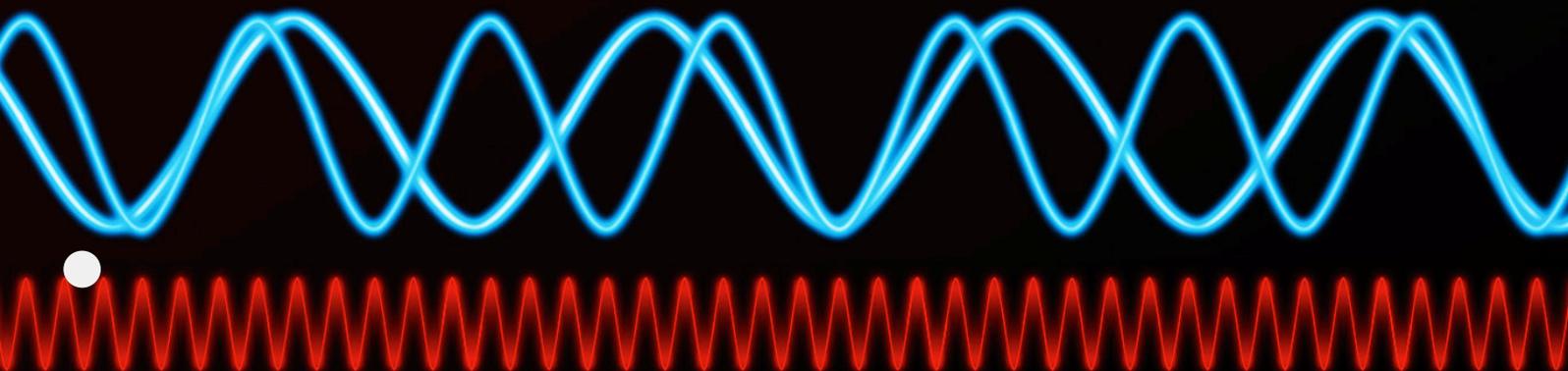


Referenz-Sinusgenerator



Wie lässt sich ein Sinusgenerator mit wenigen Bauteilen und noch weniger Verzerrungen realisieren? Wie immer gehen wir das Ganze praktisch an, mit vielen Experimenten. Unser Lohn ist ein State-variable-Oszillator mit einer Verzerrung von weit unter 0,001 %.

Zum Messen, Kalibrieren und Testen von Audio-/Mess-Geräten ist ein Testoszillator unabdingbar, der in der Lage ist, ein möglichst sauberes und verzerrungsarmes Sinussignal (von beispielsweise 1 kHz) zu erzeugen. Es liegt auf der Hand, in unseren modernen Zeiten die Soundkarte des Computers als Sinusgenerator einzusetzen. Zusammen mit einem der zahlreichen kostenlosen Programmen ist es ja einfach, dem DAC der Soundkarte ein definiertes Sinussignal zu entlocken. Schaut man aber auf die Spezifikationen der Soundkarte, so fallen die angegebenen Verzerrungswerte negativ auf. Auch, wenn es sich um eine teure Soundkarte mit einer Auflösung von 24 bit oder sogar eine externe Soundkarte am USB handelt, liegen die Gesamtverzerrungen (THD) zwischen 0,01% (-80 dB) und 0,003% (-90 dB). Der THD-Wert gibt das Verhältnis zwischen der Spannung eines Sinussignals (des Grundtons) und den Störkomponenten an. Dabei kann es sich unter anderem um Harmonische, Rauschen, nicht-harmonisches Pfeifen und Piepen handeln. In der Praxis wird das Audiosignal am Ausgang der Soundkarte zudem von Störprodukten innerhalb

der Audio-Bandbreite verseucht. Auf jeden Fall waren meine Hobby-PCs (ein Desktop und zwei alte Laptops) nicht geeignet, um ein brauchbares Signal zu liefern.

