Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 76 (1985)

Heft: 7

Artikel: Eine Einführung in die Schalter-Kondensator-Filter

Autor: Grünigen, D. von

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904587

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Eine Einführung in die Schalter-Kondensator-Filter

D. von Grünigen

Schalter-Kondensator-Filter (Switched-Capacitor Filters) sind Filter, welche aus Schaltern, Kondensatoren und Verstärkern bestehen. Sie werden vielfach auch als geschaltete Kondensator-Filter oder SC-Filter bezeichnet. Da diese Filter vollständig in MOS-Technologie integriert werden können, haben sie in letzter Zeit beträchtlich an Bedeutung gewonnen. Im nachfolgenden Bericht wird versucht, Funktionsweise, Entwurf, Realisierung und Eigenschaften dieser Filter einfach verständlich und ohne grossen mathematischen Aufwand zu beschreiben.

Les filtres à capacités commutées (Switched-Capacitor Filters) sont des structures composées uniquement de commutateurs, de condensateurs et d'amplificateurs. Etant intégrées entièrement en technologie MOS, ces structures ont fortement gagné d'importance ces dernières années. L'aperçu présenté ici est destiné à expliquer le fonctionnement, le développement, la réalisation et le comportement de ces filtres de façon simple et sans faire appel à des connaissances mathématiques poussées.

Adresse des Autors:
Dr. *D. von Grünigen*, Ingenieurschule, 3400 Burgdorf.

1. Einleitung

Die ersten Filter, die vor etwas mehr als sechzig Jahren entwickelt wurden, waren ausschliesslich passive LC-Filter. Aus Kosten- wie auch aus Platzgründen suchte man nach Möglichkeiten, die Spulen durch andere Bauelemente zu ersetzen. Dies gelang, indem anstelle der Spulen aktive RC-Schaltungen, d.h. Schaltungen aus aktiven Elementen (meist Operationsverstärkern), Widerständen und Kondensatoren verwendet wurden. Wie in der Digitaltechnik kam auch in der Analogtechnik der Wunsch auf, vollintegrierte Schaltungen herzustellen. Aktive RC-Schaltungen sind dafür allerdings nicht geeignet, da man in der IC-Technologie nur sehr ungenaue Widerstände und Kondensatoren mit kleinen Kapazitäten herstellen kann. Ein wichtiger Durchbruch gelang mit der Einführung der Schalter-Kondensator-Filter (SC-Filter). In dieser Technik ersetzt man die Widerstände durch Schalter und Kondensatoren, beides Elemente, die sich hervorragend zur Integration in der MOS-Technologie eignen. Heute werden neben Filtern auch andere Funktionsblöcke wie z.B. Komparatoren, Schmitt-Trigger, VCO, PLL, AD- und DA-Wandler in der SC-Technik hergestellt [1; 2].

2. Funktionsprinzip

2.1 Widerstand

Zur Einführung werden die beiden Schaltungen in Figur 1 miteinander verglichen. In Figur 1a ist ein Widerstand, in Figur 1b ein geschalteter Kondensator zwischen zwei Spannungsquellen eingefügt. Gemäss dem Ohmschen Gesetz gilt für den Widerstand:

$$i = \frac{1}{R}(u_1 - u_2) \qquad (1)$$

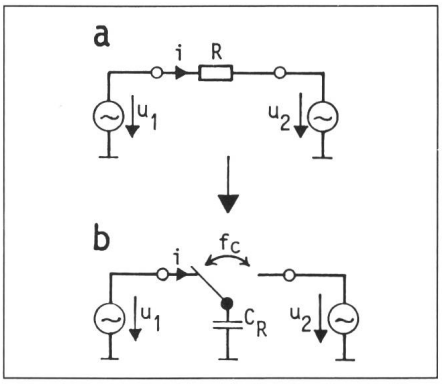

Fig. 1 Widerstand
a ohmscher Widerstand
b geschalteter Kondensator
f_c Clockfrequenz

