

# OpAmps für Anfänger

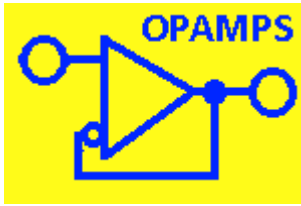
Dieses Papier erklärt für Anfänger anhand von praktischen Schaltungen, wie Operationsverstärker funktionieren und wozu man sie sinnvoll benutzen kann.

## Inhaltsverzeichnis

Spannungsversorgung von Operationsverstärkern.....	2
Grenzen der Linearität von OpAmps bei 5 V Versorgung.....	3
Die Eingangsstufen von Operationsverstärkern.....	5
Die Eingangsstufe des 741.....	5
Die Eingangsstufe des LM324.....	5
Die Eingangsstufe des CA3140.....	6
Fazit Eingangsstufen.....	6
Spannungsfollower mit Operationsverstärkern.....	7
OpAmps als Gleichspannungsverstärker.....	9
OpAmps als Wechselspannungsverstärker.....	11
OpAmp-Oszillator mit invertierendem Verstärker.....	13
Asymmetrische OpAmp-Versorgung mit künstlicher Mitte.....	16
Netzteil für OpAmp-Versuche.....	17
Netzteil für Lautsprecherverstärker.....	17
Der Lautsprecherverstärker.....	18

Alle Zeichnungen zu diesen Seiten gibt es [hier](#), alle Rechentabellen [hier](#), natürlich im Libre-Office-Format.

Alles in einem PDF: [hier, im PDF-Format, 18 Seiten, 638 kB](#)



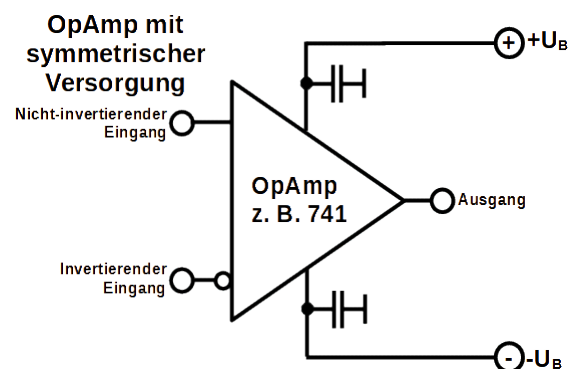
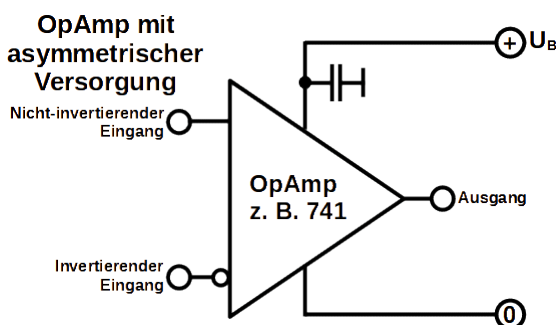
# Spannungsversorgung von Operationsverstärkern

Operationsverstärker sind elektronische Bauteile mit ganz vielen Transistoren, Dioden, Widerständen und Kondensatoren. Zum Funktionieren brauchen sie etwas Strom. Nicht so viel wie eine Waschmaschine, aber ganz bisschen wenig: ein paar Milliampere Gleichstrom.

Zu diesem Behuf haben ihre IC-Packungen zwei Beine, die meist als V+ und V- bezeichnet werden. Man ahnt es schon: da kommen die beiden Pole der Batterie dran. Aber richtig herum, denn falsch angeschlossene Batterien führen zu einem sehr schnellen Tod des ICs: es wird ganz heiß und stirbt den Hitzetod.

Wieviel Spannung darf es denn sein? Das erfahren wir auf jeden Fall aus dem Datenblatt. Dazu suchen wir im Internet nach "741", oder wie auch immer unser OpAmp-Teil heißt, und "datasheet". Das bringt uns erstmal zu den Webseiten ganz vieler Elektronikhändler, die nun meinen, sie seien gemeint. Sind sie aber gar nicht.

In dem echten Datasheet stehen meist zwei Spannungen: die eine unter "Absolute maximum ratings" sagt uns, ab wann die Voltage das IC kaputt zu machen droht. Manchmal findet man in einem anderen Kapitel des Datasheets auch die "Minimum operating voltage", aber meistens gar nix dazu, ab wann denn das Teil echt zu funktionieren beginnen tut. Meistens ist das Minimum z. B. 5 V.



Und die Maxima sind mit  $\pm 18$  oder  $\pm 20$  V ganz schön dicke dabei: die können dann immerhin 36 V Spannung an ihren beiden Klemmen vertragen, also auch bis zu vier hintereinander geschaltete 9V-Batterien. Das unterscheidet sie ganz erheblich von anderen ICs, die nur zwei 9V-Batterien (CMOS-Digital-ICs) oder nicht mal eine einzige vertragen (TTL-Digital-ICs), ohne davon kaputt zu gehen.

Wie immer im Leben gibt es gleich zwei Möglichkeiten, den Strom dem IC darzubringen. Links die klassische asymmetrische Versorgung, rechts die symmetrische Variante. Deshalb heißt es im Datasheet "2\*18 V": an V+ kommen auf jeden Fall +9 V. Bei der asymmetrischen Versorgung werden zwei Batterien hintereinandergeschaltet und der Minuspol der zweiten Batterie kommt an den V- Anschluss. Das IC arbeitet dann mit 18 V Betriebsspannung. Bei der symmetrischen Variante kommen beide Batterien ebenso hintereinander geschaltet an den Minus-Pol des ICs. Und was ist dann der Unterschied? Nun, eigentlich gar keiner, nur dass die Mitte zwischen beiden Batterien bei der

symmetrischen Variante in der Schaltung verwendet wird, bei der asymmetrischen Variante aber nicht. Die Folgen dieser Entscheidung werden wir später sehen.

Noch ein Hinweis zu dem Kondensator links bzw. den beiden Kondensatoren rechts. Operationsverstärker sind Bauteile, die am Ausgang zwei Transistoren haben: der eine zieht den Ausgang nach Plus, wenn es denn sein muss, der andere nach Minus. Es kann vorkommen, dass beide Transistoren für kurze Zeit leitend sind. Dann fließt für sehr kurze Zeit ein sehr hoher Strom durch das IC. Obwohl sich das schnell wieder gibt, wenn sich der Rest der Schaltung auf eine Ausgangsspannung geeinigt hat, kann dieser kurzzeitig hohe Strom empfindlich die Spannungsversorgung stören. Um so was abzufangen, braucht es den bzw. die Kondensatoren: sie überbrücken das kurzzeitige Spannungstief und sorgen dafür, dass sich die erzeugte Hochfrequenz nicht bis zur Batterie oder zum Netzteil ausbreitet. Schnelle ICs brauchen so was immer.

Die Funktion der beiden Eingänge werden wir später sehen.

## Grenzen der Linearität von OpAmps bei 5 V Versorgung

Wozu denn diese hohen Spannungen? Nun, wenn man hohe Ausgangsspannungen braucht und auch bei Wechsellastspitzen nicht an die Betriebsspannungsgrenze anstoßen will oder wenn man partout Eingangsspannungen von 20 V verarbeiten will, braucht man so was unbedingt.

Merke: Bei Operationsverstärkern darf die Betriebsspannung immer ein wenig höher sein als die maximal erwartete Ausgangsspannung und auch niedriger als die Eingangsspannung.

