

# Operationsverstärker in Theorie und Praxis Teil 5

*Im abschließenden Teil unserer Serie beschäftigen wir uns mit der Signalerzeugung durch Operationsverstärker sowie der Stromversorgung von Schaltungen mit Operationsverstärkern.*

## Signalgeneratoren

Wie bereits bei der Besprechung des Komparators bzw. Schmitt-Triggers angedeutet und bei der des Integrators praktisch besprochen, kann man den Operationsverstärker hervorragend zur Schwingungserzeugung einsetzen. Aufgrund des nahezu idealen Verhaltens der Operationsverstärker gelingt es, mit diesen bei relativ geringem Aufwand sehr saubere Signalformen zu erzielen. Wir wollen einige Signalerzeugungsschaltungen näher betrachten.

## Rechteckgenerator

Rechtecksignale sind sehr einfach durch die Ausnutzung von Mit- und Gegenkopplungseigenschaften des OPs erzeugbar. Die Grundschialtung für solch einen Rechteckgenerator ist in Abbildung 38 zu sehen. Auf Anhieb erkennen wir hier die Elemente eines Schmitt-Triggers mit Hysterese wieder, hier durch den Mitkopplungszweig  $R_2/R_3$  gebildet. Gleichzeitig findet man einen (frequenzabhängigen) Gegenkopplungszweig mit  $R_1/C_1$ . Diese Schaltungsanordnung führt schließlich zur Selbsterregung.

Legt man die Betriebsspannung an, so kann man  $C_1$  zunächst als Kurzschluss gegen Masse betrachten. Durch den Mitkopplungszweig liegt am nichtinvertierenden Eingang die mit  $R_2$  und  $R_3$  geteilte Ausgangsspannung des OP an:

$$U = \frac{U_a \cdot R_3}{R_2 + R_3}$$

Solange die Spannung  $U$  diesen definierten Wert noch nicht erreicht hat, ist am Ausgang eine positive Spannung vorhanden. Dadurch lädt sich  $C_1$  mit der zusammen mit  $R_1$  gebildeten Zeitkonstanten auf. Sobald die Spannung am invertierenden Eingang den Wert der am nichtinvertierenden Eingang anliegenden Spannung überschreitet (am Zeitpunkt  $t_0$ ), kippt die Ausgangsspannung aufgrund der hohen Verstärkung des OP steil in die negative Richtung. Jetzt wird  $C_1$  entladen und wieder in Richtung der nun negativen Ausgangsspannung geladen, bis die Spannung am invertierenden Eingang den Wert der nun ebenfalls negativen Spannung am nichtinvertierenden Eingang unterschreitet. Dieser Zeitraum ist in Abbildung 38 mit  $t_1$  beschrieben. Jetzt wiederholt sich der gesamte Vorgang wieder, sobald der Wert der

Spannung am invertierenden Eingang den Wert am nichtinvertierenden Eingang überschreitet – der Ausgang kippt wieder in die andere Richtung, der Kondensator wird wieder umgeladen, bis seine Spannung den Wert am nichtinvertierenden Eingang überschreitet ( $t_2$ ), usw.

Die Periodendauer dieser Schaltung ergibt sich zu:

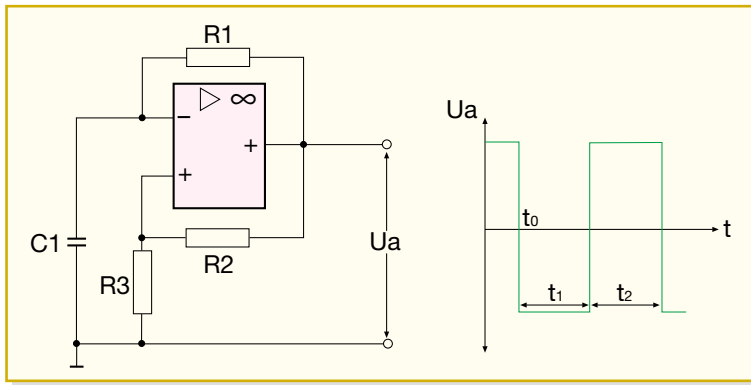
$$T = 2 \cdot R_1 \cdot C_1 \cdot \ln \left( 1 + 2 \frac{R_3}{R_2} \right)$$

und als Frequenz ( $f = \frac{1}{T}$ ):

$$f = \frac{1}{2 \cdot R_1 \cdot C_1 \cdot \ln \left( 1 + 2 \frac{R_3}{R_2} \right)}$$