Im weiteren betrachtet man die Anordnung in Figur 1b. Legt man den Schalter nach rechts, dann wird der Kondensator auf die Spannung u_2 entsprechend der Ladung $q_2 = C_R u_2$ aufgeladen, legt man ihn nach links, dann wird auf die Spannung u_1 umgeladen. Die Ladung beträgt jetzt $q_1 = C_R u_1$ und die Ladungsdifferenz $\Delta q = C_R(u_1 - u_2)$. Ist Δt die Zeit zwischen zwei Umladephasen, so hat der mittlere Strom i folglich den Wert

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} C_R(u_1 - u_2) = f_c C_R(u_1 - u_2) \qquad (2)$$

Die Schalterfrequenz (Clockfrequenz) f_c ist der reziproke Wert von Δt. Wie später gezeigt wird, benötigt man zur Realisierung eines Umschalters zwei Schalter, die durch zwei um 180° phasenverschobene Clockspannungen gesteuert werden. Gemäss (2) verhält sich ein geschalteter Kondensator infolgedessen in erster Näherung wie ein Widerstand. Ein Koeffizientenvergleich ergibt den äquivalenten Widerstand

$$R = \frac{1}{f_c C_R} \qquad (3)$$

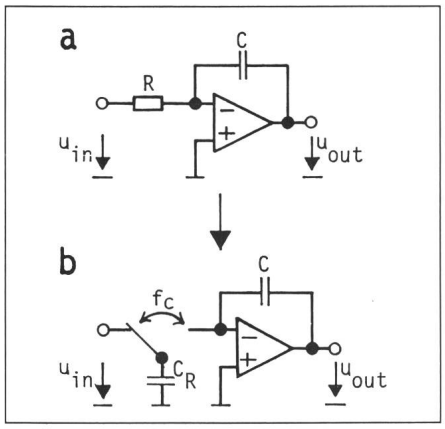

Fig. 2 Integrator
a aktiver RC-Integrator
b SC-Integrator

Diese Äquivalenz gilt allerdings nur dann, wenn die Signalfrequenz viel kleiner ist als die Clockfrequenz.

2.2 Integrator

Ein wichtiger Grundbaustein bei vielen aktiven Filtern ist der Integrator (Fig. 2a). Diesen kann man jetzt auf einfache Weise in einen SC-Integrator überführen (Fig. 2b). Für die Ausgangsspannung ergibt sich

$$u_{out} = -\omega_I \int_{-\infty}^{t} u_{in}\, d\tau \qquad (4a)$$

wobei ω_I die Integrationskonstante ist. Sie berechnet sich beim Analogintegrator zu

$$\omega_I = \frac{1}{RC} \qquad (4b)$$

und beim SC-Integrator zu

$$\omega_I = f_c \frac{C_R}{C} \qquad (4c)$$

ω_I liegt bei Audiofrequenzfiltern in der Grössenordnung von $10^4\,s^{-1}$. Vernünftige Widerstands- und Kapazitätswerte in der MOS-Technologie liegen unterhalb von 1 MΩ und 100 pF. Deshalb können in dieser Technologie nur RC-Integratoren gebaut werden, deren Integratorkonstanten grösser als $10^4\,s^{-1}$ sind. Diesen Nachteil haben SC-Integratoren nicht. Wie man aus (4c) entnehmen kann, lässt sich durch geeignete Wahl von f_c praktisch jede beliebige Integratorkonstante einstellen. Die Kapazitäten C_R und C liegen in der Grössenordnung von 1 pF und 10 pF jedenfalls haben sie Werte, die kleiner als etwa 100 pF sind. Da ausserdem das Kapazitätsverhältnis C_R/C sehr genau ist und seine Toleranz nur wenige Promille beträgt, lassen sich in der SC-Technik Integratoren und Filter hoher Präzision herstellen, ohne dass ein Abstimmen der Komponenten notwendig ist.