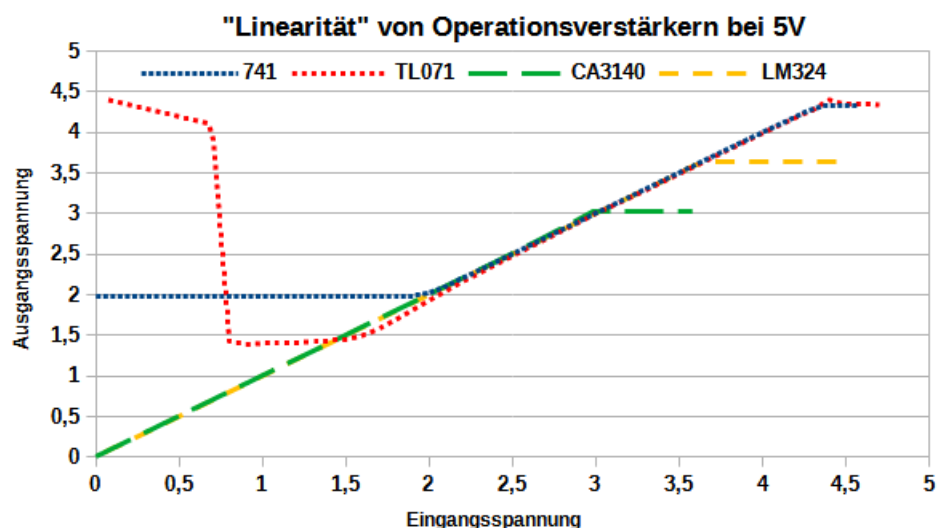
Das hier zeigt für vier verschiedene Operationsverstärker die Grenzen auf. Gezeigt

ist die Operationsverstärker-Ausgangsspannung, wenn man den Plus-Eingang auf Spannungen zwischen Null und 5 Volt legt, den invertierenden Eingang an den Ausgang legt (Verstärkung = Eins) und die Betriebsspannung asymmetrisch auf 5 Volt setzt.

Der Operationsverstärker TL071 (in rot) reagiert ganz verrückt auf Eingangsspannungen unter 0,7 V: er produziert Ausgangsspannungen von mehr als vier Volt. Darüber geht es erst mal steil abwärts und erst bei 2 V Eingangsspannung hat er seinen Linearitätsbereich erreicht und die Ausgangsspannung folgt nun ungefähr der Eingangsspannung.

Ganz ähnlich verhält sich der übliche 741-Operationsverstärker. Immerhin schwingt er unterhalb von 0,7 V nicht über, sondern bleibt stoisch bei 2 V Ausgangsspannung, bis er sich dann bequem linear zu folgen.

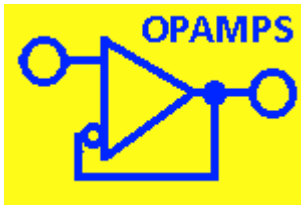
Oberhalb von 4,3 Volt erreicht dann bei beiden die Ausgangsstufen ihre Sättigung und die Spannung steigt nicht mehr weiter an. Hier sind sich 741 und TL071 ganz ähnlich.



Ein ganz anderes Verhalten zeigen der CA3140 und der LM324: unterhalb von ca. 3 Volt (beim LM324: 3,6 V) ist der Verlauf ganz linear, sogar bis herunter zu 0 Volt. Oberhalb von 3 bzw. 3,6 Volt macht die Ausgangsstufe den Abgang und bleibt einfach auf 3 bzw. 3,6 V stehen.

Das Diagramm macht deutlich, was mit OpAmps der vier Sorten geht und was nicht. Bei 5 V Betriebsspannung nimmt man einen CA3140 oder LM324, wenn man niedrige Eingangsspannungen verarbeiten will. Mit einem 741 oder einem TL071 kann man alles verarbeiten was oberhalb von 2 V liegt, aber nicht die oberen 0,7 V bis zur Betriebsspannung.

Das hier waren nur die vier ganz üblichen Operationsverstärker. Es gibt auch sehr spezielle, deren Kennlinie noch ganz anders ist. Ein Blick in das Datenblatt oder ein schneller Aufbau einer Testschaltung bringt dazu näheren Aufschluss.



# Die Eingangsstufen von Operationsverstärkern

Um die sehr unterschiedlichen Kennlinien von Operationsverstärkern zu verstehen, wie sie im Dokument vorgestellt wurden, muss man ein wenig in die Untiefen des Schaltungsdesigns von Operationsverstärkern begeben.

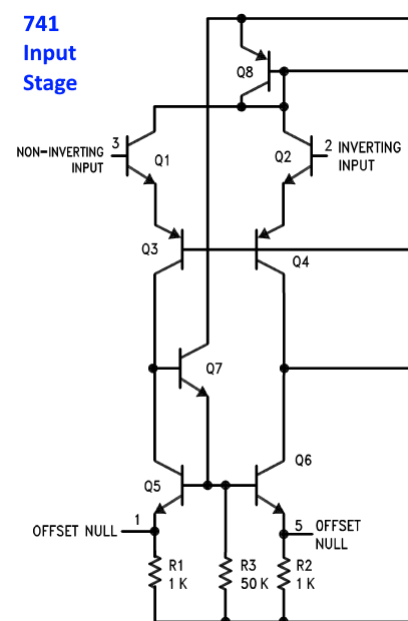
## Die Eingangsstufe des 741

Das sind die Eingangs-Innereien eines 741. Wie man sieht, bestehen die beiden Eingänge aus den NPN-Transistoren Q1 und Q2. Diese haben an den Emittoren die beiden PNP-Transistoren Q3 und Q4, deren Kollektoren wiederum auf den NPN-Transistoren Q5 und Q6 liegen.

Mit dieser Staffel ist klar, warum sich an den Eingängen des 741 so rein gar nichts tut, wenn er nicht mindestens +2 V kriegt: diese ganze Staffage von Transistoren gegen Masse braucht halt drei mal die Durchgangsspannung der BE-Strecke.

Die Schaltung zeigt auch, dass die beiden Eingangstransistoren in einer Brückenschaltung arbeiten: ist die Spannung an einem Ende des Eingangs größer als an dem anderen Ende, kippt die Brücke auf diese Seite, wenn nicht, kippt sie auf die andere Seite. Nur wenn beide Spannungen exakt gleich sind, ist die Brücke echt im Gleichgewicht.

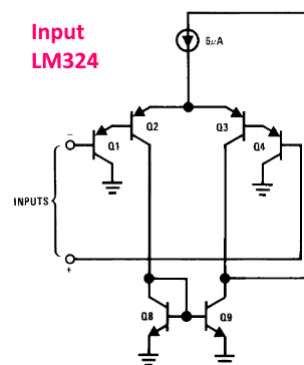
Die beiden Transistoren Q5 und Q6 gleichen kleine Unterschiede zwischen beiden Eingangstransistoren aus, wenn man mit einem Poti an den Offset-Eingängen die Brücke ein wenig derangiert.



## Die Eingangsstufe des LM324

Wie macht es der LM324, schon bei Null Volt Eingangsspannung zu funktionieren? Nun, wie man sieht hat er an seinen Eingängen je zwei PNP-Transistoren (Q1/Q2 und Q3/Q4), die brückenmäßig von einer Konstantstrom-Quelle mit 6  $\mu$ A von der positiven Betriebsspannung aus im Gleichgewicht gehalten werden. Daher kann man mit der Eingangsspannung bis herunter auf Null Volt und sogar negative Eingangsspannungen sind möglich.

