

## Signalflussdiagramme als Hilfsmittel zum Verständnis von Systemen und Schaltungen (3/3)

# Wie stelle ich meine Signale elektronisch dar?

Traditionell stellt man Signale in Verstärkern und Filtern als Spannungen dar, obwohl eine Darstellung durch Ströme, elektrische Ladungen oder Zeitdifferenzen auch möglich wäre. Wir zeigen hier den Unterschied zwischen Spannungs- und Strom-Signalverarbeitung auf und wie dieser hilft, die Faustregel «Das Produkt von Verstärkung und Bandbreite ist konstant» zu brechen.

» Dr. Hanspeter Schmid und Dr. Alex Huber, Institut für Mikroelektronik, FHNW

Viele Hörgeräte haben noch heute eine Telefonspule eingebaut: sie empfängt magnetische Audiosignale im Basisband. Solche Systeme sind oft in Kirchen im Einsatz; dort ist die Sendeantenne typischerweise eine Drahtschleife um den ganzen Raum herum. Dies ist zwar eine sehr archaische Art der Signalübertragung, hat aber den grossen Vorteil, dass man auch magnetische Signale aus Lautsprechern aufnehmen kann. Es ist so

zum Beispiel möglich, mit einem Kopfhörer Musik zu hören, ohne dass das Hörgerät die Umgebungsgeräusche überträgt.

### Es gibt zwei Arten der Signalgewinnung

Aus dem Magnetfeld lässt sich auf zwei Arten ein Signal gewinnen: den Strom messen und verstärken oder die Spannung messen und integrieren. Mathematisch kommt es auf das Gleiche heraus, aber die nichtidealen Effekte verhalten sich ganz anders. Zum Beispiel bestimmt im ersten Fall die Grösse der Spule die untere Bandgrenze und der Stromverstärker die obere Grenze, im zweiten Fall ist es gerade umgekehrt. Es lohnt sich in solchen Fällen oft, alle Möglichkeiten anzuschauen und miteinander zu vergleichen, insbesondere wenn «man es immer schon so gemacht hat».

### Die heisse Frage: Strom oder Spannung verarbeiten?

Die Frage, wie man Signale elektronisch am besten repräsentiert, ist alt, aber so richtig losgetreten wurde sie in den Siebzigerjahren. Sehr schön zeigen lässt sich das mit den sogenannten Current-Feedback-OpAmps (CFB-OpAmp). Bild 1 zeigt die gleiche Schaltung – einen positiven Verstärker – mit einem OpAmp OPA 690 und einem CFB-OpAmp OPA 860 (Bitte beachten: Wir bezeichnen Widerstände immer mit ihren Leitwerten). Das Innenleben der zwei Verstärker ist auch gezeigt: Der OPA 690 macht, wie die meisten OpAmps, im Prinzip aus der Eingangsdifferenzspannung einen Strom, lässt den in eine Kapazität fliessen und buffert den Ausgang. Wegen seiner hohen Verstärkung regelt sich

die Schaltung in Bild 1 so ein, dass die Eingangsdifferenzspannung nahezu null wird.

Der OPA 860 jedoch buffert die Spannung vom positiven zum negativen Eingang und spiegelt dann den Strom im negativen Eingang auf eine Kapazität. Die Spannungsdifferenz ist also auch ohne Rückkopplung null, hier führt die hohe Verstärkung dazu, dass in Bild 1 der Strom in den negativen Eingang hinein nahezu null wird. Beide Verstärker erfüllen also die goldenen OpAmp-Regeln (Eingangsdifferenzspannung null, Eingangsstrom null), aber sie erreichen das auf andere Weise. In den zugehörigen Signalflussdiagrammen wird der Unterschied sehr schön sichtbar.

### Die gebrochene Faustregel

Im letzten Artikel der Serie Fokus Mikroelektronik (Polyscope-Ausgabe 11/11) kamen wir auf die bekannte Faustregel, die besagt, dass das Produkt aus Closed-Loop-Gain A und Bandbreite B (Gain-Bandwidth Product GBWP) beim OpAmp konstant ist. Aus den Signalflussdiagrammen lassen sich diese Grössen für beide Schaltungen ableiten:

$$A_{690} = A_{860} = \frac{G_1 + G_2}{G_2},$$

$$B_{690} = \frac{G_2}{G_1 + G_2} \cdot \frac{g_m}{C}; \quad B_{860} = \frac{G_2}{C},$$

$$GBWP_{690} = \frac{g_m}{C}; \quad GBWP_{860} = \frac{G_1 + G_2}{C}.$$

Beim CFB-OpAmp lässt sich also die Verstärkung mit dem Leitwert  $G_1$  einstellen, ohne dass sich die Bandbreite ändert! Und dieser Bruch einer alten Faustregel verschafft