2.3 Filter

Zum Bau von Filtern benötigt man Integratoren mit mehreren Eingängen. Dabei wird der einfache SC-Integrator durch zusätzliche geschaltete Kondensatoren am Eingang ergänzt. Eine mögliche Erweiterung des einfachen Integrators von Figur 2a zeigt die Figur 3a. Diese lässt sich folgendermassen analysieren:

$$i_1 + i_2 + \ldots = -i = -C\,\frac{du_{out}}{dt} \qquad (5a)$$

Entsprechend (2) gilt näherungsweise

$$i_1 = f_c\, C_1 u_1 \qquad (5b)$$

$$i_2 = f_c C_2 (u_3 - u_2) \qquad (5c)$$

Nach Einsetzen von (5b) und (5c) in (5a) und Integration erhält man

$$u_{out} = -\omega_{I1} \int_{-\infty}^{t} u_1\, d\tau - \omega_{I2} \int_{-\infty}^{t} (u_3 - u_2)\, d\tau - \ldots \qquad (5d)$$

wobei

$$\omega_{I1} = f_c\,\frac{C_1}{C} \quad \text{und} \quad \omega_{I2} = f_c\,\frac{C_2}{C} \qquad (5e)$$

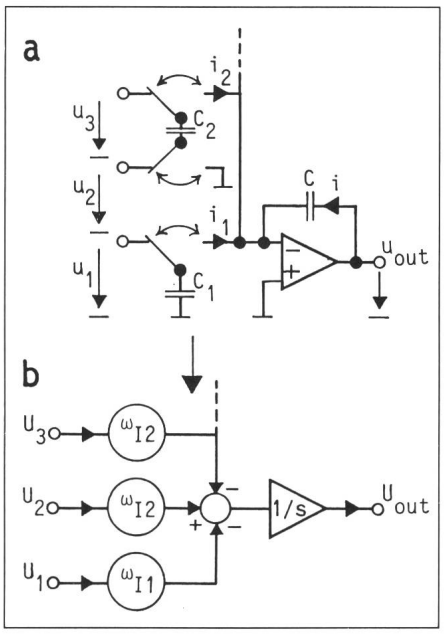

Fig. 3 Integrator mit mehreren Eingängen
a Schaltung
b Signalflussbild

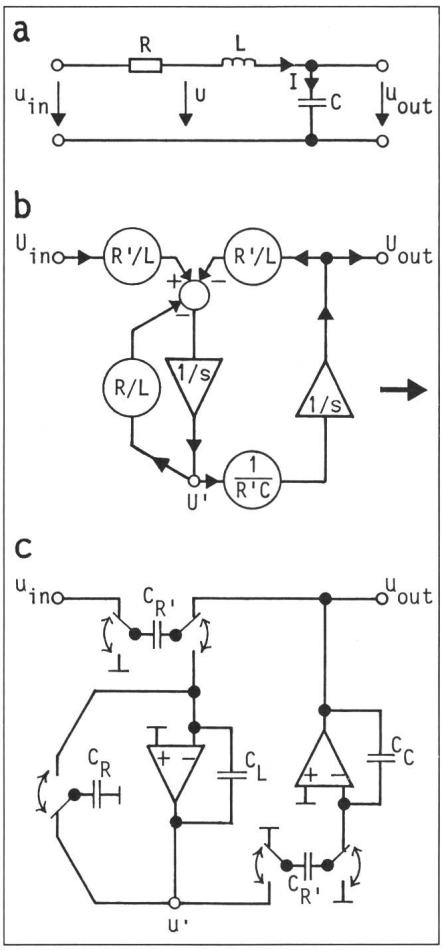

Fig. 4 Synthese eines SC-Filters
a RLC-Filter
b Signalflussbild
c Realisierung durch SC-Schaltung

Schreibt man (5d) im komplexen Frequenzbereich mit s als komplexer Frequenzvariable und setzt man die Anfangsbedingungen auf Null, so erhält man:

$$U_{out} = -\frac{\omega_{I1}}{s} U_1 - \frac{\omega_{I2}}{s} (U_3 - U_2) - \ldots \qquad (6)$$

Aus dieser Gleichung lässt sich das Signalflussbild (Fig. 3b) für die Schaltung in Figur 3a herleiten. Dieser erweiterte SC-Integrator ist der grundlegende Baustein zum Entwurf von Schalter-Kondensator-Filtern.