Auch hier wieder die Brücke, die schon bei geringsten Spannungsunterschieden kippt. Wie man an dem Strom der Eingangsbrücke sieht, braucht der PNP-Eingangstransistor nur Nano-Ampere, um die Brücke zu verstellen. Entsprechend hoch ist der Eingangswiderstand der Schaltung (10 nA entspricht einem Ein-



gangswiderstand von  $R_i = 10 \text{ V} / 10 \text{ nA} = 1 \text{ M}\Omega$ ). Aber es geht noch mehr, nämlich mit FETs in der Eingangsstufe (siehe CA3140).

## Die Eingangsstufe des CA3140

Das ist die Eingangsstufe des CA3140 mit den beiden Feldeffekttransistoren Q9 und Q10 am Eingang. Die Sourcen werden mit den beiden NPN-Transistoren Q11 und Q12 in der Balance verstellt, wenn an den beiden Offset-Null-Eingängen eine schräge Spannung anliegt.

Da Feldeffekttransistoren auch mit negativen Gate-Spannungen gegenüber dem Source-Anschluss noch korrekt arbeiten, macht es der Schaltung nix aus, wenn sie mit 0 V oder sogar mit negativen Spannungen angesteuert wird. Das Schönste an der Schaltung aber ist, dass Feldeffekttransistoren mehrere Terra-Ohm Eingangswiderstand am Gate haben. Da fließt (bei Gleichspannung) rein gar nix, und auch bei 10 M $\Omega$  am Gate geht alles seinen geordneten Gang.

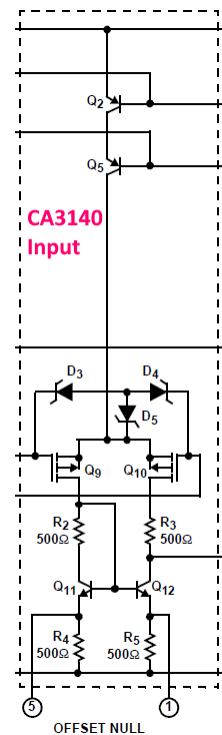
## Fazit Eingangsstufen

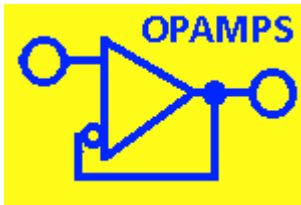
Der Einblick in die Eingangsstufen von Operationsverstärkern offenbart, warum sie so und nicht anders angesteuert werden wollen.

Es zeigt ferner, dass ihre erhebliche Empfindlichkeit mittels Brücken erreicht wird. Diese benötigen entweder nur sehr geringe oder auch gar keine Ströme (FET-Brücke), um die Eingangsstufen auszusteuern.

Der natürliche Zustand von Brücken in Operationsverstärkern ist ihre Ausgewogenheit: sie sind idealerweise immer gleich groß. Sind sie dies nicht, dann haben wir es mit einem Komparator zu tun, der nur darauf aus ist, festzustellen, ob die eine Eingangsspannung größer oder kleiner ist als die andere.

Und: das etwas krumme Verhalten von Eingangsstufen bei Operationsverstärkern lässt sich nur mit einem Blick in die Innereien dieser Bauelemente ganz verstehen.





## Spannungsfolger mit Operationsverstärkern

So, nun wird es aber Zeit für was Sinnvolles zum Basteln: der OpAmp kriegt Eingangsspannung und macht daraus eine Ausgangsspannung. Und das geht so.

Erst mal ohne viel Schnick-Schnack, nur um zu kapieren wie der OpAmp so tickt. Er kriegt an seinem nicht-invertierenden Eingang eine Spannung zwischen +9 und -9 Volt. Die kann man am Potentiometer einstellen. Der Ausgang ist an den invertierenden Eingang (ist am runden Kringel zu erkennen) rückgekoppelt.

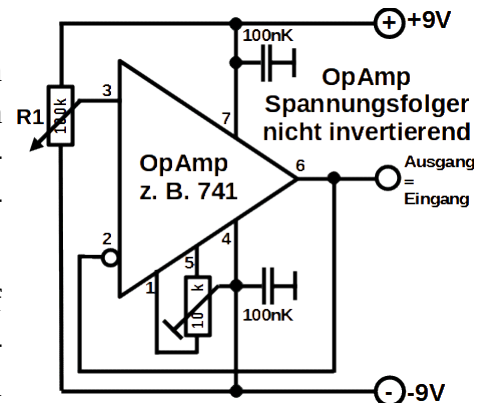
Das veranlasst den OpAmp dazu, seine Ausgangsspannung auf den gleichen Wert einzustellen, der an seinem nicht-invertierenden Eingang anliegt. Wäre die Spannung am invertierenden Eingang etwas niedriger, dann verstärkt der OpAmp diese Differenz vieltausendfach und bewegt seinen Ausgang in Richtung auf Plus. Das mindert die Differenz. Solange, bis beide Eingangsspannungen wieder gleich groß sind, dann ist die Eingangsbrücke genau ausbalanciert.

Umgekehrt: wenn die Spannung am invertierenden Eingang ein wenig höher wäre, würde diese Differenz hoch verstärkt und der Ausgang ginge in Richtung Minus. Erst wenn der Ausgang genau die gleiche Spannung erzeugt und an den invertierenden Eingang zurücktransportiert wie an seinem nicht-invertierenden Eingang anliegt, geschieht nix mehr weiter. Die Brücken sind dann ausgeglichen, ihre Spannungen und Ströme sind beiderseits gleich groß. Das bedeutet, der Ausgang folgt exakt der Spannung am Eingang. Auch wenn wir mit dem Poti ein andere Spannung einstellen: der Ausgang folgt nach wenigen Mikrosekunden exakt wieder dieser Eingangsspannung.

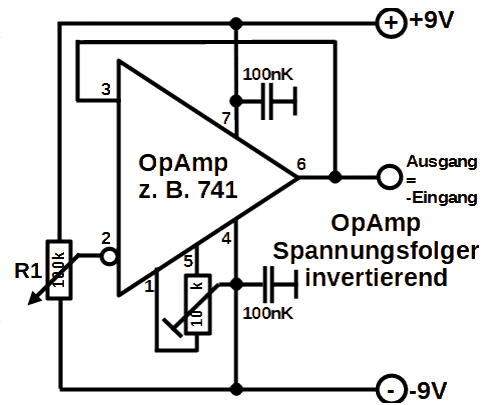
Aber wozu das alles, die Spannung am Eingang kann doch auch so wie sie ist verwendet werden? Nun, das Poti ist recht hochohmig und beim Anschließen einer LED würde die Spannung am Poti zusammenbrechen. Nicht so beim Anschließen an den OpAmp-Ausgang, der kann durchaus 10 mA LED-Strom vertragen.

Aber das hat, wie alles im Leben, so seine Grenzen. Stellen wir das Poti in die Nähe von +9V, also an sein oberes Ende, dann will der OpAmp das nicht: er folgt dann mitnichten dem Eingangssignal sondern macht da was ganz Eigenes. Auch am unteren Ende gibt es einen Bereich, den der Ausgangstransistor im OpAmp so gar nicht mitmachen will. Merke: halte Dich von den Grenzen fern, sonst kriegste irgendwas, aber nichts Sinnvolles.

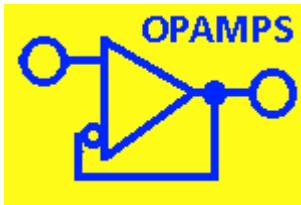
Aber: Null ist nicht genau Null. Wenn das Poti auf 0,000 V eingestellt wird, kann die Ausgangsspannung um einige Millivolt davon abweichen. Das geht auf das Konto der beiden Eingangstransistoren. Die sind nicht ganz identisch. In die Schaltung wurde daher auch noch ein Trimpoti eingeschmuggelt, mit dem dieser Unterschied kompensiert werden kann. Die beiden Pins 1 und 5 heißen Offset-Null. Wer es also ganz genau braucht, stellt den Trimmer einmalig ein. Mit dem wird die Brückenmitte ein wenig verstellt, was die Transistorbrücke am Eingang in Balance bringt.



