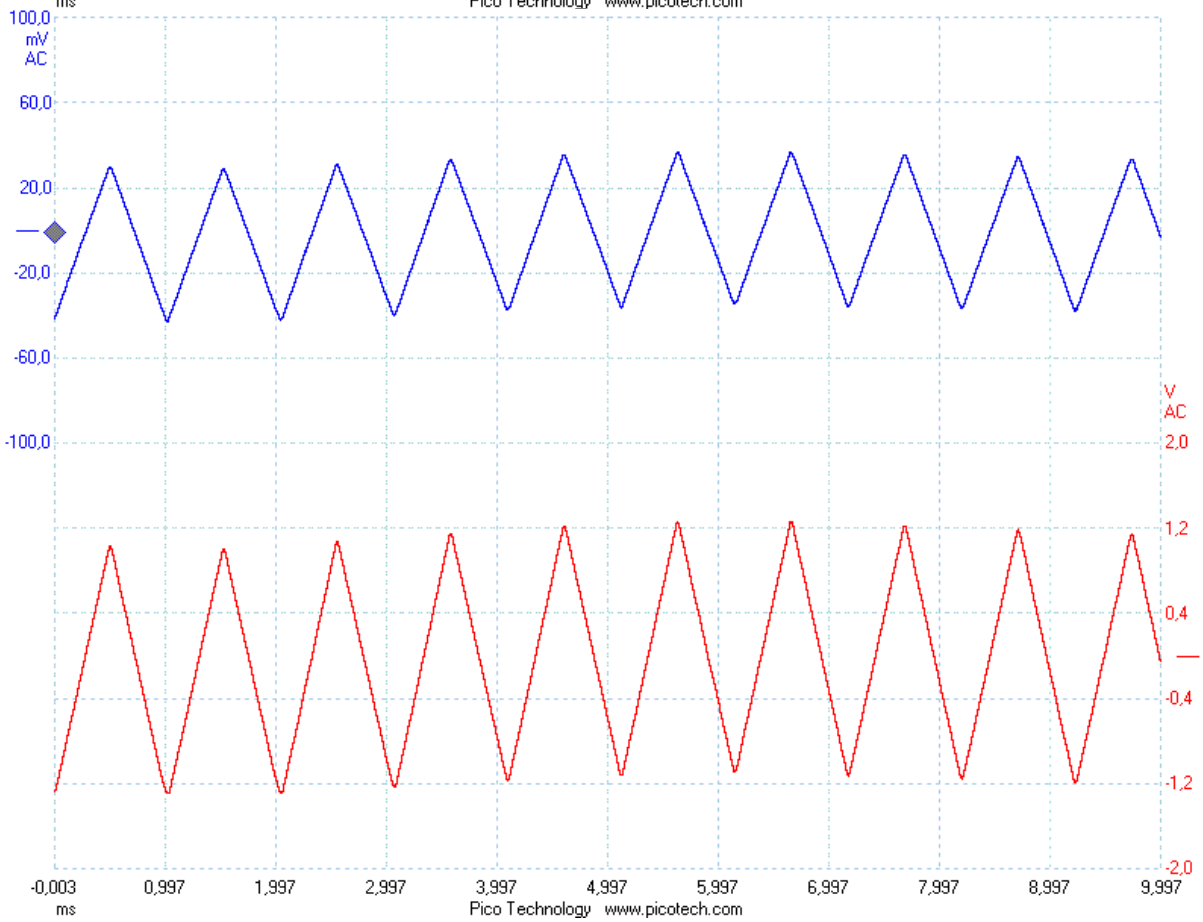
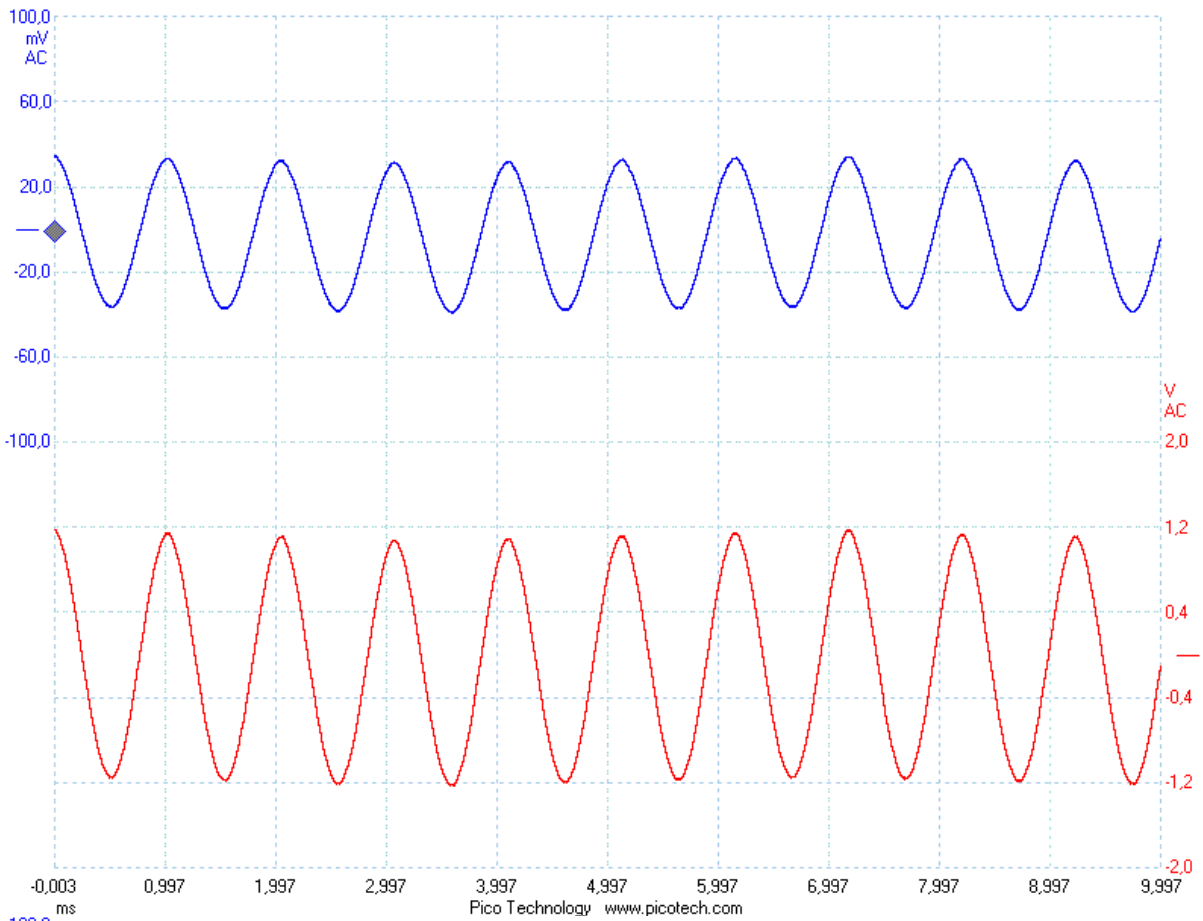
Aus der Kurve 3c erhält man mit einer Eingangsspannung $U_E = 35\text{ mV}$ und einer Ausgangsspannung $U_A = 1,2\text{ V}$ einen maximalen Verstärkungsfaktor von

