

17. Dez. 1990

Diss. ETH

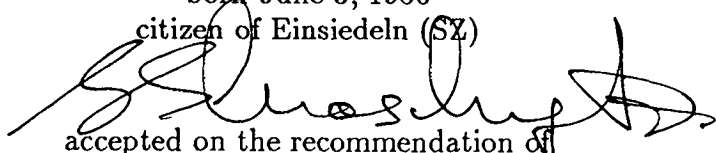
Diss. ETH No. 9299

Contributions to the Exact Design of Switched-Capacitor Filters with Emphasis on Modular Structures and Dynamic Range

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
AUGUST KAELIN
dipl. El. Ing. ETH
born June 3, 1956
citizen of Einsiedeln (SZ)


accepted on the recommendation of
Prof. Dr. G. S. Moschytz, examiner
Prof. Dr. W. Guggenbühl, co-examiner

1990



CatE

Abstract

This thesis presents crucial aspects of the *exact* design of switched-capacitor (SC) filters.

Doubly-terminated LDI-type (discrete-time) LC ladder filters are commonly used as prototype filters in realizing low-sensitivity integrator-based SC ladder filters. In the first part, an exact procedure is presented for the design of such prototype filters realizing *arbitrary elliptic discrete-time transfer functions*. In order to allow an exact SC realization, frequency-dependent termination impedances have to be used. Two alternatives are discussed here: the commonly used $(z^{1/2} + z^{1/2})$ termination and the simpler $z^{1/2}$ termination. It is shown that only the latter one allows any elliptic transfer function, *including highpass filters*, to be transformed into a LDI-type LC ladder prototype filter of non-increased order. Whereas for lowpass and bandpass filters the finally derived SC realizations can also be obtained using alternative design methods, *new* SC ladder circuits are obtained for highpass-type filters. In contrast to those of known SC-filter design procedures, the obtained SC ladder circuits are *stray insensitive and canonical for any order* (i.e., each filter pole is realized with one (two-phase) SC integrator, without the need for additional amplifiers). The superiority of these new highpass ladder circuits over conventional biquad cascades is shown by comparing the corresponding sensitivity and noise measures of a 10th-order ladder example.

In general, many different prototype filter structures and their corresponding SC realizations exist for one single transfer function. In discussing SC structures that are well-suited for use in mask programmable fabrication, a class of prototype filter structures is introduced, and a

systematic, easily programmable procedure for its SC realisation is presented. The proposed prototype filter structures allow the derivation of SC filters in a straightforward and systematic way. The obtained SC circuits are completely stray insensitive and canonical. These circuits are built up with structurally identical, second-order cells connected to each other in a regular way (connections only to neighbouring cells). It is shown that for *any* elliptic transfer function, such a modular SC ladder filter can be obtained.

Besides capacitance spread (i.e., ratio between maximum and minimum capacitance values), noise is a crucial design parameter for SC filters; noise at the output node (for a given input level a measure for the achievable signal-to-noise ratio) is directly dependent on the assignment of the available capacitance area to the individual filter capacitors. A procedure is presented that minimizes either *output noise* or the *magnitude-response error* of an arbitrary, integrator-based SC filter with an optimum capacitance assignment. It is shown that minimum spread is achievable in a whole *region* of possible capacitance assignments, whereas unacceptably large spread-values result for assignments slightly outside this optimum region. It is thus proposed to restrict the optimization to values within this minimum-spread region. Closed-form expressions are derived that express the capacitance spread, the magnitude-response error due to capacitor errors, and the output noise as functions of the capacitance assignment. Based on these formulas, an analytical optimization procedure has been developed. It has been found that remarkable improvements are achievable with the new assignment procedure, e.g., an improvement of almost 9 dB in signal-to-noise-ratio was obtained for a 10th-order bandpass filter using *the same total capacitance* and *the same capacitance spread* as the one based on a conventional capacitance assignment.

Keywords. Exact SC filter design, ladder filter, highpass filter, modular structures, design procedure, noise optimization, sensitivity optimization.

Kurzfassung

Diese Dissertation behandelt verschiedene Aspekte des exakten Entwurfs von gehalteten Kondensatorfiltern (SC-Filter).