Damit keine Langeweile aufkommt: der OpAmp kann noch viel mehr. Durch Vertauschen der beiden Eingänge kriegen wir einen invertierenden Spannungsfolger. Stellen wir am Poti +1V am invertierenden Eingang ein, geht der Ausgang auf Minus 1V, damit die Differenz zwischen invertierendem und nicht-invertierendem Eingang wieder Null wird. Der OpAmp dreht also die Eingangsspannung um, er invertiert sie, aus Plus wird Minus, und aus rot wird schwarz, wie der Elektroniker sagen würde.







# OpAmps als Gleichspannungsverstärker

Steckt man einen Eisennagel und einen Kupfernagel in eine Zitrone, kriegt man eine Zitronenbatterie: die beiden Nägel produzieren eine Spannung. Aber: nun nicht gleich einen Sack Zitronen einkaufen, um die gesamte Hausversorgung an Strom auf Bio-Zitronen umzustellen: schon wenn man ein paar wenige Milliampere aus der Zitrone quetschen will, geht die Spannung an der Zitrone in die Knie.

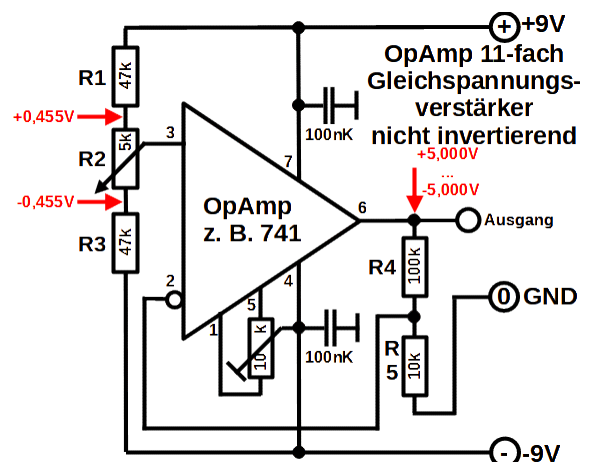
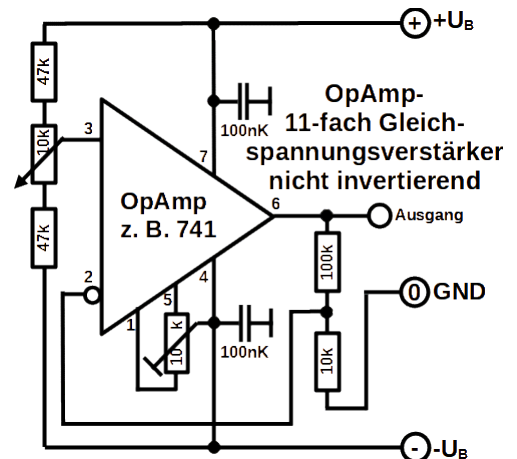
Um die empfindliche Spannung an der Zitronenbatterie genau zu messen, braucht man ein hochohmiges Messgerät. Und genau das kann so ein Operationsverstärker ganz prima: hoher Eingangswiderstand, niedriger Ausgangswiderstand.

Und er kann sogar noch mehr: aus den 0,x Volt an Spannung aus der Zitronenbatterie kann er mal eben elf mal so viel machen. Aus den +0,455 V der Zitronenbatterie werden mit dieser Schaltung mal eben 5 V, die sich auch durch ein grobes Schätzzeisen (so hießen die analogen Drehspulinstrumente früher) noch bequem messen lassen.

Der Trick mit der Verstärkung des OpAmp funktioniert folgendermaßen: man teilt die Ausgangsspannung mit einem Teiler aus zwei Widerständen, hier mit den 100k und den 10k, und führt nur die geteilte Spannung an den invertierenden Eingang zurück. Um nun wieder Balance in der Eingangsbrücke zu kriegen, muss der OpAmp elf mal so viel Ausgangsspannung produzieren, damit die geteilte Spannung 0,455 V groß wird.

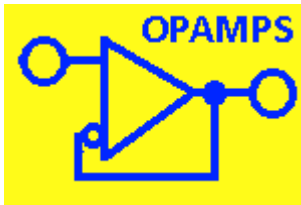
Das hier sind die Spannungen, die die Schaltung produziert:

1. Die zwei 47k-Widerstände bewirken, dass am Potentiometer mit 5k Spannungen zwischen Plus 0,455 und Minus 0,455 Volte eingestellt werden können. Im Messeinsatz wird an Pin 3 der Kupfernagel angeschlossen, der Eisennagel an den Null-Volt- oder GND-Anschluss.
2. Die produzierte Ausgangsspannung des Operationsverstärkers wird mit 100k und 10k geteilt, das  $10 / (100 + 10)$  - fache der Ausgangsspannung (entspricht Abschwächung auf das 0,09091-fache) wird an den invertierenden Eingang an Pin 2 zurückgeführt.



Um genau 10 an Verstärkung zu kriegen, müssten wir den 10k-Widerstand etwas anders dimensionieren:  $(100 + x) / x = 10$  kriegt man durch Umformen über  $100 + x = 10 * x$  und  $100 = 9 * x$  zu  $100 / 9 = 11,11 \text{ k}\Omega$ . Da es das rein gar nicht zu kaufen gibt, kommt ein  $10\text{k}\Omega$ , ein  $1\text{k}\Omega$ , ein  $100\Omega$  und ein  $10\Omega$  zum Einsatz.

Und fertig ist ein 10-fach-Instrumentenverstärker, mit dem man  $\pm 0,5\text{V}$  auf  $\pm 5\text{V}$  verstärken kann. Und der die Zitronenbatterie auch praktisch gar nicht belastet. Und bei dem Null wirklich  $0,000\text{V}$  ist, weil wir den  $10\text{k}$ -Trimmer genau eingestellt haben.



# OpAmps als Wechsellspannungsverstärker

Dass man Gleichspannungen verstärken muss, kommt heutzutage noch relativ selten vor, häufiger hat man es in der Elektronik mit Wechsellspannungen zu tun. Sei es, wir müssten ein dynamisches Mikrofon mit 5 mV auf 1 V verstärken oder die sehr schwachen Signale an einer Antenne von Mikrovolt um das Millionenfache erhöhen. Auch das geht mit Operationsverstärkern ganz prima.

Das hier wäre so ein Mikrofonverstärker, der die 5mV-Signale eines dynamischen Mikrofons kräftigt um das 1000-fache verstärkt.

