

## Bandstopp-Filter und die Bainter-Topologie

Bonnie C. Baker

Senior Applications Engineer

Viele Anwendungen, darunter die Tonsignalisierung, Audiosignale, die Rückkopplungs-Unterdrückung in Hörgeräten oder Systeme zur Netzfrequenz-Unterdrückung, benötigen Bandsperren (auch Bandstopp- bzw. Kerb- oder Notch-Filter) zur Eliminierung unerwünschter Signale. Erreichen lässt sich diese Signalabschwächungen mithilfe aktiver analoger Bandsperren.

Im folgenden Artikel werden verschiedene Schaltungsarten für Bandsperren (Bandstopp-Filter) beschrieben, nämlich die Sallen-Key-, die Multiple-Feedback- und die Bainter-Topologie. Jeder dieser Schaltungstypen ergibt ein Bandstopp-Filter zweiter Ordnung mit einer Pol- und einer Nullstelle in der Übertragungsfunktion.

Zunächst muss festgelegt werden, welche Eigenschaften die Bandsperre haben soll. Wie Bild 1 zeigt, unterdrückt die Bandsperre alle Signale mit Frequenzen innerhalb einer gewissen Bandbreite, während Frequenzen ober- und unterhalb dieses Frequenzbereichs durchgelassen werden. Dieses allgemeine Diagramm zeigt die wichtigsten Parameter einer Bandsperre, nämlich das Durchlass- und das Sperrband,  $f_0$ , BWP, AO, ASB, BWS und RP.

Die drei Bereiche des Frequenzgangs sind das untere Durchlassband, das Sperrband und das obere Durchlassband. In beiden Durchlassbändern können die Signale ungehindert vom Eingang zum Ausgang gelangen. Signale dagegen, deren Frequenz in das Sperrband fällt, werden gemäß Bild 1 abgeschwächt. Die Mittenfrequenz des Notch-Filters ist  $f_0$ .

Mit BWP (Bandbreite des Durchlassbands) wird die -3-dB-Bandbreite innerhalb der Bandsperre bezeichnet. Diese Bandbreite definiert außerdem den Gütefaktor  $Q$  [1] des Filters:  $Q = (f_0 / BWP)$ . BWS gibt die Bandbreite des Sperrbands an. In dem Bereich unterhalb des Punkts BWS bildet das Bandstoppfilter eine Kerbe, die gelegentlich um -100 dB oder mehr einbricht.

Die Sperrband-Abschwächung erstreckt sich von AO bis ASB (Sperrband-Magnitude). AO (die Verstärkung im Durchlassband) und ASB sowie die spezifizierte Abschwächung im Sperrband definieren die Geschwindigkeit der Abschwächung in der Kerbe (wie schnell die Abschwächung in der Kerbe einsetzt). Für die Tschebyscheff-Approximationen schließlich ist RP als die Stärke der Welligkeit definiert.

Das Bandstopp- bzw. Notch-Filter erfordert paarweise Pol- und Nullstellen in der Übertragungsfunktion. Die Eckfrequenz der Pol- und Nullstellen befindet sich bei oder nahe  $f_0$ .

Die Übertragungsfunktion des Bandstopp- bzw. Notch-Filters lautet wie folgt:

$$H(s) = \frac{H_0 (s^2 + \omega_z^2)}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2} \quad (1)$$

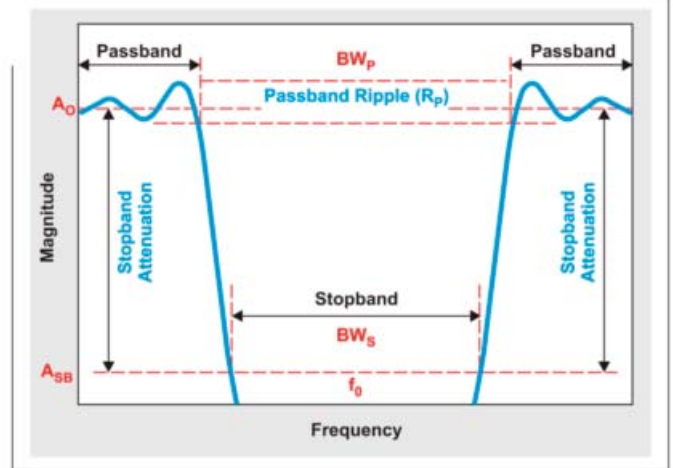


Bild 1. Frequenzgang einer Bandsperre (Bandstopp-Filter)