3. Entwurf

Am Beispiel eines Tiefpassfilters 2. Ordnung soll im folgenden der Entwurf von SC-Filtern demonstriert werden. Ausgangspunkt ist dabei ein RLC-Serieschwingkreis, der als Tiefpass geschaltet ist (Fig. 4a). Die dazugehörigen Netzwerkgleichungen wer-

den so geschrieben, dass sie möglichst nur Integration enthalten:

$$U = U_{in} - RI$$

$$I = \frac{1}{sL}(U - U_{out}) \qquad (7)$$

$$U_{out} = \frac{1}{sC} I$$

Nun wird die erste in die zweite Gleichung eingesetzt und diese beidseitig mit einem Skalierungswiderstand R' multipliziert. Setzt man $U' = R'I$, so erhält man die folgenden Gleichungen:

$$U' = \frac{R'}{sL}(U_{in} - U_{out}) - \frac{R}{sL} U' \qquad (8)$$

$$U_{out} = \frac{1}{sR'C} U'$$

Analog zu Figur 3b kann dieses Gleichungssystem grafisch dargestellt (Fig. 4b) und mit Hilfe von SC-Integratoren realisiert werden (Fig. 4c).

Mit dieser Entwurfsmethode kann jedes beliebige LC- in ein SC-Netzwerk überführt werden. Es lässt sich zeigen, dass dabei die günstigen Sensitivitätseigenschaften von LC-Netzwerken bezüglich den Bauelementtoleranzen erhalten bleiben.

Neben dem hier beschriebenen gibt es eine ganze Reihe von Entwurfsverfahren. Eines davon beruht z.B. auf der Kaskadierung von Filterblöcken zweiter Ordnung. Im Rahmen dieser Einführung wird auf eine weitergehende Behandlung dieser Verfahren verzichtet.

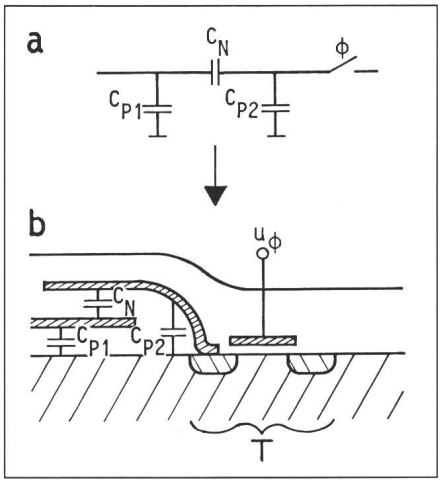

Fig. 5 Realisierung eines geschalteten Kondensators

C_N Nutzkapazität
C_{P1}/C_{P2} parasitäre Kapazitäten
T Schalttransistor
U_Φ Clockspannung
Oxid
Polysilizium als Leiter
p-Substrat
Source und Drain (n-dotiert)

Filtertypen Tabelle I

Typ	Signalverarbeitung	
	bezüglich der Zeit	bezüglich der Amplitude
LC- und aktive RC-Filter	zeitkontinuierlich	wertekontinuierlich
SC-Filter	zeitdiskret	wertekontinuierlich
Digitalfilter	zeitdiskret	wertediskret

4. Technologische Realisierung

Schalter und Kondensatoren mit den nötigen Eigenschaften lassen sich bis jetzt nur in MOS-Technologie herstellen. Deshalb gewannen SC-Filter erst an Bedeutung, als Operationsverstärker mit genügend hoher Verstärkung in dieser Technologie hergestellt werden konnten. MOS-Kondensatoren und insbesondere MOS-Kondensatorenverhältnisse lassen sich sehr genau herstellen. Ausserdem weisen MOS-Kodensatoren ein hervorragendes Gleichlaufverhalten auf, so dass SC-Filter annähernd temperaturunabhängige Frequenzeigenschaften haben. Die Schalter werden mit Hilfe von MOS-Transistoren realisiert und über eine rechteckförmige Spannung am Gate gesteuert. Die Figur 5 zeigt einen Kondensator mit einem Schalter und die dazugehörige technologische Realisierung.

Wie bereits erwähnt, werden Umschalter durch zwei Schalttransistoren verwirklicht, die durch entsprechende Steuerspannungen abwechslungsweise geöffnet und geschlossen werden (Fig. 6). Ein SC-Filter enthält somit zwei Kategorien von Schaltern; eine Kategorie wird von der Clockspannung u_Φ, die andere von der um 180° phasenverschobenen Clockspannung $u_{\bar{\Phi}}$ gesteuert.