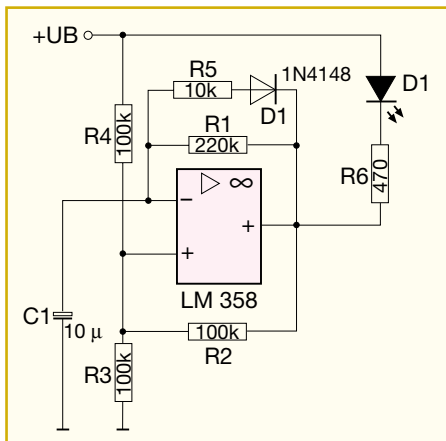
Damit ergibt sich die Möglichkeit, durch Variation des Verhältnisses von  $R_3$  zu  $R_2$  sehr einfach die Frequenz eines solchen Generators bei festgelegtem  $C_1$  zu verändern.

Das in Abbildung 38 gezeigte, um die Nulllinie symmetrische Signalbild wird jedoch nur erreicht, wenn man den OP mit einer symmetrischen Betriebsspannung versorgt. Will man dennoch mit nur einer



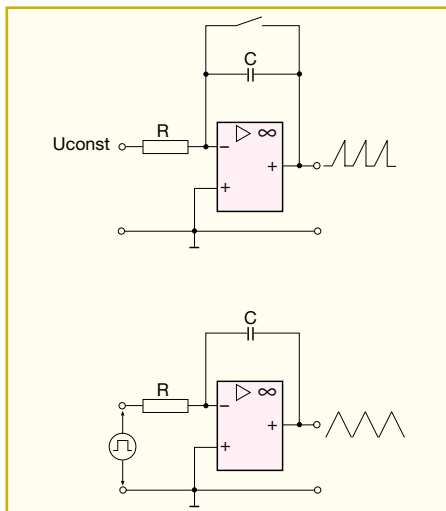
**Bild 38: Die Grundschaltung für einen Rechteckgenerator**

einfachen Betriebsspannung ein Rechtecksignal erzeugen, greift man zum altbewährten Trick und legt den Arbeitspunkt des OPs bei etwa der halben Betriebsspannung fest. Allerdings erreicht man hier nur ein über der Nulllinie liegendes unsymmetrisches Signal, das für viele Anwendungen jedoch ausreicht.



**Bild 39: Dieser Rechteckgenerator arbeitet als Blinkschaltung mit unsymmetrischem Tastverhältnis**

So kann man mit einer einfachen Betriebsspannung sehr einfach einen Rechteckgenerator aufbauen, wie er in Abbildung 39 gezeigt ist. Hier sieht man eine mit



**Bild 40: Die Grundschaltungen für einen Sägezahn- und einen Dreieckgenerator**

ca. 0,5 Hz schwingende Blinkschaltung, die eine Leuchtdiode treibt. Die Schaltung enthält eine Besonderheit, die sie bei Batteriebetrieb besonders stromsparend macht. Mit R 5 und D 1 erreicht man ein unsymmetrisches Tastverhältnis, so dass die Leuchtdiode nur jeweils kurz aufblitzt. Während sich C 1 über R 1 auflädt, bleibt D 1 gesperrt, so dass die Ladezeit von C 1 nur von R 1 bestimmt wird. Beim folgenden Entladen von C 1 wird D 1 hingegen leitend, und der gegenüber R 1 wesentlich kleinere Widerstand R 5 bestimmt nun wesentlich die Entladezeit. So entsteht hier ein Tastverhältnis von etwa 1:18.

Diese Schaltung kann man als Betriebsspannungskontrolle einsetzen, aber auch als Anzeigeschaltung für bestimmte Zustände. Denn schließt man R 3 statt an Masse an den Ausgang z. B. eines Komparators an, blinkt die LED so lange, wie der Komparatorausgang Low-Pegel führt.