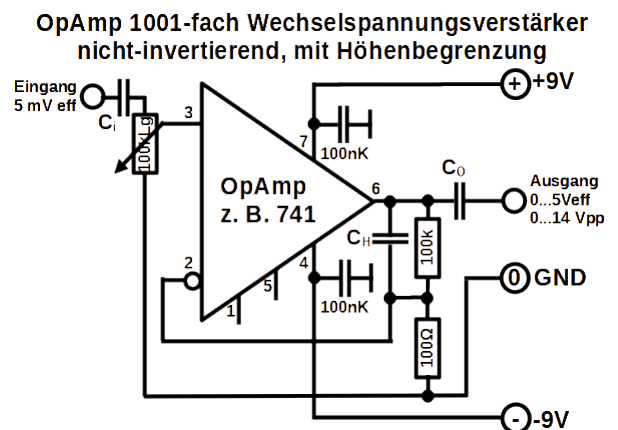
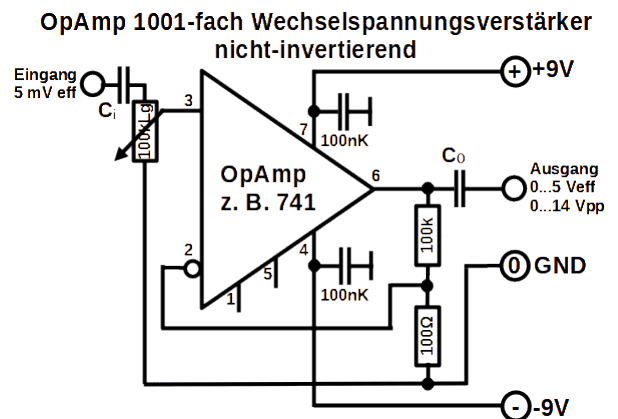
Das sieht ganz ähnlich aus, wie die Schaltung, die wir für den Gleichspannungsverstärker kennen. Nur brauchen wir einen Lautstärkeregelner für die Aussteuerung des Mikrofons, für den wir ein Potentiometer mit 100k und einer logarithmischen Kennlinie einsetzen. Das Wechsellspannungssignal wird mit einem Kondensator eingekoppelt, aber wir könnten den auch weglassen.

Um eine Verstärkung von 1001-fach zu kriegen, koppeln wir nur ein Tausendstel der Ausgangsspannung auf den invertierenden Eingang zurück. Keine Angst, die Verstärkung von Operationsverstärkern ist ungebremst noch viel höher: schon drei Transistorbrücken mit je 150-facher Verstärkung machen gigantische  $150 * 150 * 150 = 3,375$  Mio. an Verstärkung.

Aber jetzt nicht glauben, damit könnte man ein Megafon bauen: was über  $C_0$  an Wechsellspannung rausgeht, kann man noch nicht verwenden, um einen Lautsprecher anzutreiben. Dazu ist der Strom eines Operationsverstärkers noch nicht kräftig genug, mit den 8 mA eines 741 kann man höchstens 40 mW aussteuern. Also etwas mickrig, das Ganze.

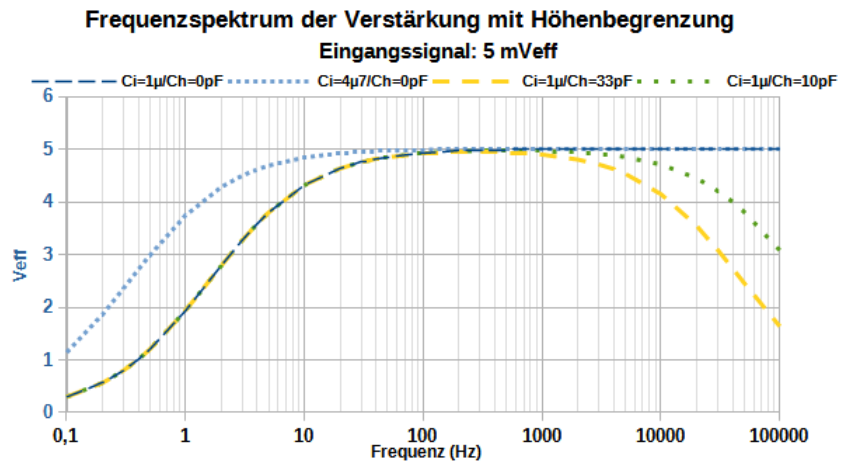
Dafür macht unser Verstärker alles mit, sogar hochfrequente Einstrahlungen. So ein Operationsverstärker kann einige MHz, und würde Kurzwellensender, die über das Mikrokabel einige Millivolt an HF einstreuen, ebenso mit dem 1001-fachen verstärken. Wer das nicht will, baut eine Höhenbegrenzung ein. Dazu braucht man nur einen kleinen Kondensator, der erhöhte Frequenzen stärker an den invertierenden Eingang rückkoppelt.

So hat man das übertragene Frequenzspektrum im Griff. Die blaue gestrichelte Linie ist das Frequenzspektrum mit einem Eingangskondensator  $C_i$  von

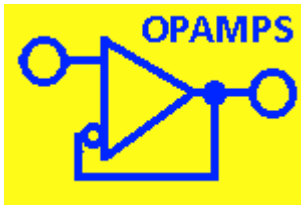


1 $\mu$ F. Die blaue gepunktete Linie zeigt, wie sich eine Erhöhung von  $C_i$  auf das Fünffache auswirken würde: das Frequenzspektrum unterhalb von 50 Hz würde weniger abgeschwächt.

Die gelbe gestrichelte Linie zeigt, dass das Spektrum ab 1.000 Hz und darüber mit einem 33pF-Kondensator als  $C_h$  stark abgesenkt wird. Kurzwellensender mit ein paar MHz haben da keine Chance mehr. Etwas geringer ist diese Abschwächung mit einem 10pf-Kondensator als  $C_h$ : die Abschwächung setzt etwas später ein und erreicht erst ab 100 kHz 3 dB (Abschwächung auf die Hälfte, grün gepunktet).



Der ganze Unterschied zwischen dieser Schaltung mit Höhenabsenkung zur Variante ohne Absenkung ist ein einziger Kondensator.

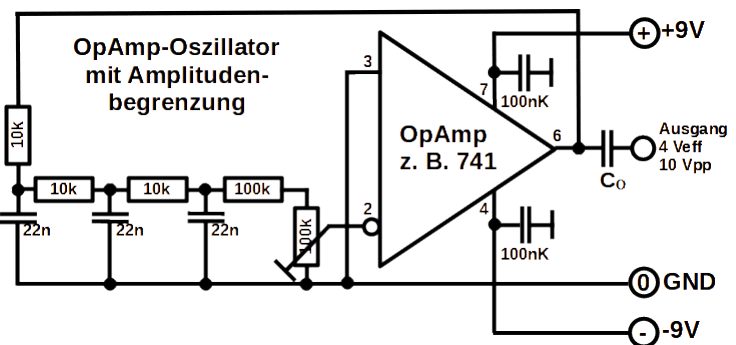


## OpAmp-Oszillator mit invertierendem Verstärker

Im vorherigen Beispiel arbeitete der OpAmp-Verstärker im nicht-invertierenden Modus, das heißt die Ausgangsspannung folgte linear der Eingangsspannung. Durch einfaches Vertauschen der beiden Eingänge kann man aber den OpAmp dazu bringen, ein invertiertes Ausgangssignal zu produzieren. Das Ausgangssignal wird dann negativ, wenn das Eingangssignal positiv ist, und umgekehrt.

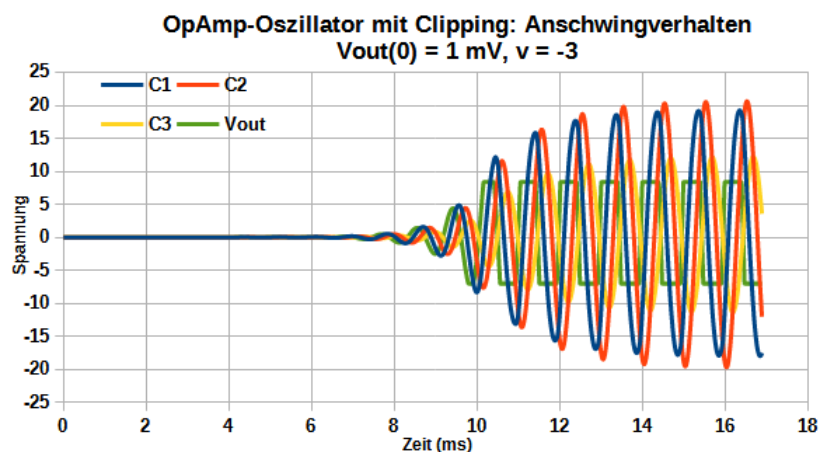
Invertierende Verstärker kann man hervorragend dazu bringen, zu schwingen. Koppelt man das invertierte Signal an den Eingang zurück, dann schwingt der OpAmp. Da er mehrere Mega-Hertz schnell ist, schwingt er dann eben auf Kurzwelle.