Wenig Bauteile, niedrige Verzerrungen

Sollte es möglich sein, mit wenigen Bauteilen einen Sinusgenerator zu konstruieren, der bessere Resultate liefert, mit Verzerrungswerten von 0,001% (-100 dB) und besser? Ein Sinussignal mit einer derart niedrigen Verzerrung wäre eine brauchbare Referenz für die Audio-Messungen, die mir vorschwebten. Da es bestimmt viele Elektor-Leser gibt, die mit Anlogschaltungen gerne experimentieren, möchte ich ein wenig auf die Probleme eingehen, die mir auf dem Weg zu einem brauchbaren Entwurf begegneten. Denn es ist immer noch interessant, ganz ohne Firmware und Mikrocontroller, nur mit ein paar konventionellen Bauteilen ein sehr brauchbares Ergebnis zu erzielen. Für ein Messgerät ist es zudem sehr praktisch, wenn man es „stand-alone“ benutzen kann und nicht zu jeder Analyse einen Computer mit sich her-

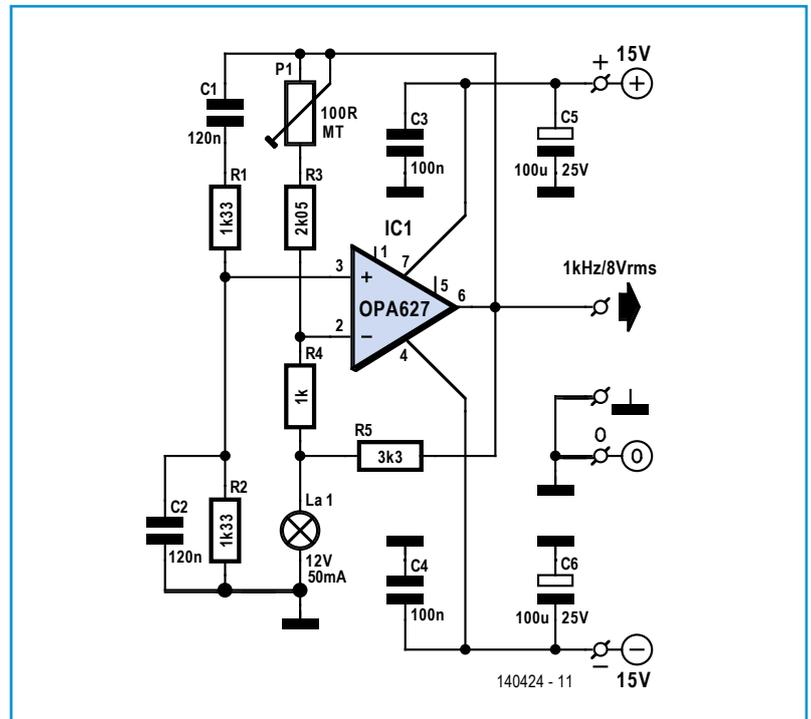
Von
Hein van den Heuvel
(Niederlande)

umschleppen muss.

Die Herausforderung für mich war es, einen für den Nachbau geeigneten Sinusgenerator mit einer möglichst geringen Zahl von Bauteilen, zu einem minimalen Preis und mit einer niedrigen Verzerrung von 0,001 % (-100 dB) zu entwerfen. Ach ja, und alles, ohne dass ein Abgleich nötig wäre.

Wenn man möglichst wenige Bauteile einsetzen möchte, beginnt man am besten mit dem klassischen Wienbrücken-Oszillator. Sehr viele nützliche Informationen dazu liefert eine Applikationsschrift der Firma Linear Technology, geschrieben von Jim Williams [1]. Darin werden einige Oszillatoren beschrieben, die auf der Wienbrücke basieren. In seiner einfachsten Form ist die Wienbrücke mit einem Operationsverstärker und einer ordinären Glühlampe ausgestattet. Eine Glühbirne in einer elektronischen Schaltung? Das mag verwundern, muss es aber nicht, wenn man bedenkt, dass der Glühfaden als spannungsabhängiger Widerstand fungiert. Je höher die Spannung über der Lampe, desto höher ist auch die Temperatur des Glühdrahtes. Und genau wie die meisten Metalle besitzt auch Wolfram einen positiven Temperaturkoeffizienten: Eine höhere Temperatur bewirkt also einen höheren Widerstand. Das funktioniert genau so wie ein PTC-Widerstand. Wenn man die Glühlampe in die Gegenkopplung aufnimmt, wird die Verstärkung bei steigender Amplitude reduziert. Und wenn die Verstärkung kleiner als 1 wird, nimmt die Amplitude wieder ab. Nach einiger Zeit hat sich ein Gleichgewichtszustand bei einer bestimmten Amplitude etabliert. Durch diese einfache Amplitudenstabilisierung wird verhindert, dass der Verstärker in die Begrenzung läuft und dabei nicht akzeptable Verzerrungen entstehen.

