

Aktive Filter – ein Überblick

Der folgende Artikel soll dem mit aktiven Filtern nicht vertrauten Leser einen Überblick verschaffen. Auf Vollständigkeit wird keinerlei Anspruch erhoben.

Definitionen:

Aktive Filter realisieren Filterfunktionen - d.h. lineare Operatoren im Zeit- und Frequenzbereich, die auf ein Eingangssignal angewendet werden, um ein Ausgangssignal zu erzeugen - mit Hilfe aktiver Bauelemente.

Man unterscheidet zwischen zeitkontinuierlichen und zeitdiskreten Filtern:

- Bei zeitkontinuierlichen Filtern wird die Information des analogen Eingangssignals zu jedem physikalischen Zeitpunkt verwertet. Zeitkontinuierliche Filter werden mit Hilfe der Laplace- oder Fouriertransformation im Frequenzbereich bzw. mit linearen Differentialgleichungen im Zeitbereich beschrieben.
- Zeitdiskret bedeutet, dass eine Abtastung des Eingangssignals stattfindet und nur die abgetasteten Werte weiter verwendet werden – i.a. in Form von Zahlenwerten nach eine AD-Wandlung des Eingangssignals. Zeitdiskrete Filter werden durch die z -Transformation im Bildbereich und lineare Differenzgleichungen im Zeitbereich beschrieben.

Typen aktiver Filter:

Die aktiven Filter lassen sich im wesentlichen in drei Gruppen aufteilen:

- Digitale Filter: Das eigentliche digitale Filter ist ein Rechenprozess. Die Realisierung geschieht durch digitale Baugruppen wie DSPs. Falls analoge Schnittstellen bestehen, müssen AD- und DA-Wandler und oft zusätzliche zeitkontinuierliche Filter (Anti-aliasing- und Rekonstruktionsfilter) eingesetzt werden.
- RC-Filter: Sie bestehen aus RC-Netzwerken und Verstärkern. RC-Filter sind die "klassischen" aktiven Filter (analog, zeitkontinuierlich).
- SC-Filter (Switched-Capacitor-Filter): Sie bedienen sich geschalteter MOSFETs um ein Sampling der Signale vorzunehmen. Die Signalverarbeitung geschieht aber auf analogem Wege, obwohl das Filter im Prinzip zeitdiskret ist.

Daneben existieren eher exotische Anwendungen wie aktive LCR-Filter oder aktive Quarzfilter, für die sich aber durchaus Anwendungen finden. RC- und SC-Filter werden auch gerne unter dem Begriff "analoge Filter" zusammengefasst.

Einsatz aktiver Filter:

Aktive Filter werden aus unterschiedlichsten Gründen anstelle von passiven Filtern eingesetzt, z.B.:

- Für geringe Frequenzen können die Werte der in einem passiven Filter verwendeten Kapazitäten und Induktivitäten unangenehm hoch werden. Das bedeutet z.B. große Abmessungen, geringe Güte, Polarität und Leckströme bei Kondensatoren etc.

- Die Toleranz und Güteanforderungen an die Bauelemente eines passiven Filters können nicht mehr erfüllt werden
- Auf Induktivitäten soll (wegen Größe, Gewicht, Nichtlinearität, Toleranz, schlechte Güte, Empfindlichkeit gegenüber EMI...) ganz verzichtet werden
- Das Filter soll sowieso gleichzeitig eine Signalverstärkung vornehmen
- Die Eigenschaften des Filters sollen elektronisch steuerbar sein
- Das Filter existiert nicht in passiver Form (z.B. linearphasige Filter)
- Das zu filternde Signal liegt bereits in digitaler Form vor, etc.

Die verschiedenen Filtertypen haben auch unterschiedliche Einsatzgebiete, die sich heute aber, vor allem durch die Fortschritte auf dem Gebiet der Digitaltechnik und der AD- bzw. DA-Wandler, stark überschneiden.