Um den OpAmp auf einer niedrigeren Frequenz (hier: so um die 1.000 Hz) schwingen zu lassen, müssen wir den Schwingvorgang etwas verlangsamen. Das macht in dieser Schaltung ein Dreifach-RC-Netzwerk. Durch die Lade- und Entladevorgänge der drei Widerstände und drei Kondensatoren kommt das rückgekoppelte Ausgangssignal vom OpAmp erst etwas später am invertierenden Eingang wieder an, der OpAmp schwingt dann weniger schnell.

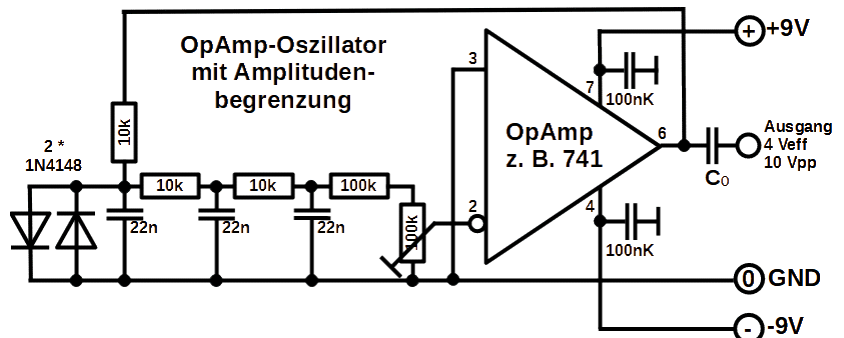


Ein bisschen kitschig ist bei dieser Schaltung die Einstellung der Verstärkung mit dem 100k-Trimmer: koppeln wir zu wenig vom Ausgang an den nicht-invertierenden OpAmp-Eingang zurück (wenig oder keine Verstärkung, Trimmereinstellung mit niedrigerem Widerstand), dann schwingt die Schaltung gar nicht. Die Verluste in den R und C des Netzwerks bewirken dann, dass der OpAmp rein gar nix macht. Erst, wenn die Verstärkung einen bestimmten Punkt überschreitet, setzen die Schwinungen ein. Da die Schaltung nach dem ersten Einschwingen etwas weniger Verstärkung braucht, müssten wir dann den Trimmer wieder auf etwas weniger Verstärkung stellen.

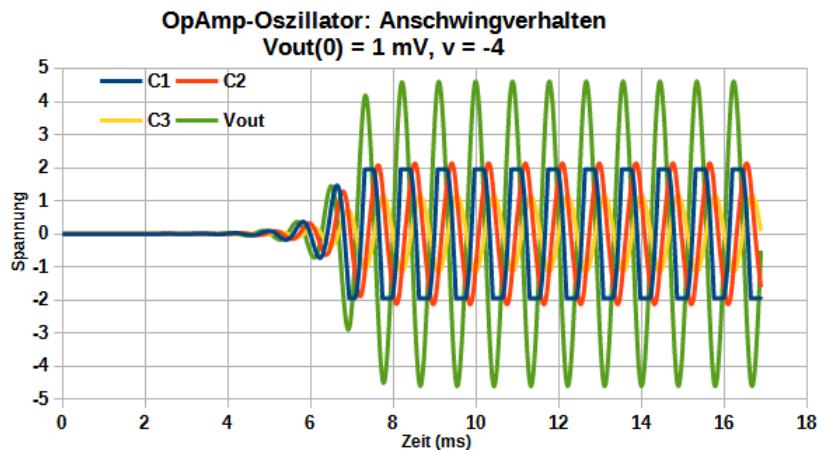
Machen wir das nicht, schaukelt sich die Schwingung auf die volle, vom OpAmp lieferbare Amplitude hoch. Das führt dann zu einem nahezu idealen Rechteck (grüne Kurve): nur an den Flanken bleibt das Signal vom RC noch etwas rund, die Spitzen werden vom OpAmp abgeschnitten (bei plus 8,35 V nach Plus und bei -7,0 V nach Minus).



Um das Überschwingen zu vermeiden, muss das Signal amplitudenbegrenzt werden. Am Besten fangen wir das mit dem ersten C an, indem wir dessen Amplitude mit zwei Dioden auf  $\pm 0,65\text{ V}$  limitieren. Dann werden auch die anderen RC-Kombinationen nicht umhin können, dem zu folgen. Jetzt können wir etwas mehr Verstärkung einstellen, z. B.  $v = -4,0$ , ohne dass die Schwingung am oberen und unteren Ende an den Clipping-Grenzen anstößt.



Hier sind zwei mal drei Dioden als Amplitudenbegrenzung eingefügt und eine Verstärkung von  $v = -4$  eingestellt. Man sieht, die Schaltung schwingt langsam an und erreicht nach ca. 8 Millisekunden ihren Normalzustand. Die Spannung am ersten Kondensator wird von den jeweils drei Dioden in beiden Richtungen auf knapp  $\pm 2$  Volt begrenzt und die beiden Kondensatoren

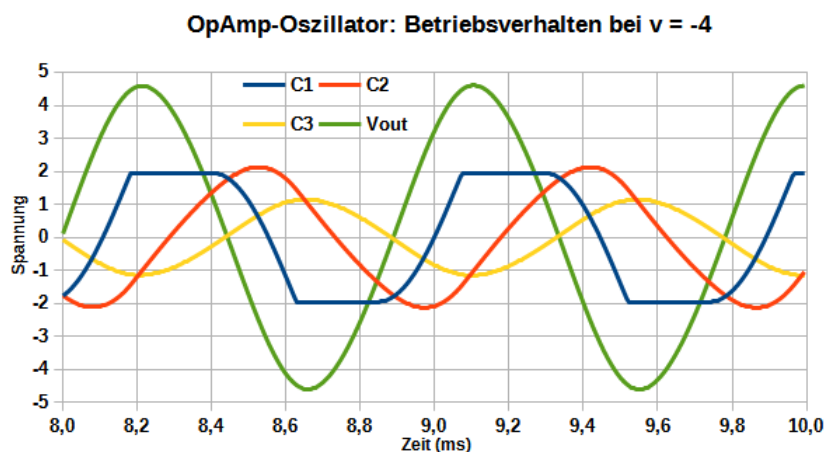


C2 und C3 halten sich auch daran. Der Ausgang des OpAmp schwingt jetzt mit  $\pm 4,5$  Volt, die beiden RCs 2 und 3 sorgen für einen sauberen Sinus, auch wenn C1 auf eckig begrenzt ist.

Die Frage ist, weshalb die Schaltung überhaupt anschwingt. Zu Beginn, wenn alle drei Kondensatoren entladen sind und der Operationsverstärker aus Null am dritten Kondensator Null an seinem Ausgang macht, tut sich rein gar nix: alles bleibt dann Null. In der Simulation hier habe ich als Anfangsbedingung ein einziges Millivolt auf den OpAmp-Ausgang gelegt, und das reicht schon, um aus Null ein ganz kleines bisschen zu machen und, siehe da, das reicht aus, um das Ganze langsam zum Schwingen zu bringen. Und ein Millivolt Schrott kriegt man beim Einschalten der Betriebsspannung immer hin, wenn nicht noch viel mehr. Nur Libre-Office-Rechensheets kennen exaktes Null, reale Bauelemente schon mal gar nicht.