Da jeder MOS-Kondensator zusätzlich parasitäre, d.h. unerwünschte Kapazitäten aufweist, ist es wichtig, dass die entsprechende Filterschaltung mindestens bezüglich der grossen, parasitären Kapazität C_{p1} der unteren Platte unempfindlich ist. Wie man nachweisen kann, hat beispielsweise die Schaltung in Figur 4 diese wichtige Eigenschaft.

Die Operationsverstärker haben einen ähnlichen Aufbau wie in der bipolaren Technik; sie bestehen im Prinzip aus einem Eingangsverstärker mit Differentialeingang, einer Kompensationsstufe und einem Ausgangsverstärker. Die Figur 7 zeigt das Schema eines einfachen Operationsverstärkers in CMOS-Technologie.

5. Das SC-Filter als abgetastetes analoges System

Bezüglich der Signalverarbeitung unterscheiden sich SC-Filter grundsätzlich von anderen Filtern. Die Unterschiede sind in der Tabelle I zusammengestellt.

Signaltheoretisch betrachtet, nimmt das SC-Filter eine Mittelstellung zwi-

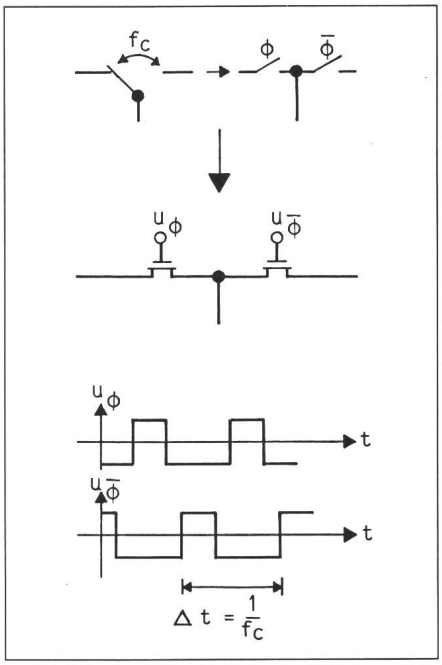

Fig. 6 Realisierung eines Umschalters

$\Phi, \bar{\Phi}$ Clockphasen
$U_\Phi, U_{\bar{\Phi}}$ Clockspannungen

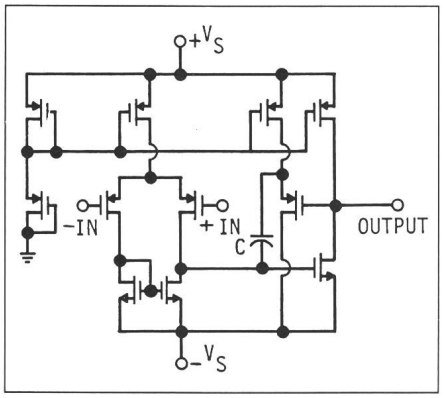

Fig. 7 MOS-Operationsverstärker

schen den LC- und aktiven RC-Filtern einerseits und den Digitalfiltern anderseits ein.

Der Begriff «zeitdiskret» bedeutet, dass das System abgetastete Signale verarbeitet, wie in Figur 8 anschaulich dargestellt ist.

Die Abtastrate oder Abtastfrequenz bei SC-Filtern ist gleich der Clock- oder Schalterfrequenz f_c. Da die Abtastwerte nicht wie bei AD-Wandlern quantisiert werden, ist die Signalverarbeitung, wie in Figur 8 dargestellt, wertekontinuierlich. Digitalfilter enthalten AD-Wandler und verarbeiten daher amplitudenquantisierte oder, mit anderen Worten, wertediskrete Signale. SC-Filter verarbeiten die Signale zeitdiskret und wertekontinuierlich, und man kann sie deshalb auch als abgetastete analoge Systeme bezeichnen.

