

# Switched-Capacitor-Filter Teil 1

**Dieser zweiteilige Artikel stellt zunächst im ersten Teil die theoretischen Grundlagen und die Funktionsweise von Switched-Capacitor-Filtern vor. Im zweiten Teil folgt die Beschreibung einer Software zum einfachen Filterdesign mit praktischen Anwendungsbeispielen.**

## Allgemeines

Switched-Capacitor- (SC-) Filter erfreuen sich zunehmender Beliebtheit durch besonders günstige Eigenschaften:

- Ausgezeichnete technische Daten
- Einfache Anwendung
- Gute Reproduzierbarkeit
- Hohe Genauigkeit
- Variable Grenzfrequenz
- Preiswerte Bausteine

Durch die Filterstruktur sind mit einem Baustein gleich mehrere Filterfunktionen, wie Tiefpaß, Hochpaß, Bandpaß, Bandsperr und Allpaß realisierbar,

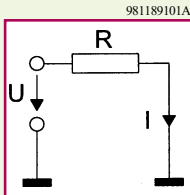
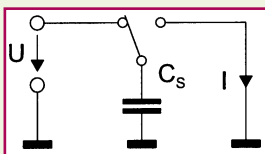


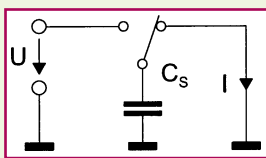
Bild 1a: Zu ersetzender Widerstand



981189102A

Bild 1b: Aufladung des Ersatzkondensators

Bild 1c: Ladeübertragung durch Umschalten



981189103A

wobei sich der externe Schaltungsaufwand auf wenige Widerstände und Blockkondensatoren beschränkt.

Für die Dimensionierung stehen Filter-CAD-Programme zur Verfügung, die das Filterdesign stark vereinfachen. Damit ist auch der mathematisch nicht so versierte Anwender in der Lage, SC-Filter zu dimensionieren.

## Grundprinzip

Die gängigen aktiven Filter bestehen aus Operationsverstärkern als aktive Elemente sowie Widerständen und Kondensatoren als passive Bauelemente zur Frequenzbestimmung. Eine Frequenzvariation ist hierbei durch Verändern von R oder C möglich, durchstimmbare Filter sind schwer realisierbar.

Es besteht die Möglichkeit, einen Widerstand durch einen geschalteten Kondensator, einen „Switched Capacitor“, zu simulieren. Das Prinzip ist in Abbildung 1 dargestellt. Abbildung 1a zeigt den zu ersetzenden Widerstand mit

$$I = \frac{U}{R}$$

Verbindet der Umschalter in Abbildung 1b die Kapazität Cs mit der Eingangsspannung U, so erhält die Kapazität Cs die Ladung

$$Q = C_s \cdot U$$

In Abbildung 1c ist der Schalter umgelegt, und der Kondensator gibt die erhaltene Ladung wieder ab. In jeder Schalterperiode  $T_s$  überträgt der Kondensator die Ladung  $Q = C_s \cdot U$  vom Eingang zum Ausgang der Schaltung. Es entsteht ein Stromfluß, der sich im Mittel zu

$$I = \frac{C_s \cdot U}{T_s}$$

einstellt. Ersetzt man die Schalterperiode  $T_s$  durch die Schaltfrequenz  $f_s$  mit  $T_s = 1/f_s$ , so erhält man für den übertragenen Strom

$$I = C_s \cdot U \cdot f_s.$$

Ein Vergleich dieser Formel mit dem Ohmschen Gesetz zeigt, daß sich der Widerstand R durch die geschaltete Kapazität  $1/(C_s \cdot f_s)$  ersetzen läßt. Besonders interessant daran ist, daß zwischen Schaltfrequenz und Leitwert ein linearer Zusammenhang besteht, den man sich bei SC-Filtern zu Nutze macht. Denn durch die Schaltfrequenz lassen sich somit die in der Schaltung vorkommenden Widerstände und die davon abhängigen Grenzfrequenzen variieren. Man erhält ein mit der Schaltfrequenz abstimmbares Filter.