Das hier zeigt im Detail, wie das Schwingen im Einzelnen vonstatten geht:

- Der OpAmp-Ausgang in grün lädt den ersten Kondensator über den Widerstand langsam auf (blaue Kurve). Überschreitet die Spannung an C1 die Dioden-Durchlassspannung von  $3 \cdot 0,65 = 1,95\text{ V}$ , be-



grenzen diese Dioden den weiteren Anstieg. Der Anstieg erfolgt etwas verzögert gegenüber dem Eingangssignal vom Ausgang des OpAmp.

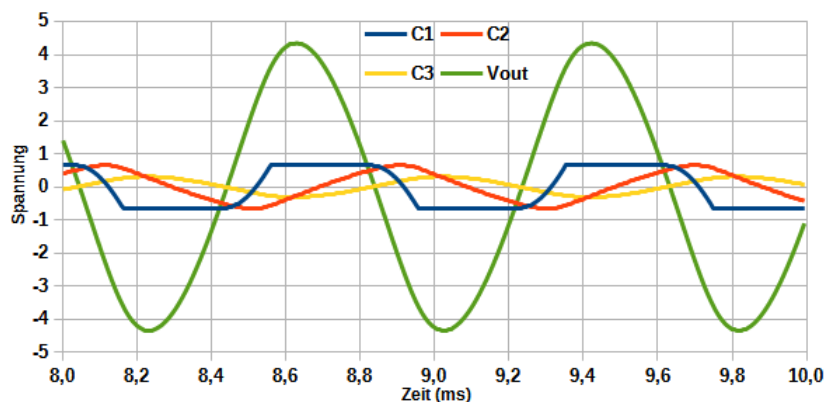
- Der Kondensator C1 lädt wiederum über den Widerstand den Kondensator C2 (rot) auf, ebenfalls ein wenig verzögert. Dessen Amplitude ist ebenfalls begrenzt, die rechteckige Abflachung an C1 ist hier aber schon nicht mehr zu sehen. (Nur wer ganz, ganz genau hinschaut, sieht, dass C2 noch ein ganz klein wenig wenig verkrümmt und asymmetrisch ist. Beim dritten RC gibt sich das auch.)
- Mehr noch: am C3 (gelbe Kurve) kommt jetzt ein sauberer Sinus an, aber ebenfalls gegenüber dem roten an C2 etwas verzögert.
- Die gelbe Kurve wird jetzt im Operationsverstärker mit dem Minus-4-fachen verstärkt und die grüne Kurve resultiert.

Die drei Verzögerungen durch RC1, RC2 und RC3 nennt der Elektroniker Phasenverschiebung, das Ganze daher auch "Phasenschieberszillator".

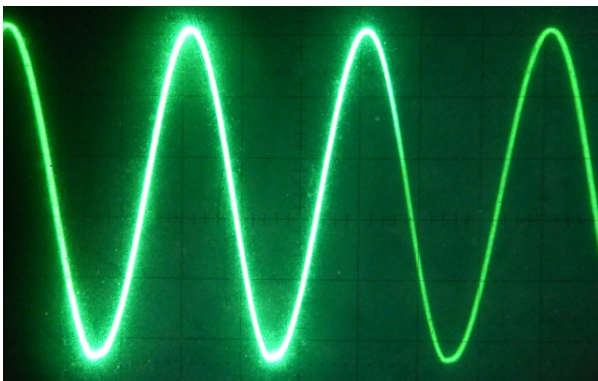
Die Frequenz, die sich hier einstellt, ergibt sich aus der Distanz der Nulldurchgänge, deren zwei jeweils etwa 0,85 ms auseinanderliegen. Genauer sind es 0,88 ms, was einer Frequenz von  $1.000 / 0,88 = 1.136$  Hz entspricht. Da  $f$  mit steigendem Widerstand und Kondensator um so niedriger wird, haben wir es mit  $f = k / R / C$  zu tun, wobei sich mit  $R = 10k$  und  $C = 22nF$   $k$  zu  $1.136 * 10.000 * 0,000.000.022 = 0,25$  ergibt. Damit kann man jetzt  $R$  und  $C$  für seine Lieblingsfrequenz ausrechnen, z. B. für den Kammerton A mit 440 Hz und einem  $C$  von 47 nF:  $R = k / f / C = 0,25 / 440 / 0,000.000.047 = 12$  k $\Omega$ .

Wer sich ein paar Dioden sparen will: es geht auch mit nur zwei Dioden wie im Schaltbild gemacht: hier mit zwei anti-parallel geschalteten Dioden und etwas höherer Verstärkung (minus 14). Produziert ebenfalls einen astreinen Sinus, auch wenn der Spannungsverlauf an C1 irgendwie nicht mehr viel von einem Sinus hat.

OpAmp-Oszillator: Betriebsverhalten bei  $v = -14$

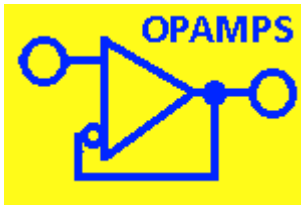


In Realität haben Dioden natürlich keine solche abrupte Kennlinie. Sie leiten auch schon bei 0,6 V etwas, was die Spannung an C1 etwas weniger eckig macht.



Und so sieht das Signal auf dem Oszi aus.

Viel Erfolg und Spaß beim Nachbau.



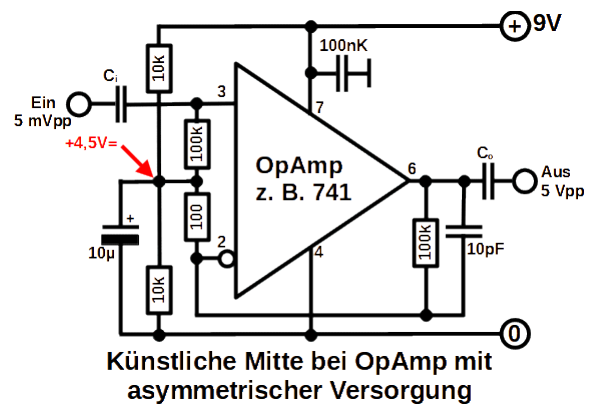
## Asymmetrische OpAmp-Versorgung mit künstlicher Mitte

Nicht immer gerne will man eine symmetrische Stromversorgung mit sich herum schleppen. Geht es nicht auch einfacher?

Jau, geht. Man teile die einfache Stromversorgung durch zwei (mit zwei gleich großen Widerständen) und schon hat man seine eine Betriebsspannung mit Mitten-Null.

Damit das Mitten-Null nicht von anderen Strömen gestört wird, kriegt es noch einen ordentlichen Kondensator auf Masse. Das unterdrückt jede kleinste Wechselfspannung, die auch noch so auf das Mitten-Null einwirken möchte.

Das ist so eine künstliche Mitte bei einem Mikrofonverstärker mit tausendfacher Verstärkung. Sie besteht aus den beiden 10k-Widerständen und dem 10 $\mu$ F-Elko gegen Masse. Die künstliche Mitte liegt jetzt bei der halben Betriebsspannung (9V), also auf +4,5 V. Damit ist nach der unteren Betriebsspannung von 0 V Platz für -2,5 V Ausschlag, nach oben (9,0 - 0,65) - 4,5 = 3,85 V. Amplituden von bis zu 5 V<sub>pp</sub> sind daher möglich, ohne dass der 741 an seine Grenzen stößt.