Die Abtastung hat zur Folge, dass der Frequenzgang des SC-Filters periodisch wird. Dies ist am Amplitudengang eines SC-Tiefpassfilters in Figur 9 veranschaulicht. Diese Periodizität soll anhand der Figur 10 plausibel gemacht werden. Im oberen Teil des Bildes ist ein sinusförmiges Signal der Frequenz $f_o = f_c/8$ mit seinen Abtastwerten dargestellt, darunter ein sinusförmiges Signal der Frequenz $f_c - f_o = 7f_c/8$. Man stellt fest, dass die Abtastwerte der beiden Signale identisch sind. Es sieht so aus, als ob das Signal mit der Frequenz $f_c - f_o$ in ein Signal mit der Frequenz f_o «zurückgefaltet» wor-

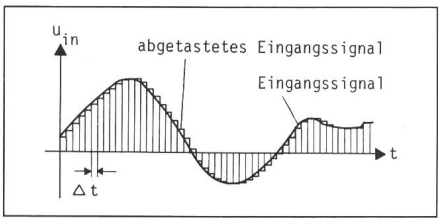

Fig. 8 Abtastung eines Signals

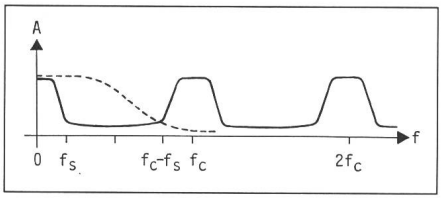

Fig. 9 Amplitudengang

——— SC-Tiefpassfilter
------- Bandbegrenzungsfilter (Antialisingfilter)
f_c Clockfrequenz
f_s Sperrfrequenz des Filters

den wäre. Gemäss dem *Abtasttheorem* gilt allgemein, dass Signale oberhalb von $f_c/2$ zurückgefaltet werden. Um diese Rückfaltungen (Aliasing) zu vermeiden, muss dem SC-Filter ein Bandbegrenzungsfilter, ein sogenanntes Antialiasingfilter, vorgeschaltet werden. Wie sofort einzusehen ist, muss ein solches Filter zeit- und wertekontinuierlich sein und Tiefpasscharakteristik haben. Ein Beispiel dafür ist in Figur 11 dargestellt. Es handelt sich dabei um ein aktives RC-Filter 2. Ordnung.

Der Amplitudengang des Antialiasingfilters ist in Figur 9 gestrichelt eingezeichnet. Wie man sieht, kann auf dieses Filter nur verzichtet werden, wenn das Spektrum der Eingangsspannung auf den Frequenzbereich $0...(f_c - f_s)$ beschränkt ist. Dabei bedeutet f_s die Sperrfrequenz, d.h. die Frequenz, oberhalb der das SC-Filter sperren muss. Da die Grenzfrequenz des Antialisingfilters relativ hoch und ungenau sein darf, kann man dieses Filter vielfach auch als RC-Filter in MOS-Technologie integrieren.

Wie das abgetastete Signal der Eingangsspannung ist auch die Ausgangsspannung eines SC-Filters treppenförmig (Fig. 8). Sollte diese Treppenform stören, was bei genügend grosser Clockfrequenz f_c im allgemeinen nicht der Fall ist, so müsste dem SC-Filter noch ein Glättungsfilter, z.B. gemäss Figur 11, nachgeschaltet werden.

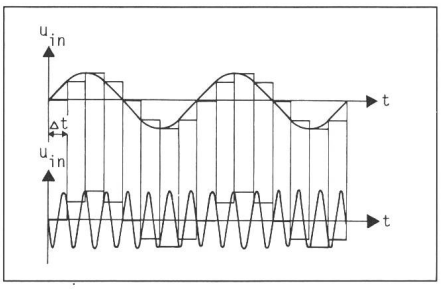

Fig. 10 Aliasing

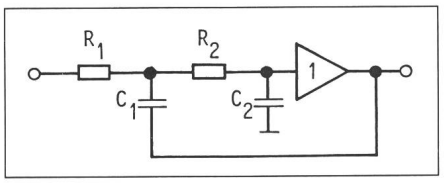

Fig. 11 Aktives RC-Tiefpassfilter

6. Ein Vergleich mit aktiven RC-Filtern

Wie bereits erwähnt, nehmen SC-Filter eine Mittelstellung zwischen aktiven RC-Filtern und Digitalfiltern ein. Bezüglich ihrer Komplexität und Schaltungstechnik weisen sie allerdings mit den aktiven RC-Filtern eine grössere Verwandtschaft auf. Im allgemeinen werden SC-Filter deshalb heute eher dort eingesetzt, wo früher aktive RC-Filter verwendet wurden. Natürlich erschliessen sich dem Anwender auch eine Reihe von neuen Einsatzgebieten, wie aus der Diskussion der Tabelle II hervorgehen wird. Die Werte dieser Tabelle dürfen nur als Richtwerte verstanden werden und dienen allein dazu, das Einsatzgebiet von SC-Filtern abzuschätzen.

