

# Operationsverstärker in Theorie und Praxis Teil 3

*Der dritte Teil unserer Serie beschäftigt sich mit weiteren Grundschaltungen und ihren praktischen Anwendungen.*

## Addierer

Diese Einsatzvariante des invertierenden Verstärkers, auch Summierverstärker genannt, addiert mehrere Eingangssignale und verstärkt sie. Abbildung 23 zeigt die Prinzipschaltung. Wie bei der Vorstellung des invertierenden Verstärkers bereits diskutiert, ist der Operationsverstärker stets bestrebt, die Spannungsdifferenz zwischen invertierendem und nicht invertierendem Eingang auf null zu halten. Ergo liegt der invertierende Eingang in dieser Schaltung immer auf Massepotenzial und bildet somit einen virtuellen Nullpunkt. Jede der drei Eingangsspannungen erzeugt über die Widerstände einen Strom. Diese Teilströ-

me werden am invertierenden Eingang addiert, sie erzeugen an R 4 einen entsprechenden Spannungsabfall, so dass aufgrund des oben beschriebenen Verhaltens des OPs gilt:

$$I_1 + I_2 + I_3 = -I_4$$

Das Minuszeichen weist auf die Funktion als invertierender Verstärker hin.

Bezogen auf die Spannungsverhältnisse ergibt sich damit folgender Zusammenhang:

$$\frac{U_{e1}}{R_1} + \frac{U_{e2}}{R_2} + \frac{U_{e3}}{R_3} = \frac{-U_a}{R_4}$$

Um nun die entstehende Ausgangsspannung ermitteln zu können, wird die Formel umgestellt, und es ergibt sich:

$$-U_a = \frac{R_4}{R_1} \cdot U_{e1} + \frac{R_4}{R_2} \cdot U_{e2} + \frac{R_4}{R_3} \cdot U_{e3}$$

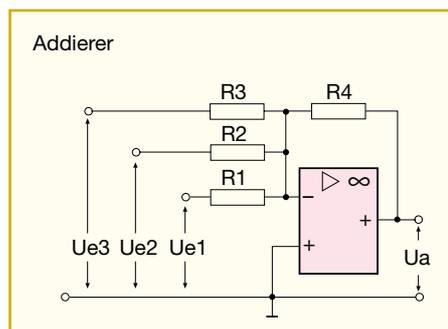
Die Verhältnisse zwischen  $R_4/R_1$ ,  $R_4/R_2$  und  $R_4/R_3$  stellen Spannungsverstärkungen dar. So erkennt man nun, dass sich die Ausgangsspannung aus der Summation der mit diesen Spannungsverstärkungen gewichteten Eingangsspannungen ergibt.

Durch die Ausregelung des invertierenden Eingangs auf den virtuellen Nullpunkt

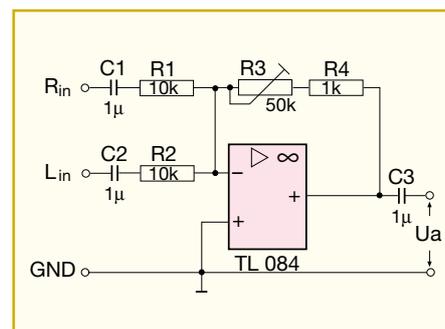
treten keine Rückwirkungen zwischen den einzelnen Eingängen auf.

Dieses Verhalten wird in der Praxis genutzt, um NF-Spannungen zu mischen, man findet den Addierer sehr oft in Mischpult-Schaltungen, wo auf diese Weise quasi beliebig viele Eingänge rückwirkungsfrei zusammengeschaltet werden können. Auch als Digital-Analog-Umsetzer ist dieses Schaltungsprinzip einsetzbar.