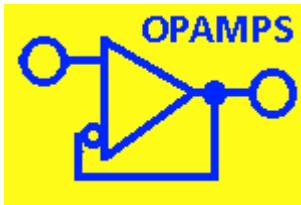


Künstliche Mitte bei OpAmp mit asymmetrischer Versorgung

Man beachte, dass sich nun sowohl die Eingangsspannung als auch der Ausgangsspannteiler immer auf dieses Mitten-Null beziehen müssen, damit der OpAmp korrekt funktioniert. Die Mikrofon-Eingangsspannung lenkt jetzt die Spannung an Eingang Pin 3 um +/-5 mV aus, also zwischen 4,503 und 4,495 V. Die Ausgangsspannung zwischen 6,0 und 2,0 V wird um das 1000-fache geteilt und ebenfalls auf die Mittenspannung aufgeprägt, so dass der OpAmp seine Eingangsbrücke ausgleichen kann.

Natürlich müssen wir die Mittenspannung nicht unbedingt auf die Spannungsmittle legen. Nämhen wir einen CA3140 oder einen TL071, wäre das sogar sehr ungünstig, da die im oberen Spannungsdrittel der Versorgungsspannung schlapp machen würden (siehe Dokument über Eingangsschaltungen von OpAmps [hier](#)). Hier läge die "Mitte" besser bei 5 V Betriebsspannung irgendwo um die 2 Volt, bei 9 V so um die 3,5 V. Können wir alles per Widerstandsverhältnis auch so einstellen. Bis wir das IC wechseln, dann stimmt alles gar nicht mehr und wir können wieder von vorn anfangen.



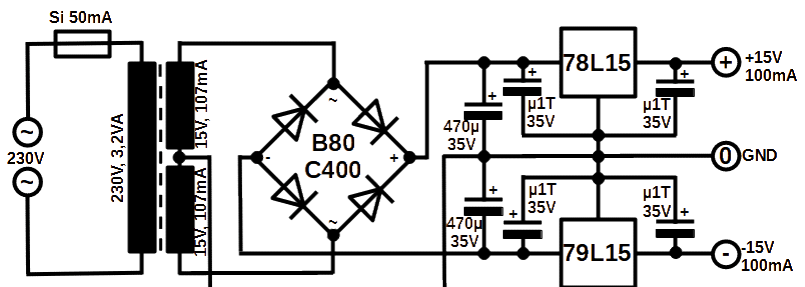


## Netzteil für OpAmp-Versuche

Hier noch ein paar Anmerkungen zu Netzteilen für diejenigen, die keinen Dauervorrat an 9V-Batterien anlegen wollen.

Wer nichts anderes Großartiges aus dem Netzteil versorgen möchte und nur ein paar OpAmp-Experimente ohne Batterie machen möchte, ist mit diesem hier gut bedient.

Die Gleichrichterbrücke macht aus den beiden getrennten Teilspulen des Trafos sowohl die +15V als auch die -15V. Beide werden mit 470  $\mu$ F geglättet und speisen in zwei komplementäre Spannungsregler ein. Die vier Tantal-Elkos sind nötig, damit die Spannungsregler nicht herumtorkeln.



Die Mitte stammt direkt von der Mitte der beiden beiden Trafowicklungen ab. Es spielt aber auch keine Rolle, wo die herkommt oder ob beide Spannungsregler exakt die gleiche Spannung absondern: sie ist fürderhin immer die Referenz und ihre exakte Höhe gar nicht ausschlaggebend.

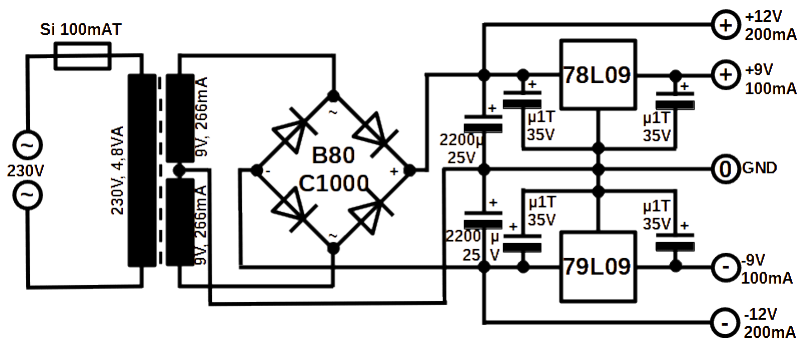
## Netzteil für Lautsprecherverstärker

Nehmen wir nun mal an, wir wollten mit dem Mikrofon einen Lautsprecher mit einer Impedanz von 8  $\Omega$  mit zwei Watt Leistung betreiben. Dann bräuchten wir dafür mit  $P = U * I$  und  $I = U / R$  dafür  $U = \sqrt{(P * R)} = \sqrt{(2 * 8)} = 4 \text{ V}$ .

Nun zum Strom. Mit  $P = U * I$  und  $U = I * R$  kommen wir zum Strom: Mit  $P = I^2 * R$  kriegen wir den Strom zu  $I = \sqrt{(P / R)} = \sqrt{(2 / 8)} = 0,4 \text{ A}$ . Das ist etwas viel mehr als so ein Operationsverstärker liefern kann und wir brauchen ein paar zusätzliche Transistörchen.

Da wir nur 4  $V_{\text{eff}}$  brauchen, sind wir mit  $U_{\text{pp}} = U_{\text{eff}} * 2 * \sqrt{2} = 16 \text{ V}_{\text{pp}}$  dabei, können also einen 2\*9V-Trafo mit 4,8 VA nehmen.

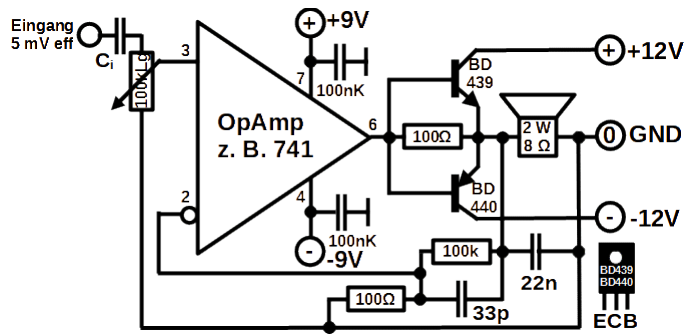
Das wäre nun das Netzteil. Es liefert unregelte +/-12 V für die Transistorstufe und geregelte +/- 9 V für den OpAmp.



# Der Lautsprecherverstärker

Nachdem wir nun das Netzteil dafür haben, muss unbedingt noch der Verstärker dafür her.

Das ist schon alles. Den 1000-fach Mikrofonverstärker kennen wir schon. Neu ist nur die Ankopplung der beiden Leistungstransistoren an den OpAmp. Beide werden direkt vom Ausgang angetrieben und lenken die Lautsprechermembran entweder nach Plus hin (oberer Transistor) oder nach Minus hin (unterer Transistor) aus.



Auch den 33pF-Kondensator kennen wir schon: er sorgt für eine Höhenabsenkung ab 10 kHz aufwärts. Dadurch dass wir die Rückkopplung nicht an den OpAmp-Ausgang sondern an den Lautsprecher gelegt haben, sorgt der OpAmp für eine exakte Spannung am Lautsprecher. Man beachte auch, dass der Lautsprecher keinen Elko braucht, denn er hängt direkt an den beiden Emittoren und der Mittenspannung.