Diskussion der Tabelle II

1. Unter der Dynamik versteht man das Verhältnis der maximalen Ausgangsspannung (bei 1% Klirrfaktor) zur Ausgangs-Rauschspannung im Durchlassbereich des Filters. Das Rauschen des SC-Filters wird verursacht durch das Verstärkerrauschen und das Widerstandsrauschen der «On»-Widerstände der Schaltertransistoren; es ist im allgemeinen grösser als bei aktiven RC-Filtern und verringert deshalb die Dynamik.

   Eine zusätzliche Störspannung am Ausgang wird durch den «Clockfeedthrough» verursacht. Darunter versteht man das Übersprechen der Steuerspannung der Schaltertransistoren auf den Ausgang. Da diese Störspannung Spektralkomponenten bei der Clockfrequenz f_c und den Vielfachen davon hat, kann sie wenn nötig durch ein nachgeschaltetes Glättungsfilter unterdrückt werden.

   Eine weitere Störspannung stellt die Offsetspannung am Ausgang dar. Sowohl diese Offsetspannung wie auch der «Clockfeedthrough» können durch einen optimalen Schaltungsentwurf minimiert werden. Prinzipiell gilt aber, dass der

Filtervergleich Tabelle II

Parameter	aktive RC-Filter	SC-Filter
1. Dynamik	80...120 dB	50...90 dB
2. Leistungsbedarf	typ. 5 mW/Op.-Verst.	typ. 1 mW/Op.-Verst.
3. Frequenzbereich	1 Hz...100 kHz	0,1 Hz...100 kHz
4. Temperaturstabilität	15...100 ppm/°C	≪ 1 ppm/°C
5. Integrierbarkeit in MOS-Technologie	teilweise integrierbar	vollständig integrierbar
6. Abgleich	notwendig für Präzisionsfilter	selten notwendig
7. Clockgenerator	-	notwendig
8. Antialiasingfilter	-	vielfach notwendig
9. Glättungsfilter	-	selten notwendig

Störabstand bei aktiven RC-Filtern grösser ist und dass sie deshalb in dieser Beziehung den SC-Filtern vorzuziehen sind.