### Sägezahn-/Dreieckgenerator

Die Erzeugung von Sägezahn- und Dreieck-Signalen haben wir bereits ausführlich im „ELVjournal“ 4/03 im Rahmen der Beschreibung des Integrators behandelt. Abbildung 40 stellt noch einmal die beiden Grundschaltungen dazu dar. Zur Funktionserläuterung sei noch einmal die Arbeitsweise des Integrators verinnerlicht: Ersetzt man bei einem invertierenden Verstärker den Rückkopplungswiderstand durch einen Kondensator, so folgt die Ausgangsspannung der Eingangsspannung zeitabhängig, sie ist proportional dem Zeitintegral der Eingangsspannung.

Der Kondensator wird zunächst vom über R fließenden konstanten Strom aufgeladen. Da der Operationsverstärker bemüht ist, das Gleichgewicht zwischen den beiden Eingängen zu halten, verschiebt sich durch die ansteigende Spannung am Kondensator das Potential am Ausgang immer weiter in die Gegenrichtung der Eingangsspan-

nung, bis das Potential des Ausgangs je nach Polarität der Eingangsspannung voll an der negativen oder positiven maximalen Aussteuerungsgrenze liegt. Wechselt die Polarität der Eingangsspannung, geht die Ausgangsspannung wieder mit dem Zeitfaktor behaftet in die Gegenrichtung.

Die in Abbildung 40 gezeigte Prinzipschaltung des Dreieckgenerators kann zusammen mit dem eben besprochenen (symmetrisch mit Betriebsspannung versorgten) Rechteckgenerator-Prinzip zu einem kleinen Funktionsgenerator (Abbildung 41) erweitert werden, der gleichzeitig Dreieck- und Rechtecksignale zur Verfügung stellt. Dabei fungiert jetzt die Ausgangsspannung des Schmitt-Triggers als Steuerung für den Dreieckgenerator, während dessen High-Low-Pegel-Wechsel wiederum den Schmitt-Trigger ansteuert. Dem Schmitt-Trigger fehlt hier das eigene frequenzbestimmende Glied, sein Umschaltverhalten wird synchron von der Integratorstufe bestimmt. Damit ergibt sich die Arbeitsfrequenz des Funktionsgenerators zu:

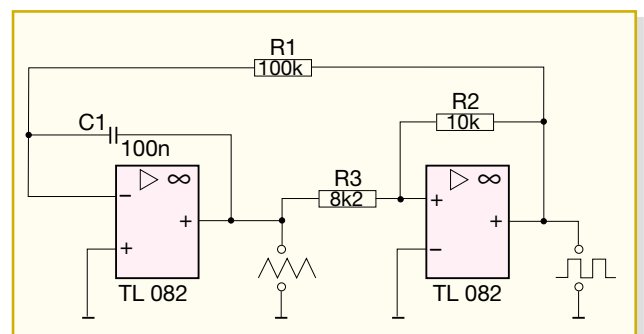
$$f = \frac{1}{4} \cdot \frac{R2}{R3} \cdot \frac{1}{R1 \cdot C1}$$

### Sinusgenerator

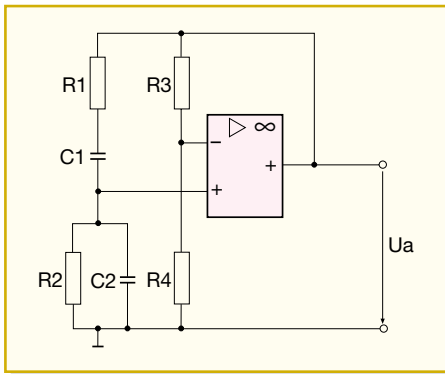
Auch die Erzeugung von Sinusschwingungen stellt den Operationsverstärker nicht vor allzu große Probleme. Eine weit verbreitete, weil mit nur sehr geringem Klirrfaktor behaftete Grundschaltung ist der in Abbildung 42 gezeigte Wien-Robinson-Oszillator in Brückenschaltung. Die Wien-Robinson-Brückenschaltung kommt eigentlich aus der Messtechnik und dient dort u. a. dazu, die Frequenz einer Spannung auf einfache Weise durch den Abgleich einer aus komplexen Widerständen bestehenden Messbrücke, wie sie in Abbildung 43 dargestellt ist, auf Nullspannung im Brückenweig zu bestimmen. Dabei gilt allgemein:

$$R1 = R2, C1 = C2, R3 = 2R4$$

Zum Abgleich der Brücke wird entwe-



**Bild 41: Zusammenspiel aus Integrator und Schmitt-Trigger – ein kleiner Funktionsgenerator**



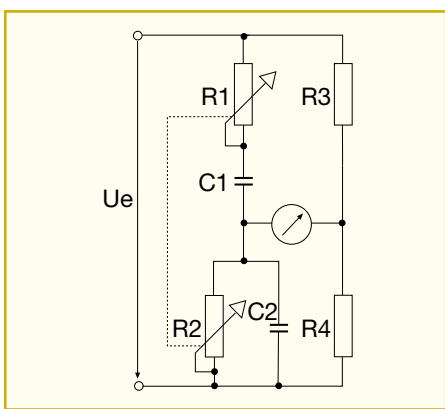
**Bild 42: Grundsaltung für einen Sinusgenerator mit Wien-Robinson-Brücke**

der der Widerstand oder der Kondensator der Serien-Parallel-Schwingkreiskombination verändert, bis die Spannungsdifferenz innerhalb der Brücke null ist. Anhand der genau bekannten Werte von  $R_1/R_2$  und  $C_1/C_2$  kann man dann nach:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

die Frequenz der gemessenen Spannung errechnen.

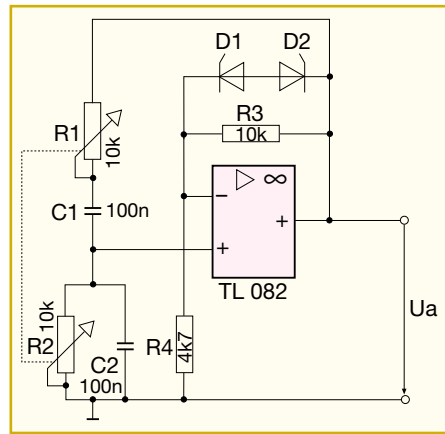
Das Wien-Robinson-Netzwerk aus Abbildung 43 erkennt man auch in der Generatorschaltung in Abbildung 42. Hier bildet wie in Abbildung 42 die Wien-Robinson-Brücke einen Teil des Rückkopplnetzwerkes der Generatorschaltung. Die Brückenschaltung aus  $R_1$  bis  $R_4$  sowie  $C_1$  und  $C_2$  wirkt als frequenzbestimmendes Element in diesem Generator. Dabei wirken  $R_3$  und  $R_4$  als Gegenkopplung und  $R_1$ ,  $C_1$ ,  $R_2$  und  $C_2$  als frequenzselektive Mitkopplung. Über den Gegenkopplungszweig wird die Wien-Robinson-Brücke ständig verstimmt. Nur bei Resonanz steht



**Bild 43: Die Wien-Robinson-Brücke findet man oft in der Messtechnik.**

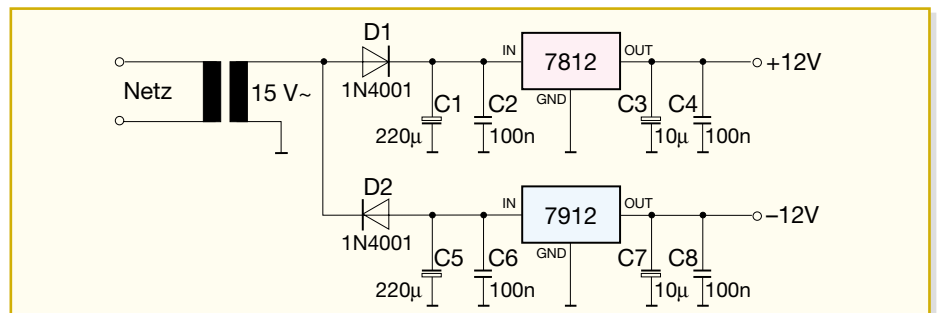
die maximale Verstärkung des OP zur Verfügung. Durch dieses (zeitabhängige) Verhalten entsteht am Ausgang der Spannungsverlauf einer Sinuskurve.