### Infobox

Das Institut für Mikroelektronik der FHNW hat die mikroelektronische Signalerfassung und Signalverarbeitung seit Jahren im Zentrum seiner Forschungstätigkeit; das geht von Systemen mit sehr kleinen Signalfrequenzen (z.B. Beschleunigungssensoren mit Signalen bis zu 300 Hz oder Messelektronik für eine Schiebellehre) hoch zu extrem schnellen Systemen (z.B. digitale Datenübertragung zwischen zwei IC mit 40 GBit/s auf einer differenziellen Leitung). In all diesen Projekten geht es vor allem darum, die nicht-idealen Effekte gut zu verstehen und dann den Signalmodus und die Designdetails möglichst gut anpassen zu können und vor allem die Leistungsaufnahme der Elektronik zu minimieren. Dabei geht es darum, einen Erfahrungsschatz aufzubauen, da es zu zeitaufwendig ist, sich alle notwendigen Überlegungen immer von vorne zu machen. Spannungs-, Strom- und Ladungsverarbeitung setzt das IME dabei schon lange in vielen Projekten routiniert ein; mit der Time-Mode-Signalverarbeitung (Darstellung von Signalen als Zeitdifferenzen) befasst sich das IME aber erst seit diesem Jahr, vorerst einmal mit Projekten für Studentinnen und Studenten.

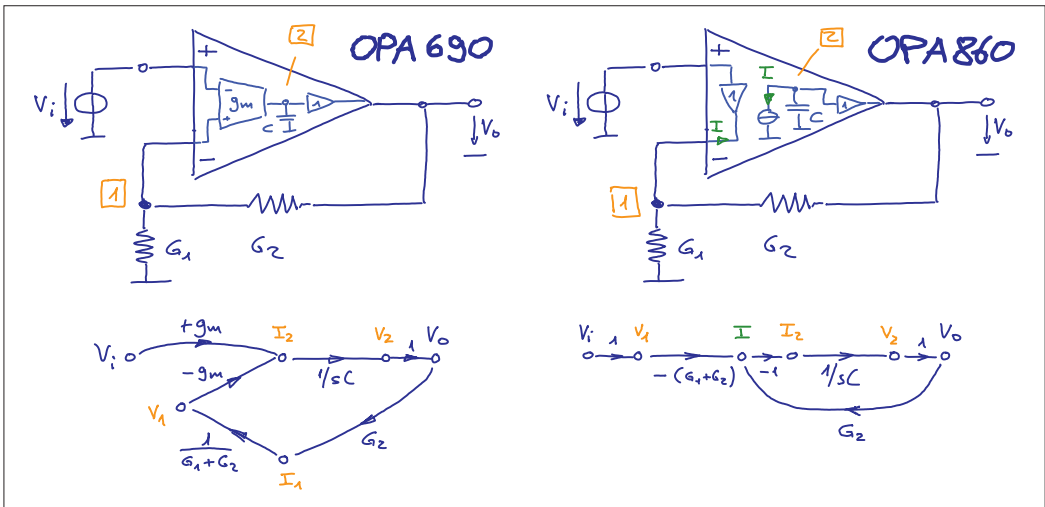


Bild 1: Positive Verstärker mit OpAmp und Current-Feedback-OpAmp und die zugehörigen Signalflussdiagramme

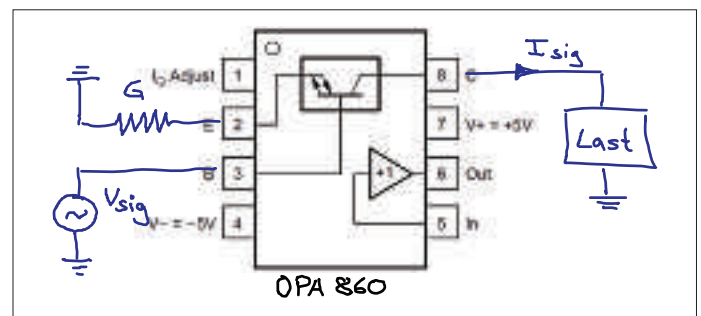
te dem CFB-OpAmp in den Achtziger- und Neunzigerjahren sehr viel Aufmerksamkeit. Solche Verstärker kommen vor allem dann zur Anwendung, wenn man die Verstärkung im Betrieb verändern muss, ohne dass sich das Frequenzverhalten wesentlich ändert; viele Line Driver für DSL-Modems (z.B. der AD8016) sind deshalb CFB-OpAmps, und digital programmierbare Widerstände sind für solche Anwendungen auch erhältlich.