2. Da die Operationsverstärker bei aktiven RC-Filtern meistens noch in Bipolartechnologie aufgebaut sind, ist der Leistungsbedarf grösser als bei SC-Filtern.
3. Die Frequenzangaben beziehen sich auf die Grenzfrequenz bei Tief- und Hochpassfiltern 2. Ordnung. Die Grenzwerte sind abhängig von der Güte und den Genauigkeitsanforderungen bezüglich der Filtercharakteristik. Je geringer die Güte und die Genauigkeitsanforderungen sind, desto grösser ist der ausnützbare Frequenzbereich. Einen entscheidenden Einfluss hat das Verstärkungs-Bandbreiteprodukt (Transitfrequenz) der Operationsverstärker, das den oberen Grenzfrequenzwert wesentlich herabsetzen oder erhöhen kann. Die angegebenen Zahlenwerte sind nur Trendwerte und können im Einzelfall deutlich abweichen.
4. Die ppm-Angaben beziehen sich auf die Stabilität der Grenzfrequenz. Die Stabilität von SC-Filtern ist um ein vielfaches höher, allerdings nur unter der Voraussetzung, dass die Clockfrequenz stabil ist.
5. Wie bereits erwähnt, lassen sich auch aktive RC-Filter in MOS-Technologie integrieren. Voraussetzungen dazu sind eine hohe Grenzfrequenz (⩾ 5 kHz) und kleine Ansprüche bezüglich der Genauigkeit des Frequenzganges. Diese geringen Anforderungen sind meistens nur bei Antialiasing-Filtern erfüllt.
6. Werden bezüglich dem Frequenzgang hohe Genauigkeitsanforderungen gestellt, d.h. muss die Genauigkeit der Grenzfrequenz besser als z.B. 1% sein, dann müssen die Widerstände des aktiven RC-Filters getrimmt werden. Da SC-Filter vollständig in MOS-Technologie hergestellt werden, können und müssen sie nicht abgeglichen werden. Die Grenzfrequenz von SC-Filtern ist nur von der Clockfrequenz und von Kapazitätsverhältnissen abhängig. Unter der Voraussetzung einer präzisen Clockfrequenz ist dann auch die Grenzfrequenz genau, weil die Kapazitätsverhältnisse sehr kleinen Toleranzen (etwa 0,1%) unterliegen.
   Auf dem Markt sind allerdings auch universelle SC-Filter erhältlich, deren Parameter (wie Grenzfrequenz und Güte) extern mit Widerständen eingestellt werden. Diese Filter müssen analog zu aktiven RC-Filtern abgeglichen werden.
7. Zur Ansteuerung der Schalter benötigen SC-Filter einen Clockgenerator. Vom Aufwand her gesehen, stellt dieser einen Nachteil dar, der aber nicht ins Gewicht fällt, wenn das SC-Netzwerk Teil eines sowieso taktgesteuerten digitalen Systems ist. Vorteilhaft wirkt sich der Clockgenerator jedoch dann aus, wenn das Filter eine variable Grenzfrequenz haben soll. Da diese direkt proportional zu f_c ist, kann sie einfach durch Variieren der Clockfrequenz gesteuert werden. Auf gleiche Weise lassen sich auch Bandpässe mit variabler Mittenfrequenz verwirklichen.
8. Wenn das Spektrum des Eingangssignals nicht frequenzbeschränkt ist, muss dem SC-Filter zur Vermeidung von Rückfaltungsverzerrungen ein analoges Bandbegrenzungsfilter vorgeschaltet werden. Dieses Filter besteht in den meisten Fällen aus einem passiven oder aktiven RC-Netzwerk und stellt einen zusätzlichen Aufwand dar. Da die Anforderungen an dieses Antialiasingfilter meistens gering sind, kann der Aufwand allerdings in Grenzen gehalten werden, besonders dann, wenn das Verhältnis zwischen Clock- und Grenzfrequenz gross (z.B. > 50) gewählt wird.
9. Die Ausgangssignale von SC-Filtern sind treppenförmig. Sollte diese Treppenform stören, so müsste dem SC-Filter ein analoges Filter als Glättungsfilter nachgeschaltet werden. Dies ist aber selten notwendig, besonders dann nicht, wenn das Verhältnis zwischen Clock- und Signalfrequenz gross ist (z.B. > 50).

7. Literatur

Über Schalter-Kondensator-Filter ist in den letzten acht Jahren eine grosse Anzahl von Artikeln erschienen. Die wichtigsten unter ihnen, auf denen auch der vorliegende Aufsatz beruht, sind in den IEEE-Büchern [1] und [3] zusammengefasst. Das letztere behandelt das Gebiet am umfassendsten und enthält sowohl einführende als auch spezielle Artikel über Schalter-Kondensator-Filter. Technologie und analoge IC-Schaltungen sind in [1] beschrieben. Nichtlineare SC-Schaltungen werden in [2] vorgestellt. [4] enthält eine Zusammenstellung der Ende 1983 auf dem Markt erhältlichen SC-Filter.

Literatur

[1] *P.R. Gray, D.A. Hodges* and *R.W. Brodersen:* Analog MOS integrated circuits. New York, IEEE Press, 1980.

[2] *G.S. Moschytz:* MOS switched-capacitor filters: Analysis and design. New York, IEEE Press, 1984.

[3] *B.J. Hosticka* a.o.: Design of nonlinear analog switched-capacitor circuits using building blocks. IEEE Trans. CAS 31(1984)4, p. 354...368.

[4] *H. Lemme:* Schalter-Kondensator-Filter im Überblick. Elektronik 33(1984)1, S. 56.