Dank geringerer Empfindlichkeit des Amplitudenganges gegenüber Elementvariationen im Durchlassbereich werden für sensitive Anwendungen vorzugsweise SC-Kettenfilter eingesetzt. Der hier diskutierte Kettenfilterentwurf basiert auf beidseitig abgeschlossenen sogenannten LDI-äquivalenten LC-Kettenfiltern. Im ersten Teil dieser Arbeit wird ein Verfahren beschrieben, das solche Prototypfilter exakt aus *jeder beliebigen zeitdiskreten elliptischen Uebertragungsfunktion* ableitet. Um ein in SC-Technik realisierbares Prototypfilter zu erhalten, müssen frequenzabhängige Abschlussimpedanzen verwendet werden. Hier werden zwei mögliche Abschlüsse diskutiert, nämlich der üblicherweise verwendete $(z^{1/2} + z^{-1/2})$ -Abschluss und der einfachere $z^{1/2}$ -Abschluss. Es wird gezeigt, dass der zweite, im Gegensatz zum ersten, für jede denkbare elliptische Uebertragungsfunktion (Hochpassfilter eingeschlossen) ein Prototypfilter liefert, dass sich mit Hilfe von streuinsensitiven (2-phasigen) SC-Integratoren kanonisch simulieren lässt (d.h., pro Filtergrad wird genau ein streuinsensitiver SC-Integrator ohne zusätzliche Verstärker benötigt). Während für Tiefpass- und Bandpassfilter die aus den Prototypfiltern abgeleiteten SC-Schaltungen auch mit konventionellen Verfahren gefunden werden können, liefern die Hochpass-Prototypfilter neue *kanonische* SC-Kettenschaltungen. Die Vorteile dieser neuen Hochpass-Kettenschaltungen werden veranschaulicht, indem Rauschen und Amplitudensensitivität eines Testfilters 10ter Ordnung mit einer entsprechenden Biquadkaskade verglichen werden.

Für eine gegebene Uebertragungsfunktion existieren im allgemeinen

verschiedene Prototyp-Filterstrukturen (und damit auch verschiedene SC-Schaltungen). Um SC-Schaltungen zu erhalten, die sich gut für maskenprogrammierbare Anwendungen eignen, werden Prototyp-Filterstrukturen vorgeschlagen, die systematisch zu modularen SC-Schaltungen führen. Die erhaltenen SC Filter sind streuinsensitiv und enthalten pro Filtergrad genau einen Verstärker. Die Filterschaltungen sind aus Zellen zweiter Ordnung mit identischer Struktur aufgebaut, die untereinander nur über die jeweiligen Nachbarzellen verbunden sind. Es wird gezeigt, dass ein solches modulares SC Kettenfilter für *jede* mögliche elliptische Uebertragungsfunktion gefunden werden kann.

Neben dem Kapazitätsspread (Verhältnis der grössten zur kleinsten Filterkapazität) spielt der erreichbare Geräuschabstand eine wichtige Rolle für die Auswahl einer speziellen Filterstruktur. Das Ausgangsrauschen (bei gegebenem Eingangspegel ein Mass für den Geräuschabstand) ist für eine gegebene Filterstruktur direkt davon abhängig wie eine verfügbare Kapazitätsfläche auf die einzelnen Filterkapazitäten verteilt wird. Es wird ein Verfahren vorgestellt, das durch optimale Verteilung der verfügbaren Kapazitätsfläche entweder das *Ausgangsrauschen* oder den *Amplitudenfehler* eines beliebigen SC Filters (aus steuinsensitiven SC-Integratoren aufgebaut) minimiert. Es wird demonstriert, dass minimaler Kapazitätsspread in einer ganzen *Region* von möglichen Kapazitätsverteilungen erzielt werden kann. Verlässt man diese Region, vergrössert sich der Kapazitätsspread und erreicht sehr schnell nicht mehr akzeptierbare Werte. Es wird deshalb vorgeschlagen, sich für die Optimierung auf die erwähnte Region mit minimalem Kapazitätsspread zu beschränken. Analytische Formeln für das Ausgangsrauschen und die Sensitivität des Amplitudenganges werden gegeben und darauf aufbauend ein Optimierungsverfahren vorgeschlagen, das mit analytischen Teillösungen arbeitet. An einem Bandpassfilter 10ter Ordnung wird gezeigt, dass, verglichen mit einer konventionellen Kapazitätsverteilung, eine bemerkenswerte Verbesserung des Geräuschabstandes von mehr als 9 dB erreicht werden kann – *bei gleicher totalen Kapazitätsfläche und dem gleichem Kapazitätsspread.*

Stichworte. Exakter SC Filterentwurf, Kettenfilter, Hochpassfilter, Modulare Strukturen, Entwurfsverfahren, Rauschoptimierung, Sensitivitätsoptimierung.