## SC-Integrator

Abbildung 2a zeigt einen herkömmlichen Integrator in RC-Technik. Die Übertragungsfunktion  $F(p)$  dazu lautet:

$$F(p) = \frac{U_a(p)}{U_e(p)} = \frac{-1}{p \cdot \tau} \text{ mit } \tau = R \cdot C$$

Der ohmsche Widerstand R kann, wie in Abbildung 2b gezeigt, durch einen geschalteten Kondensator ersetzt werden. Damit erhält man einen SC-Integrator mit einer von der Schaltfrequenz abhängigen Integrationszeitkonstante

$$\tau = R \cdot C = \frac{C}{C_s \cdot f_s}$$

Die Verwendung geschalteter Kapazitäten bietet zusätzlich den Vorteil, daß auch ein nicht invertierender Integrator, der in herkömmlicher Technik aus invertierendem Integrator und nachgeschaltetem Inverter besteht, einfach aufzubauen ist. Die Vorzeichenänderung läßt sich beim SC-Integrator erzeugen, indem der auf die Ein-

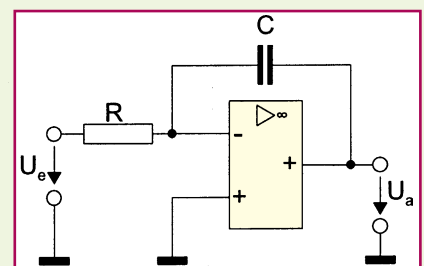
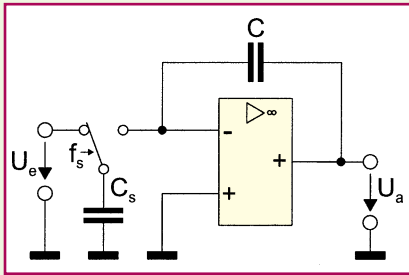


Bild 2a: Herkömmlicher RC-Integrator

981189104A



981189105A

**Bild 2b: Ersatz des Widerstandes R durch eine geschaltete Kapazität**

gangsspannung aufgeladene Kondensator während der anschließenden Ladungsübertragungsphase mit vertauschten Anschlüssen an den OP-Eingang gelegt wird. Dies ist durch einen weiteren Umschalter S2, der gleichzeitig mit S1 schaltet, leicht realisierbar. Abbildung 3a zeigt diese Anordnung, 3b zeigt das Schaltzeichen eines solchen nicht invertierenden SC-Integrators. Die Übertragungsfunktion dazu lautet:

$$F(p) = \frac{U_a(p)}{U_e(p)} = \frac{1}{p \cdot \tau}$$

mit  $\tau = R \cdot C = \frac{C}{C_s \cdot f_s}$

### SC-Filter erster Ordnung

Die beiden Grundschaltungen für SC-Integratoren lassen sich um einen Gegenkopplungswiderstand Rg erweitern, womit ein Tiefpaß erster Ordnung entsteht, siehe Abbildungen 4a und 4b.

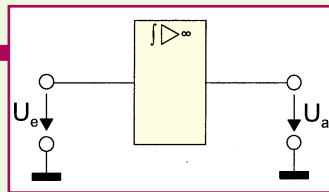
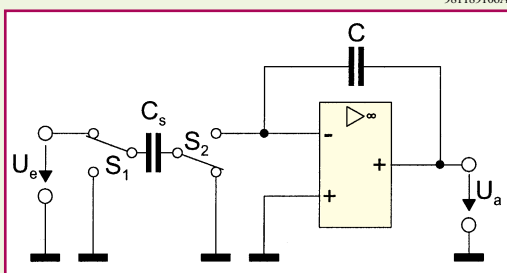
Für die Realisierung von SC-Filtern wird jedoch üblicherweise eine andere Grundstruktur gewählt, die aus einem nicht invertierenden SC-Integrator, einem vorgeschalteten Summierer und 3 Widerständen besteht, siehe Abbildung 5. Berechnet man die Übertragungsfunktionen für die Ausgangsspannung des OPVs und des SC-Integrators, erhält man sowohl eine Hochpaß- als auch eine Tiefpaß-Filterfunktion.

### SC-Filter zweiter Ordnung

SC-Filter zweiter Ordnung sind meistens als sogenannte „Biquad“-Struktur mit 2 SC-Integratoren ausgeführt, wie in Abbildung 6 dargestellt. Neben der Hochpaß- und der Tiefpaß-Filterfunktion erhält man zusätzlich eine Bandpaß-Funktion.

**Bild 3a: Aufbau eines nicht invertierenden SC-Integrators**

981189106A

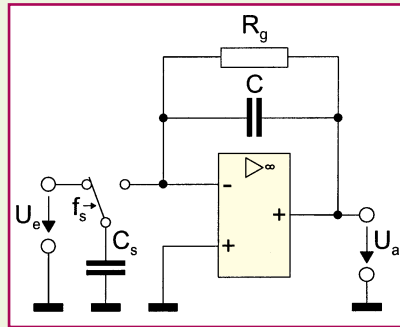


981189107A

**Bild 3b: Schaltzeichen eines nicht invertierenden SC-Integrators**

### Integrierte SC-Filter

Vorgenannte Schaltungen werden in der Praxis selbstverständlich nicht diskret aufgebaut, sondern in integrierter Form inklusive Schaltern, Kondensatoren und OPVs