Schon der einfachste Wienbrücken-Oszillator im Dokument von Linear Technology erzeugt ein Signal mit einer Verzerrung von 0,0025% (-92 dB). Nicht schlecht für den Anfang! Die Verzerrung wird größtenteils durch die Lampe verursacht, da sich ihre Verlustleistung während einer Sinusperiode verändert. Deshalb ändert sich auch die Temperatur und letztendlich der Widerstand des Glühfadens im Rhythmus des Sinussignals. Das Ergebnis ist eine Verzerrung vor allem mit einer Komponente



dritter Ordnung. Die Höhe der Verzerrung hängt auch von der thermischen „Trägheit“ des Glühfadens ab, die wiederum von der gemittelten Temperatur beeinflusst wird ... man sieht, es ist nahezu unmöglich, von vornherein die Höhe der Verzerrungen abzuschätzen. Die Verzerrungen müssen experimentell bestimmt werden, mit einem akzeptablen Kompromiss zwischen Verzerrung, Zeitverhalten und Amplitudenstabilität.

Spot-Sinusgenerator

Wir können ganz niedrige Verzerrungen mit einer geringeren Amplitudenstabilität erreichen. Ein paar mehr Bauteile und schon haben wir einen einfachen Spot-Sinusgenerator, wie er in Elektor schon vor 20 Jahren beschrieben wurde [2]. Der in diesem Entwurf eingesetzte Opamp (siehe **Bild 1**) kostet aber zurzeit mehr als 20 €, so dass ich versucht habe, den Spot-Sinusgenerator mit einem preisgünstigeren Opamp aufzubauen, wie auch in dem damaligen Artikel geraten wurde. Die Ergebnisse schienen vielversprechend: Mit einem der beiden Opamps eines TL082 wurde ein THD von -96 dB erreicht, mit einem NE5532 kam ich sogar auf -105 dB. Allerdings konnten diese niedrigen Werte erst nach etlichen Experimenten erreicht werden. Die Bau-

Bild 1. Spot-Sinusgenerator (Elektor 12/94).