Natürlich ist ein CFB-OpAmp auch kein Wundergerät; um hohe Verstärkungen zu erreichen, muss man  $G_1$  im Vergleich zu  $G_2$  sehr gross machen, aber wenn der Leitwert  $G_1$  ähnlich gross wird wie der Eingangsleitwert des CFB-OpAmp, dann bricht die Verstärkung ein.

**Der OPA 860 und der AD 844 im Labor**

Der OPA 860 und der AD 844 haben im Vergleich zu anderen CFB-OpAmps noch eine Besonderheit: der Punkt, an dem die Kapazität  $C$  hängen soll, ist auf einen Pin herausgeführt. Das macht es möglich, diese Verstärker als Stromspiegel zu «missbrauchen». Das war ursprünglich von den Herstellern nicht vorgesehen. Der ältere AD 844 und der OPA 660 (der Vorgänger des OPA 860) wurden aber so häufig «missbraucht», dass mehrere Stromspiegelanwendungen nun im Datenblatt des OPA 860 erwähnt sind. Bild 2 zeigt die einfachst mögliche Schaltung, mit der sich eine Spannung über einen Widerstand mit Leitwert  $G$  in einen Strom umsetzen lässt. Die Bandbreite dieser Schaltung ist grösser als 100 MHz, und sie ist immer stabil, da sie kein Feedback hat! Die Autoren dieses Artikels haben immer OPA 860 an Lager, um im

Bild 2: Eine Stromquelle für den Labortisch



Labor ganz schnell einen Spannungssignalgenerator in einen Stromsignalgenerator umzubauen, wenn ein zu testendes Teil (DUT) einen Stromeingang hat.

**Was denn nun: Strom oder Spannung?**

Das beantwortet nun nicht eine Frage, welche die Fachleute seit den Achtzigerjahren beschäftigt: Soll ich nun Spannungsdifferenzen (Voltage-Mode-Signal-Processing) oder Ströme (Current-Mode SP) verarbeiten? Oder – wie in den letzten Jahren aufgekommen – soll ich die Signale als elektrische Ladungen verarbeiten – «Charge-Mode SP» – oder gar als Zeitdifferenzen darstellen (Time-Mode SP)? Die Antwort darauf kann nie allgemeingültig ausfallen.

Der Streit um Current Mode gegen Voltage Mode wurde mit zwei Publikationen von Barrie Gilbert («Current Mode, Voltage Mode, or Free Mode? A Few Sage Suggestions» AICSP, pp. 83 – 101, 2004) und Hanspeter Schmid («Why Current Mode Does Not Guarantee Good Performance» Analog Integrated Circuits and Signal Processing (AICSP), pp. 79 – 90, 2003) entschieden; beide Arbeiten spre-

chen sich dagegen aus, das allgemein zu diskutieren, und dafür, konkrete Fragestellungen genau anzuschauen und von Fall zu Fall neu zu entscheiden.

**Signalverarbeitungsmethode ist Thema des nächsten Artikels**

Im nächsten Artikel der Serie Fokus Mikroelektronik stellen wir eine Signalverarbeitungsmethode vor, welche fast nur auf integrierten Schaltungen verwendet wird: die Signalverarbeitung mit elektrischen Ladungen – «Charge-Mode SP» genannt – mithilfe von Switched-Capacitor-Schaltungen. Diese Schaltungen sind heute in IC weit verbreitet, vor allem werden sie in hochgenauen Analog-Digital-Wandlern (sogenannten Sigma-Delta-Wandlern) verwendet; diese werden das Thema der darauf folgenden zwei Artikel im Fokus Mikroelektronik sein. <<

**Infoservice**

Hanspeter Schmid, FHNW/IME  
Steinackerstrasse 1, 5210 Windisch  
Tel. 056 462 46 25  
hanspeter.schmid@fhnw.ch, www.fhnw.ch/ime/