Digitale Filter:

- Realisierung fast beliebiger Übertragungsfunktionen mit hoher Präzision
- Vorteilhaft anzuwenden wenn Signale bereits in digitaler Form vorliegen (z.B. in der Bildverarbeitung) und wenn die Anwendung bereits eine Mikroprozessor-Plattform bereitstellt
- Filterparameter können durch Umprogrammierung leicht geändert werden
- Stand-Alone-Filter sind relativ aufwendig und getaktete Systeme können erhebliche Störungen verursachen
- Unter Umständen hoher Schaltungsaufwand und sehr hoher Preis für leistungsfähige DSPs, AD- und DA-Wandler etc.
- Einsatz vor allem bei komplexer Signalverarbeitung oder wenn die gewünschte Übertragungsfunktion durch analoge Filter nicht mehr mit vertretbarem Aufwand realisiert werden kann

SC-Filter:

- Preiswert, platzsparend und unkompliziert einzusetzen
- Frequenzbereich meist bis ca. 250kHz, Ordnung typischerweise 4-12, meist werden Tiefpässe angeboten
- Eignet sich gut zur monolithischen Integration aber schlecht zur diskreten Realisierung; viele IC-Typen erhältlich
- Die Filterparameter können bei externem Takt durch Änderung der Taktfrequenz i.a. komplett auf eine neue Bezugsfrequenz umnormiert werden
- Präzision vergleichbar mit RC-Filtern
- Einsatz vorwiegend in Low-Cost-Anwendungen (Kommunikationstechnik)

RC-Filter:

- sehr rauscharme Filter möglich, keine Erzeugung von nicht-harmonischen Nebenwellen
- Einsatz meist bei Audiofrequenzen, aber bis zu etwa 100MHz möglich
- typ. 2.-12. Ordnung, hohe Güten möglich
- Antialiasing oder Rekonstruktionsfilter, Audio-Technik, Ultraschall, Messtechnik etc.

Parameter aktiver Filter:

Wie beim passiven Filter liegt dem Design aktiver Filter ein Toleranzschema und/oder Anforderungen an den Phasengang zugrunde.

Daneben müssen aber noch folgende Parameter, die sich durch den Einsatz aktiver Bauelemente ergeben, festgelegt werden:

- Betriebsspannungsbereich und Stromaufnahme
- Ein- und Ausgangsspannungsbereich
- Rauschen / Dynamik
- nichtlineare Verzerrungen (im Zeitbereich)

Quell- und Lastimpedanzen sind dagegen bei aktiven Filtern im allgemeinen kein Thema - Ausnahmen sind natürlich sehr rauscharme Filter oder z.B. Filter die direkt Leitungen treiben müssen.

Implementierung aktiver analoger Filter:

Nachfolgend soll die Implementierung aktiver RC-Filter kurz umrissen werden. Bezüglich SC-Filtern, die nur monolithisch realisiert werden, sei auf die Angaben der einzelnen Hersteller (z.B. Linear Technology, MAXIM) oder die Fachliteratur zum Design integrierter Schaltkreise verwiesen.

Die Implementierung muß neben den oben genannten Parametern vor allem auch die Empfindlichkeit der Schaltung gegen Toleranzen der Bauelemente und den Phasen- und Frequenzgang der verwendeten Verstärker berücksichtigen. Den Einfluß dieser Parameter (=Empfindlichkeit, engl. Sensitivity: S) auf die Übertragungsfunktion gilt es durch die korrekte Wahl

- der Gesamtstruktur des Filters,
- der schaltungstechnischen Realisierung,
- geeigneter passiver und aktiver Bauelemente

zu minimieren.

Die Struktur des Filters rührt von der Methode seiner Synthese aus der Übertragungsfunktion her. Zwar führt die einfachste Übertragungsfunktion, die die Anforderungen an Toleranzschema oder Phasengang noch erfüllt, auch im allgemeinen auf die einfachste Filterstruktur, aber die Umsetzung einer komplexeren Übertragungsfunktion kann geringere Empfindlichkeiten aufweisen und damit höhere Toleranzen der Bauelemente zulassen, da die Anforderungen mit der komplexeren Funktion leichter erfüllt werden können! Folgende Synthesemethoden werden unter anderem angewandt:

Kaskadentechnik:

Unter der Kaskadentechnik oder Kaskadierung von Filterblöcken versteht man die Serienschaltung mehrerer einfacher Filter von erster oder zweiter Ordnung, um eine Gesamtübertragungsfunktion höherer Ordnung zu realisieren. Bei Hoch- oder Tiefpässen wird dazu die Gesamtübertragungsfunktion in Faktoren erster und zweiter Ordnung zerlegt (reeller Pol/Nullstelle bzw. konjugiert komplexer Pol/Nullstelle). Jeder Faktor entspricht einem Filterblock erster respektive zweiter Ordnung. Bei Bandpässen oder Bandsperrern erfolgt die Zerlegung bereits in der zugrundeliegenden Tiefpassübertragungsfunktion. Nach der Zerlegung wird eine Tiefpass – Bandpass – Transformation durchgeführt.