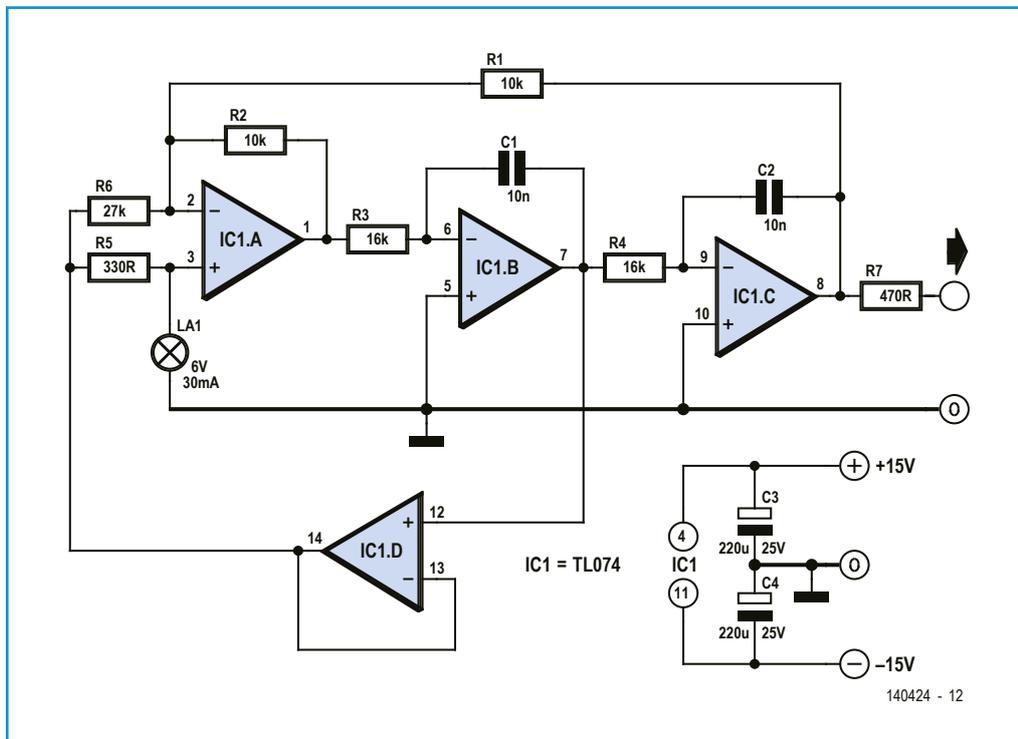


Bild 2. State-variable-Sinusoszillator mit einer Lampe als stabilisierendem Element.

teilauswahl erwies sich als äußerst kritisch und auch die Amplitudeneinstellung war kaum zu bändigen. Bei steigender Umgebungstemperatur sackt die Amplitude schnell ab. Das war zu erwarten, da der Arbeitspunkt dieses Oszillators so eingestellt ist, dass die Temperatur des Glühfadens ziemlich niedrig ist. Eine Änderung der Umgebungstemperatur wirkt sich deshalb stark auf die Amplitude aus.

State-variable-Oszillator

Da ich doch einen weniger kritischen Aufbau erreichen wollte, machte ich mit den Experimenten weiter. Als Alternative für die Glühlampe zur Amplitudenstabilisierung werden oft Schaltungen mit JFETs oder Optokoppler genannt. Einige davon sind auch in der Application Note von Linear Technology zu finden. Zumindest ein paar dieser Alternativen versprochen tatsächlich niedrigere Verzerrungen – allerdings mit einem hohen Aufwand an Bauteilen (was ich ja gerade vermeiden wollte).

Es blieb dann schließlich doch bei der Schaltung mit dem Glühlämpchen. Man kann einen Wienbrücken-Oszillator mit Lampe als Ausgangspunkt nehmen und ein einfaches Bandfilter oder einen Tiefpass dahinter schalten, um die Harmonischen zu unterdrücken. Das

wäre mit einem Doppel-Opamp auch unkompliziert auszuführen.

Ausgehend von einem Oszillator mit nachfolgender Filterung kam ich schnell zu einem Oszillatortyp, der diese Filterung schon in sich trägt: der State-variable-Oszillator. Ein solcher Oszillator wurde früher sehr oft in der professionellen Audio-Messtechnik eingesetzt, bevor er von digitalen Lösungen verdrängt wurde. Merkwürdigerweise bin ich aber nirgends einem solchen Oszillator mit einer Lampe als stabilisierendem Element begegnet. Also habe ich eine Schaltung mit Lampe schnell auf dem Steckboard aufgebaut und damit überraschend gute Resultate erzielt! Ein State-variable-Oszillator hat den Nachteil, dass er mindestens drei Opamps benötigt. Die Tatsache aber, dass vier Opamps in einem IC mit 14 Anschlüssen stecken können und solche ICs auch noch vergleichsweise preisgünstig sind, tröstet etwas über den erhöhten Bauteileaufwand hinweg.

Die Schaltung des State-variable-Oszillators in **Bild 2** sieht auf den ersten Blick viel komplizierter aus als ein Wienbrücken-Oszillator. Und wirklich, es werden vier Opamps eingesetzt. Es ist aber bemerkenswert, dass insgesamt dennoch nicht viel mehr Bauteile benö-

tigt werden. Die Schaltung besteht nämlich aus einem IC und zwölf passiven Bauteilen, vergleichbar mit dem Wienbrücken-Oszillator aus Bild 1. Der eingesetzte Vierfach-Opamp TL074 zeigt, dass auch vermeintlich mittelalterliche Bauteile noch ihre Daseinsberechtigung haben. Und das zu einem lächerlich geringen Preis! Nicht umsonst hat Elektor dieses Bauteil in die Elektor.Labs Preferred Parts (ELPP) aufgenommen.