Unsere Anwendungsschaltung in Abbildung 24 zeigt eine Mischstufe, die als Eingangsstufe eines Subwoofer-Verstärkers dient. Beide Stereo-Kanäle werden addiert und am Ausgang erscheint ein phasenverschobenes Monosignal. Der Trimmer R 3 erlaubt die Einstellung der Verstärkung dieser Stufe im weiten Bereich



**Bild 23: Die Grundschaltung des Addierers**

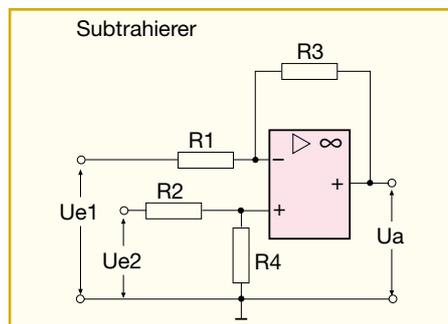


**Bild 24: Anwendung des Addierers in einer NF-Mischerschaltung**

zwischen -20dB (V=0,1) bis +14dB (V=5). Dieser Stufe kann dann die Phasendreh-Stufe (Abbildung 11) aus der vorherigen Folge nachgeschaltet werden, und schon hat man zwei wichtige Bausteine eines Subwoofer-Verstärkers zusammen.

### Subtrahierer

Benötigt man im Gegensatz zum Addierer eine subtraktive Verknüpfung von Signalen, bietet sich der Subtrahierer bzw. Differenzverstärker an. Er findet z. B. seine Anwendung zur Erzeugung von Differenzsignalen etwa in Pseudoquadrophonie-Schaltungen, bei der Erzeugung von Surround-Effekten oder in der Messtechnik als Brückenspannungsverstärker.



**Bild 25: Die Grundschaltung des Subtrahierers**

Der Subtrahierer (Abbildung 25) arbeitet als Kombination eines invertierenden und eines nicht invertierenden Verstärkers. Wird Eingang Ue1 auf Masse gelegt, ist der OP als nicht invertierender Verstärker geschaltet, wobei sich zwischen Ein- und Ausgangsspannung die folgende Beziehung ergibt:

$$U_a = \frac{R_1 + R_3}{R_1} \cdot \frac{R_4}{R_2 + R_4} \cdot U_{e2}$$

Wird hingegen Eingang Ue2 auf Masse gelegt und Ue1 angesteuert, arbeitet der OP als invertierender Verstärker, wobei sich die Ausgangsspannung wie folgt ergibt:

$$U_a = - \frac{R_3}{R_1} \cdot U_{e1}$$

Belegt man jedoch beide Eingänge gleichzeitig mit Signalen, so werden beide vorangegangenen Formeln zusammengefasst:

$$U_a = \frac{R_1 + R_3}{R_1} \cdot \frac{R_4}{R_2 + R_4} \cdot U_{e2} - \frac{R_3}{R_1} \cdot U_{e1}$$

Die Ausgangsspannung ist also die Differenz beider Eingangsspannungen, multipliziert mit dem jeweiligen Verstärkungsfaktor.

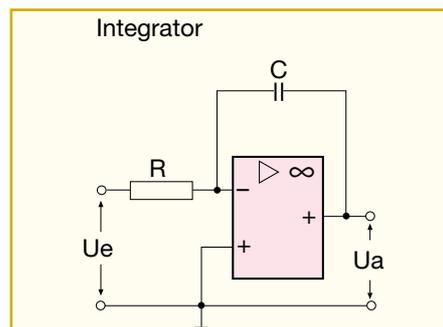
Dimensioniert man die Schaltung so, dass  $R_1 = R_2$  und  $R_3 = R_4$  ist, vereinfacht sich aufgrund der nun gleichen Verstärkungsfaktoren die Berechnung und man erhält:

$$U_a = \frac{R_3}{R_1} \cdot (U_{e2} - U_{e1})$$

Beide Eingangsspannungen werden also subtrahiert und mit dem Verstärkungsfaktor multipliziert. Wird die Verstärkung 1 ( $R_3/R_1 = 1$ ) gewählt, vereinfacht sich das Ganze nochmals und man erkennt klar das Arbeitsprinzip des Subtrahierers:

$$U_a = U_{e2} - U_{e1}$$

### Integrator



**Bild 26: Die Grundschaltung des Integrators**

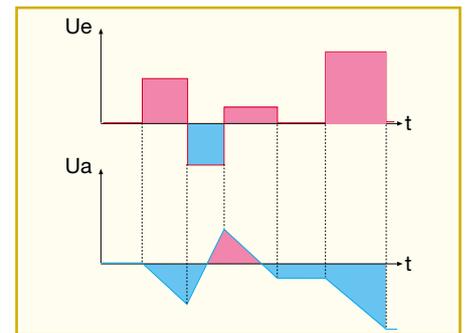
Ersetzt man bei einem invertierenden Verstärker den Rückkopplungswiderstand durch einen Kondensator (Abbildung 26), so folgt die Ausgangsspannung der Eingangsspannung zeitabhängig, sie ist proportional dem Zeit-Integral der Eingangsspannung:

$$U_a = - U_e \cdot \frac{t}{R \cdot C}$$

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 Potenzial am Ausgang immer weiter in die Gegenrichtung der Eingangsspannung, bis das Potenzial 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. Abbildung 27 verdeutlicht dieses Verhalten grafisch. Der beschriebene Vorgang wird Integrieren genannt.

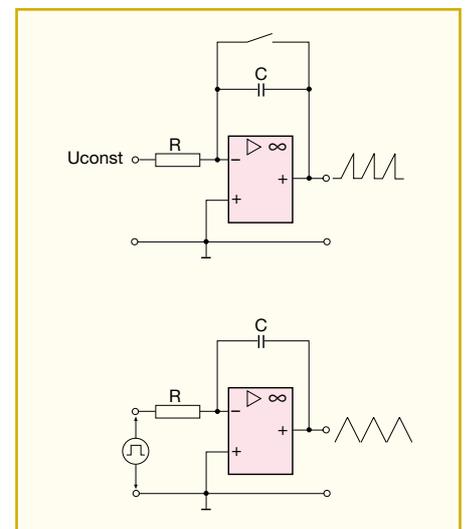
Dabei ist die Änderungsgeschwindigkeit der Ausgangsspannung von der Eingangsspannung und den Größen R und C abhängig. Je höher die Eingangsspannung ist, desto schneller folgt die Ausgangsspannung.

Eine einfache Anwendung ist die Erzeu-



**Bild 27: Der Zusammenhang der Spannungsverläufe von Ein- und Ausgangsspannung beim Integrator**

gung eines Sägezahn-Signals. Das Prinzip ist in Abbildung 28 oben dargestellt. Der Schalter ist hier symbolisch zu sehen, er kann z. B. der Schaltausgang eines Rechteckgenerators sein. Legt man an den Eingang eine konstante Spannung, so lädt sich der Kondensator mit konstantem Strom auf und es erfolgt am Ausgang ein zeitabhängiger Spannungsanstieg. Wird der Schalter geschlossen, entlädt sich der Kondensator schlagartig und die Ausgangsspannung fällt sofort ab. Schließt und öffnet man jetzt den Schalter periodisch, entsteht das Sägezahn-Signal.



**Bild 28: Anwendungen des Integrators: oben Sägezahngenerator, unten Dreieckgenerator**

Lässt man hingegen den Schalter entfallen und steuert den Eingang des Integrators mit einem Rechteckgenerator an (Abbildung 28 unten), so gibt dieser, da der Rechteckgenerator konstant fallende und steigende Flankensignale ausgibt, eine Dreiecksspannung ab. Voraussetzung ist eine um die Nulllinie symmetrische Rechteckspannung des Generators.

In der nächsten Folge unserer Reihe beschäftigen wir uns mit weiteren frequenzabhängigen Operationsverstärker-Schaltungen.