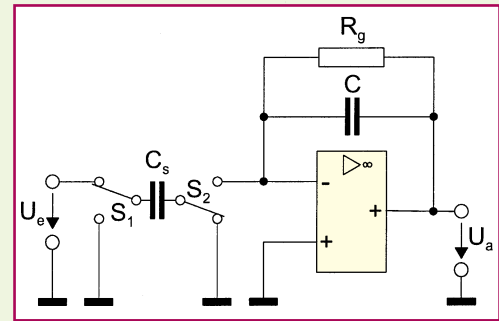
981189108A

**Bild 4a: SC-Tiefpaß erster Ordnung, invertierend**

gefertigt. Neben vereinfachter Anwendung bietet dies den Vorteil veringert parasitärer Effekte und die Möglichkeit, Kapazitätsverhältnisse mit 0,1% Toleranz herstellen zu können. Somit ist eine hohe Genauigkeit gewährleistet. Alle Kapazitäten sind derselben Temperatur ausgesetzt, wodurch sich Temperatureinflüsse kompensieren. Die äußere Beschaltung beschränkt sich auf Widerstände, die den Filterverlauf bestimmen, und Blockkondensatoren.

### Hinweise zum praktischen Einsatz von SC-Filtern

In Anbetracht aller Vorzüge dieser Filtertechnik muß jedoch beachtet werden, daß es sich bei SC-Filtern um Abtastsysteme handelt, d. h. die Schaltfrequenz der Kapazität stellt die Abtastfrequenz dar. Aufgrund dessen unterliegt der Ein-



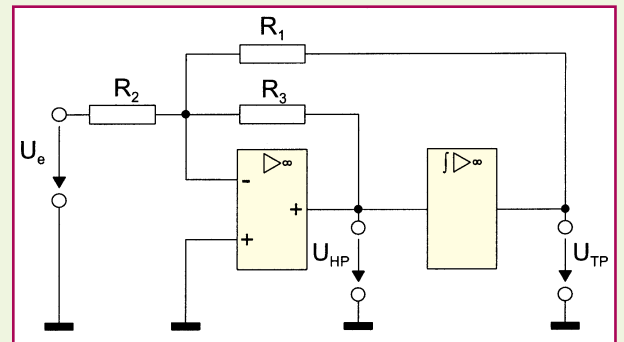
981189109A

**Bild 4b: SC-Tiefpaß erster Ordnung, nicht invertierend**

satz gewissen Einschränkungen:

Bei Verletzung des Abtasttheorems muß mit unerwünschten Mischprodukten im Basisband gerechnet werden (Aliasing). Das Basisband darf deshalb keine Frequenzanteile oberhalb der halben Schaltfrequenz fs enthalten. Zur Sicherstellung ist ein analoges Vorfilter erforderlich, das bei fs/2 eine genügend hohe Dämpfung aufweist. Da bei üblichen SC-Filtern die Schaltfrequenz 50 bis 100 mal so groß ist wie die Grenzfrequenz, reicht hier ein einfaches Filter 2ter Ordnung aus.

Das Ausgangssignal eines SC-Filtern besitzt immer einen treppenförmigen Verlauf, weil sich die Ausgangsspannung nur im Schaltmoment ändert. Es ist eventuell



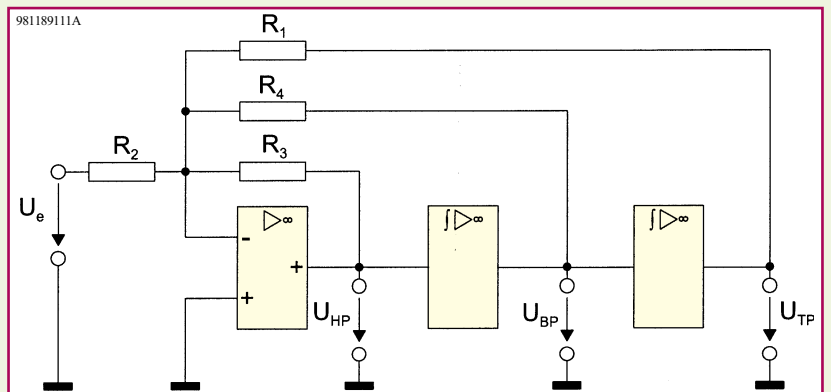
981189110A

**Bild 5: SC-Integrator und Summierer ergeben Hoch- und Tiefpaß-Filterfunktionen.**

auch ausgangsseitig ein analoges Glättungsfilter vorzusehen. Weiterhin entsteht durch das Schalten ein Grundrauschen, das den Signal-Störabstand auf 70 dB bis 90 dB reduziert.

Für die einfache Dimensionierung stellen wir im zweiten Teil eine Filter-CAD-Software nebst praktischen Anwendungen vor.

ELV



**Bild 6: Biquad-Struktur mit Hoch-, Band- und Tiefpaß-Filterfunktion**