Der State-variable-Oszillator besteht aus den beiden Integratoren IC1.B und IC1.C mit den dazu gehörenden RC-Netzwerken R3/C1 und R4/C2. Beide Integratoren hintereinander bewirken eine Phasendrehung von 180°. Ein invertierender Verstärker mit einer Verstärkung von -1 (IC1.A mit R1 und R2) ergibt ebenfalls eine Phasendrehung von 180°. Zusammen mit den Integratoren beträgt die Phasendrehung also wieder 0°. Wir verbinden diese Kombination zu einer Schleife. Der Oszillationsbedingung wird Genüge getan, wenn die Über-alles-Verstärkung 1 beträgt. Mit der Verstärkung von IC1.A von -1 gilt für die Oszillatorfrequenz:

$$f_0 = 1 / (2\pi RC)$$

mit: $R = R3 = R4$ und $C = C1 = C2$

In der Theorie reicht das schon für einen Oszillator. Für das Anlaufen und die Amplitudenstabilisierung benötigen wir aber noch den Schaltungsteil mit dem Lämpchen. Es besteht aus einer Brückenschaltung mit R5 und der Lampe in einem und mit R6 und R1 parallel zu R2 im anderen Zweig. Das Signal für diese Brücke stammt aus dem ersten Integrator. Es ist in der Phase um 90° im Vergleich zum Eingang des invertierenden Verstärkers verschoben. Der Trick dabei ist, dass die Differenzspannung in der Brücke die Phase der invertierenden Stufe beeinflusst. Die Lampenschaltung hat also keine Auswirkungen mehr auf die Schleifenverstärkung, sondern auf die Oszillatorfrequenz.

Bei dem gewählten Arbeitspunkt der Lampe muss der Ausgang des Opamps etwa 7,5 mA liefern. Das schafft eine Sektion des TL074 zwar leicht, aber nur gepaart mit einigen zusätzlichen Verzerrungen. Aus diesem Grund wird die vierte und letzte freie Opamp-Sektion des TL074 als Impedanzwandler/Puffer eingesetzt, um

das Signal an die Brücke mit der Lampe zu liefern. Wenn die Brücke im Gleichgewicht, also die Amplitude stabil ist, dann spielen die Verzerrungen dieses Opamps im weiteren Signalverlauf keine Rolle mehr. Allerdings gelangen die Verzerrungen, die von der Lampe selber verursacht werden, in voller Stärke zum Ausgang der Verstärkerstufe IC1.A. Doch glücklicherweise fungieren die beiden Integratoren auch als Tiefpassfilter. Harmonische Verzerrungen werden deshalb genauso unterdrückt wie breitbandiges Rauschen. Aus diesem Grund ist der Ausgang der Schaltung auch am zweiten Integrator angebracht, denn hier sind die Verzerrungen am geringsten! Mehr Informationen über diverse verzerrungsarme Oszillatoren (und besonders den State-variable-Oszillator) sind auf den Internet-Seiten [3], [4] und [5] zu finden.

Bauteilwahl

Mein Ziel war, einen brauchbaren Lampentyp zu finden, der auch gut erhältlich sein sollte. Die Wahl ist auf so genannte Stecklämpchen (wedge base bulbs) mit 6 V/30 mA gefallen. Bei diesen Lampen können Sie die Anschlussdrähte einfach passend biegen und auf eine Platine löten. Die Lampen sind von diversen Anbietern erhältlich, ich habe sie bei meinem örtlichen Elektronikhändler erhalten (wohl dem, der noch einen kennt!). Es gibt auch andere brauchbare Lampentypen, dazu später mehr.

Die ersten Experimente habe ich mit Bauteilen aus meiner Bastelkiste vorgenommen, mit stinknormalen Kohlewiderständen und MKT-Kondensatoren aus Polyester für C1 und C2. Die Verzerrung lag dennoch gut unter -100 dB. Also scheinen billige Bauteile nicht einem guten Resultat im Wege zu stehen! Durch die großen Toleranzen aber wich die Oszillatorfrequenz doch beträchtlich von den gewünschten 1 kHz ab. Zudem war die Frequenz auch ziemlich temperaturabhängig. Schließlich bin ich auf (auch bezahlbare) Polypropylen-Filmkondensatoren von Wima aus der FKP2-Serie mit einer Toleranz von 2,5 % ausgewichen. Für alle Widerstände habe ich 1-%-Metallfilmtypen verwendet. Die Ausgangsfrequenz war dann im Rahmen einiger zehn Hertz stabil, auch bei wechselnder Umgebungstemperatur. Veränderungen in der (Brücken-)Schaltung mit der Lampe

Mögliche Störquellen

Einige Hinweise bei eventuellen Problemen: Sie müssen zunächst herausfinden, welcher Art die Störungen sind. Die meisten Verzerrungsmesser besitzen dafür einen Ausgang, an dem das gesamte Signal bis auf den Grundton erscheint. Sie können sich die Störungen dann schön auf dem Oszilloskop ansehen.