Abbildung 44 zeigt eine praktische Anwendungsschaltung. Diese ist für den einstellbaren Frequenzbereich von ca. 100 Hz bis 1 kHz ausgelegt. Führt man  $R_3$  eben-



**Bild 44: Anwendungsschaltung für einen durchstimmbaren Sinusgenerator mit Stabilisierung der Amplitude des Ausgangssignals**

falls einstellbar aus, kann man den Klirrfaktor des Ausgangssignals auf ein Minimum abgleichen. Eine zur Grundsaltung abweichende Besonderheit stellt die  $R_3$  parallelgeschaltete Anordnung mit den beiden Z-Dioden dar. Diese bewirken



**Bild 45: Netzteilerschaltung für die symmetrische Spannungsversorgung von Operationsverstärkerschaltungen**

eine einfache Amplitudenstabilisierung des Ausgangssignals auf den Spannungswert (max. bis zur Aussteuerungsgrenze des OPs) der einzelnen Z-Diode zuzüglich der Durchflussspannung der jeweils anderen Z-Diode und damit eine konstante Ausgangsamplitude des Signals.

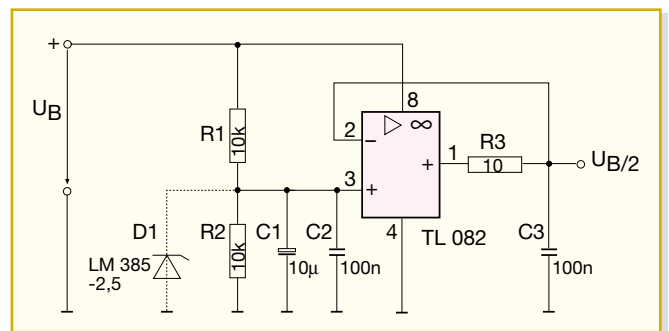
Damit haben wir die wichtigsten Signalzeugungsmöglichkeiten mit Operationsverstärkern besprochen und wollen uns abschließend kurz einigen Varianten der Stromversorgung von Operationsverstärkern zuwenden.

### Doppelt oder nicht?

Im Normalfall werden Operationsverstärker mit einer symmetrischen, positiven und negativen Betriebsspannung versorgt. Abbildung 45 zeigt eine dafür geeignete

Stabilisierungsschaltung, die mit integrierten Spannungsreglern schnell aufgebaut ist. Sie zeigt, dass es nicht unbedingt nötig ist, einen Netztrafo mit zwei Wicklungen und zwei Brückengleichrichtern einsetzen zu müssen.

Oft genug aber steht nur eine Betriebsspannung zur Verfügung, vor allem bei batteriebetriebenen Geräten. Dann muss, wie bereits im Teil 2 der Serie beschrieben, eine virtuelle Masse geschaffen werden. Dies geschieht je nach Einsatzbereich des OPs entweder über einen Spannungsteiler direkt am nichtinvertierenden Eingang, der den Arbeitspunkt auf die halbe Betriebsspannung anhebt, oder, wie in Abbildung 46 gezeigt, durch einen nach eben diesem Prinzip arbeitenden Spannungsfollower, der aus der Betriebsspannung die virtuelle Masse ( $U_{B/2}$ ) erzeugt und dann der restlichen Schaltung zur Verfügung stellt.  $R_3$  verhindert ein Schwingen der Spannungsfollowerschaltung. Statt  $R_2$  kann man auch eine Z- oder Referenz-Diode einsetzen, so wird die negative Ausgangsspannung stabilisiert.



**Bild 46: Die Erzeugung einer virtuellen Masse ( $U_{B/2}$ ) aus einer einfachen Betriebsspannung**

Damit endet unsere Serie, die das Ziel hatte, vor allem dem Einsteiger einen praxisorientierten Einblick in die Welt der Operationsverstärkertechnik zu geben. Aber auch der gestandene Elektroniker wird sicher die eine oder andere Anregung für den praktischen Einsatz dieser vielseitigen Bauelemente gefunden haben.