$$z = \frac{1,2\text{ V}}{35\text{ mV}} = 34.$$

Die Ausgangssignale sind bei allen Spannungsformen nicht verzerrt und symmetrisch zur Nulllinie. Erhöht man die Eingangsspannung auf ca. $U_E = 120\text{mV}$, so steigt die Ausgangsspannung entsprechend an, ohne verzerrt zu werden. Das gilt für alle drei Signalformen. Der OP arbeitet wie ein idealer Verstärker. Aufgrund der Eingangsbeschaltung müsste er einen Verstärkungsfaktor z aufweisen, für den gilt:

$$z = \frac{150\text{k}\Omega}{4,7\text{k}\Omega} = 32$$

was fast genau dem gemessenen Wert entspricht.



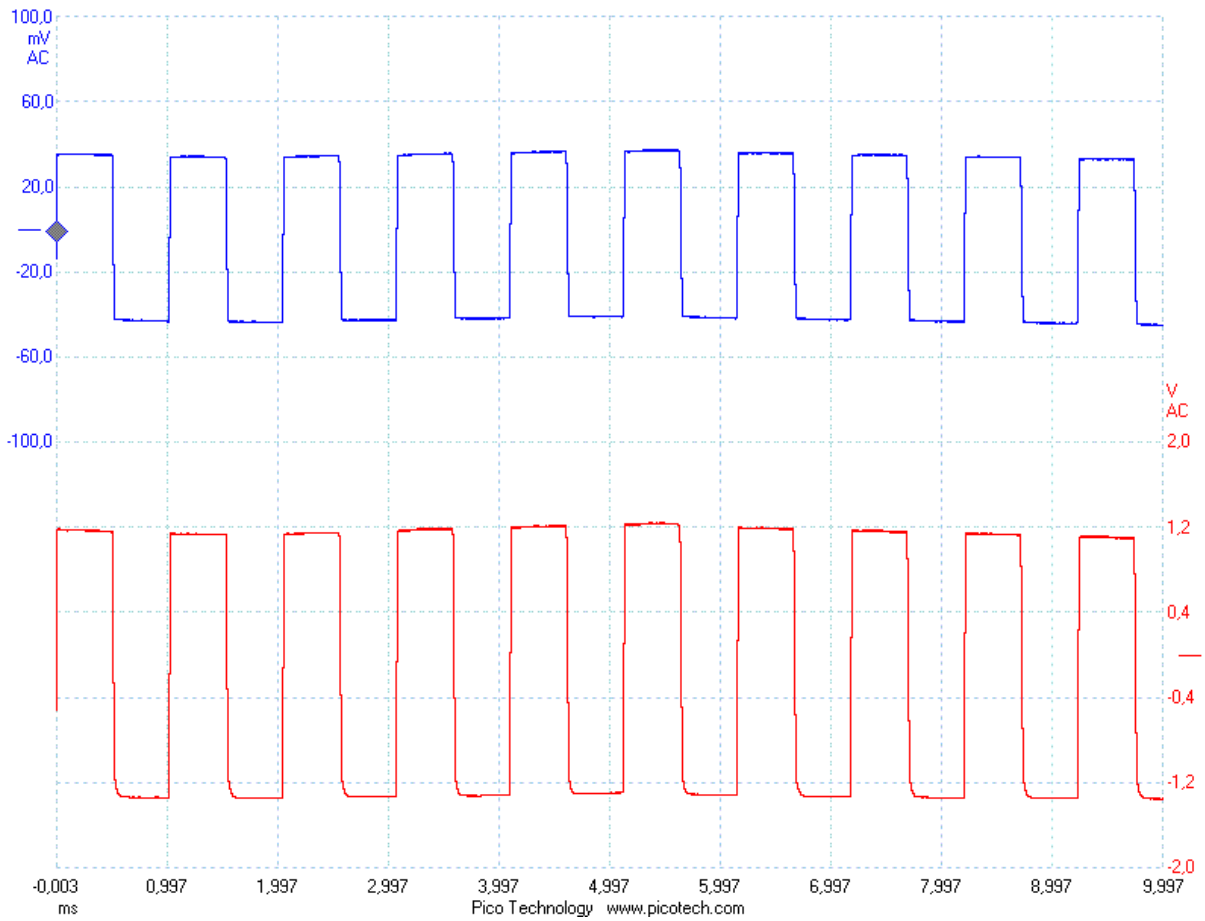


Abb. 3a-c: Signale bei voller Lautstärke