- **Brummen:** Dies kann von einer elektrischen Kopplung verursacht werden. Auf jeden Fall hilft es, die Schaltung abzuschirmen. Ist das Problem damit nicht beseitigt, dann kann die Ursache eine Erdschleife sein. Nehmen Sie zunächst die Spannungsversorgung unter die Lupe, es kann nämlich sein, dass sie direkt (galvanisch) mit der Erde der Netzspannung verbunden ist. Wenn dies nicht zu vermeiden ist, bringen Sie drei Widerstände von $47\ \Omega$ in Reihe mit den drei Anschlusskabeln des Netzteils an. Auch kann es helfen, wenn nur ein (Mess-)Gerät gleichzeitig am Oszillator angeschlossen ist. Wenn etwa das Verzerrungsmessgerät am Oszillator hängt, koppeln Sie dann das Oszilloskop (auch den Erde-Clip) ab!
- Merkwürdiges „Pendeln“ und relativ hochfrequente Wechselspannungen deuten auf Instabilität hin. Auch wenn der TL074 ein recht „zahmer“ Opamp ist, kann er doch instabil werden, wenn die Entkoppel-Elkos zu weit vom IC entfernt sind. Sie sollten Elkos guter Qualität (niedriger ESR) verwenden. Im Zweifel sollte man kleine Kapazitäten von beispielsweise $100\ \text{nF}$ parallel zu jedem Elko schalten. Vermeiden Sie auch zu lange Verdrahtungen und halten Sie die Masseverbindungen so kurz wie möglich. Ziehen Sie auch nahe Funksender als Störenfriede in Betracht. Dann ist eine Abschirmung Pflicht!
- **Rauschen:** Dies kann von Rauschen auf den Versorgungsspannungsleitungen, ausgehend vom Netzteil/gerät verursacht werden. In diesem Fall helfen zwei $47\text{-}\Omega$ -Widerstände in Reihe mit den Versorgungsspannungsleitungen. Achten Sie auch hier auf die gute Qualität der Elkos.

wirkten sich ebenfalls nicht aus. Möchten Sie die Frequenz genau auf $1\ \text{kHz}$ einstellen, dann bringen Sie ein Mehrgang-Trimmpoti von $500\ \Omega$ zwischen R1 und R2 an. Der Schleifer des Potis wird dann mit dem invertierenden Eingang von IC1.A verbunden.

Um zu garantieren, dass die Schaltung auch nachbaubar ist, habe ich drei Lampen ausprobiert. Die Amplitude am Ausgang lag, abhängig von der eingesetzten Lampe, zwischen $2,81\ \text{V}$ und $3,14\ \text{V}$. Das ist kein beunruhigender Unterschied, sondern es war wegen der Toleranz des Widerstands der Glühfäden so zu erwarten. Die Werte von R5 und R6 sind nicht weiter kritisch, hier können Sie auch Kohlewiderstände einsetzen. Ich habe auch verschiedene TL074-Typen (TI und STS) ausprobiert, konnte aber keine Unterschiede feststellen. Danach wurde noch die Empfindlichkeit für Versorgungsspannungsänderungen untersucht. Das Netzgerät musste auf weniger als $\pm 10\ \text{V}$ heruntergedreht werden, um eine Verschlechterung des THD-Werts festzustellen. Schließlich noch ein Temperaturtest: Mit einem Haartrockner in „Sehr heiß“-Einstellung wurde das ganze Steckbrett erhitzt. Zwar erreichten die Bauteile Temperaturen, die nicht zu kalkulieren waren, aber es ist

doch ein guter Test, um einen Eindruck von der Temperaturempfindlichkeit der Schaltung zu erhalten. Das Resultat: Die Verzerrungswerte lagen so niedrig wie zuvor, lediglich die Amplitude sank um ungefähr $0,3\ \text{dB}$.