Die Faktorisierung ist natürlich nicht eindeutig. Faktoren des Zählers können unterschiedlichen Nennerfaktoren zugeordnet werden und in der Wahl der Grundverstärkung der einzelnen Blöcke bestehen so viele Freiheitsgrade wie Filterblöcke existieren. Die Anforderungen an das Filter sowie die Übertragungsfunktion selbst bestimmen, welche Zerlegung geeignet ist, wobei Kompromisse zu machen sind. Zum Beispiel erreicht man besonders geringe Empfindlichkeiten i.a. dann, wenn Pole und Nullstellen der einzelnen

Faktoren / Filterblöcke möglichst weit auseinander liegen - diese Zerlegung ist aber nicht optimal hinsichtlich der Dynamik des Gesamtfilters.

Die Technik der Kaskadierung ist einfach und erlaubt ein breites Spektrum technischer Realisierungen. Insbesondere hinsichtlich der Empfindlichkeiten günstiger sind die folgenden Methoden:

Direkte Synthese:

Die Methode der direkten Synthese bedient sich der Simulation angepasster passiver Filter, entweder auf direktem Wege durch Ersetzen der Induktivitäten durch aktive Schaltungen oder durch Nachbildung der Knoten- oder Maschengleichungen des passiven Filters mittels einer Blockstruktur (Leapfrog Structure, Ladder Simulation). Das Verfahren heißt direkte Synthese, da ein aktives Filter direkt aus der Schaltung eines passiven entworfen wird und nicht über die Faktorisierung dessen Übertragungsfunktion.

Die Simulation der Induktivitäten geschieht durch Impedanzkonverter. Diese können Gyrotoren sein, wenn als Verstärker OTAs (Operational Transconductance Amplifiers) zur Verfügung stehen, was meist für integrierte Schaltungen der Fall ist. Sollen Spannungs/Spannungs-Verstärker oder Transimpedanzverstärker in der Form stromgegekoppelter Operationsverstärker verwendet werden, wird der allgemeine Impedanzkonverter (General Impedance Converter, GIC) als Schaltungsstruktur eingesetzt. Er erlaubt ebenfalls die Simulation geerdeter und floatender Induktivitäten (-> Gorski-Popiel Methode).

Follow-the-Leader-Feedback (FLF) Struktur:

Die der FLF-Struktur zugrundeliegende Idee ist es, komplizierte Übertragungsfunktionen durch Rückkopplung der Ausgänge einer Kette einfacher Teilfilter (erster oder zweiter Ordnung) auf den Eingang zu erzeugen. Aus einfachen Filterblöcken kann so eine Vielzahl von Gesamtfilters entstehen. Die FLF-Struktur ist also praktisch ein Kaskadenfilter mit Rückkopplung. Die mittels der FLF-Struktur entstandenen Filter haben allgemein gute Empfindlichkeitseigenschaften, was sich aus den fehlervermindernden Eigenschaften der Rückkopplung ergibt.

Durch Kombination mit einer Vorwärtskopplung der Teilfilter auf den Ausgang lassen sich Nullstellen in der Übertragungsfunktion realisieren. Für den Aufbau der Teilfilterblöcke gibt es wiederum eine große Zahl von Möglichkeiten, die der Aufgabenstellung angepasst sein sollte.

Die schaltungstechnische Realisierung des Filters bezieht sich z.B. auf die Filterblöcke zweiter Ordnung ("Resonatoren 2.Ordnung"), die bei der Kaskadentechnik oder der FLF-Struktur verwendet werden.

Am häufigsten werden als Resonatoren 2.Ordnung verwendet:

- Filter mit Einfach-Gegenkopplung, z.B. Sallen-Key-Filter
- Filter mit Zweifachgegenkopplung mit einem oder zwei Verstärkern (MFB-Filter)
- Biquad-Schaltungen, die als Analogrechner Differentialgleichungen schaltungstechnisch nachbilden (State-Variable-Filter)
- GIC-Schaltungen, also Impedanzkonverter oder -inverter, z.B. als Ersatz einer Induktivität oder FDNR (Frequency Dependent Negative Resistance)
- Doppel-T Schaltungen und verwandte Bandsperrern. Mit Bandsperrern lassen sich durch Differenzbildung mit dem Eingangssignal Bandpässe gewinnen.

Wie ein Resonator 2. Ordnung aussehen kann und wie verschiedene Filterparameter zueinander in konkurrierender Beziehung stehen, wird z.B. in dem Aufsatz "Ein Zusammenhang zwischen Filterparametern beim Tow-Thomas-Biquad" beschrieben (auf unserer Web-Site).