Die schließlich gemessenen Verzerrungen des Oszillators lagen in der Nähe von $-106\ \text{dB}$ ($0,0005\ \%$). Ich musste das Steckbrett dabei von unten mit einer geerdeten Metallplatte abschirmen, um Brummen fernzuhalten. Es gibt noch eine einfache Möglichkeit, die Verzerrungen weiter zu verringern: Nehmen Sie einen $1,5\text{-k}\Omega$ -Widerstand für R7 und schalten Sie einen 100-nF -Kondensator zwischen Ausgang und Masse. Bei meinem Aufbau ließ sich mit einiger Mühe eine Verzerrung von $-108\ \text{dB}$ ($0,0004\ \%$) ermitteln.

Wenn man über eine geeignete Messapparatur verfügt, kann man nach Herzenslust weiter mit dem Oszillator experimentieren. Bei mir war wegen der Messgrenze meines Verzerrungsmessgerätes leider an dieser Stelle Schluss, aber vielleicht können Sie noch das eine oder andere Dezibel herauskitzeln.

Andere Lämpchen

Bei den Experimenten habe ich auch diverse andere Lämpchen ausprobiert. Im Prinzip sollte jedes Exemplar mit einer Spannung von höchstens 10 V und einem Strom von weniger als 40 mA geeignet sein. Als Richtschnur sollte man annehmen, dass in einer Schaltung wie dieser die Spannung über der Lampe $1/10$ der nominellen Lampenspannung U_L betragen soll und der Strom durch die Lampe bei etwa einem Viertel des angegebenen Werts (I_L) liegt.

Angenommen, die Ausgangsspannung soll 3 V betragen, so lassen sich R_5 und R_6 wie folgt berechnen:

$$R_5 = \frac{\left(3V - \frac{1}{10}U_L\right)}{\frac{1}{4}I_L}$$

und
$$R_6 = \left(\frac{30V}{U_L} - 1\right) \cdot 5k\Omega$$

mit U_L = nominelle Lampenspannung, I_L = nomineller Lampenstrom

Mit diesen berechneten Richtwerten konnte ich einen gut funktionierenden Oszillator aufbauen, zumindest mit allen Lämpchen, die ich getestet habe. Um allerbeste Resultate zu erzielen, müssen Sie mit diesen Werten ein wenig experimentieren, da die U-I-Charakteristik einer bestimmten Lampe nicht genau vorhersagbar ist. Auf diese Weise können Sie etwas mit den drei Größen Ausgangsspannung, Verzerrung und Einschaltzeit (die Zeit zwischen dem Einschalten des Oszillators und dem Erreichen eines Signals mit niedrigsten

Verzerrungen und einer stabilen Amplitude) spielen.

Aus der Unzahl von Lämpchen, die ich ausprobiert habe, sind die folgenden beiden gut erhältlich und brauchbar:

- Lampe 10 V/14 mA, Typ 1869 von JKL Components (bei Digi-Key, 289-1227-ND). Gute Ergebnisse erhält man mit $R_5 = 330 \Omega$ und $R_6 = 10 k\Omega$. Bei diesem Lämpchen liegt die Einschaltzeit aber ziemlich hoch (mehr als 5 s).
- Lampe 5 V/21 mA, Typ 6022 von Multi-comp (bei Farnell 2078333). Gute Resultate erhält man mit $R_5 = 470 \Omega$ und $R_6 = 33 k\Omega$.

Eine letzte Anmerkung noch: Sie sollten keinesfalls Lämpchen aus Fahrrad-Rücklichtern (6 V/50 mA) verwenden! Ich habe zwei Exemplare getestet und dabei bei 6 V Stromaufnahmen von 70 mA und mehr ermittelt.

(140424)

Weblinks und Literatur

- [1] Bridge Circuits, Application Note 43, Linear Technology Corp.: <http://cds.linear.com/docs/en/application-note/an43f.pdf>
- [2] Elektor 12/94, „Klirrarmer Sinusgenerator“
- [3] <http://sound.westhost.com/articles/sinewave.htm>
- [4] www.moorepage.net/RC.html
- [5] www.jensign.com/RMAA/Wien_RMAA/