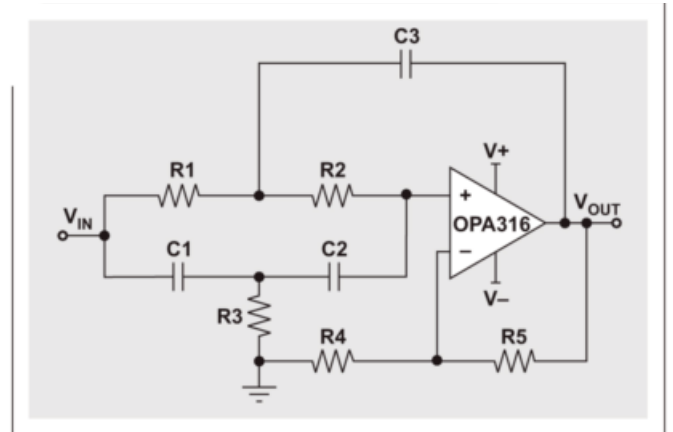


Bild 2. Sallen-Key-Bandstopp- oder Notch-Filter zweiter Ordnung

Zum Vergleich werden nachfolgend die Sallen-Key-, die Multiple-Feedback- und die Bainter-Topologie zur Realisierung eines Bandstopp-Filters beschrieben.

### Die Sallen-Key-Schaltungstopologie

Die in Bild 2 gezeigte Sallen-Key-Topologie implementiert ein Bandstopp-Filter zweiter Ordnung. Geschätzt wird diese Schaltung wegen ihrer Einfachheit, denn sie besteht nur aus einem Verstärker, fünf Widerständen und drei Kondensatoren. Ein Vorteil ist ferner, dass das Verhältnis zwischen dem größten und dem kleinsten Widerstand ebenso wie zwischen dem größten und dem kleinsten Kondensator gering ist, was sich günstig auf die Produzierbarkeit des Filters auswirkt.

Die Sallen-Key-Topologie wird in großem Umfang für Hoch- und Tiefpassfilter genutzt. Für Bandstopp-Filter weist sie jedoch eine Reihe gravierender Nachteile auf. Wegen der Wechselwirkungen der Bauelemente-Werte auf die Mittenfrequenz ( $f_0$ ) und den Gütefaktor ( $Q$ ) ist das Abstimmen eines Sallen-Key-Filters nicht einfach. Auch der Ausgangswiderstand der offenen Re-

geschleife wirkt störend bei dem Versuch, die idealen Charakteristika des Notch-Filters einzustellen (Bild 3). Auch  $f_0$  lässt sich aufgrund von Wechselwirkungen zwischen Bauelementen nicht einfach einstellen.

Ein Filter sechster Ordnung implementiert man, indem man drei Filter zweiter Ordnung in (Bild 2) Serie schaltet. Bild 3 zeigt den Frequenzgang eines Sallen-Key-Filters sechster Ordnung bei geschlossenem Regelkreis. Die geschlossene Schleifenverstärkung beträgt  $4,58 \text{ V/V}$  und die lineare Phase  $0,5^\circ$ .  $f_0$  beträgt  $1 \text{ kHz}$ .

Dieses Filter sechster Ordnung basiert auf idealen Widerständen (15), Kondensatoren (9) und Verstärkern (3). Der Frequenzgang bei geschlossener Regelschleife weist mit diesen idealen Bauelementen drei nach unten weisende Spitzen auf und zeigt außerdem, dass die Abschwächung in der Kerbe lediglich  $-15 \text{ dB}$  ausmacht.

Infolge dieser Unzulänglichkeiten wird das Sallen-Key-Notch-Filter nicht als Topologie für Bandstopp-Filter empfohlen.

### Die Multiple-Feedback-Topologie

Die in Bild 4 gezeigte Multiple-Feedback-Topologie (MFB) implementiert eine Bandsperre zweiter Ordnung. Mit einem Operationsverstärker, drei Widerständen und zwei Kondensatoren in der ersten Stufe wird auch die MFB-Schaltung wegen ihrer Einfachheit geschätzt. Die letzte Stufe besteht aus einem Operationsverstärker und drei Widerständen. Die zweite Stufe dieses Filters sorgt für eine Summierfunktion, mit der am Ende der Schaltung die Hochpass- und Tiefpass-Charakteristik zusammengeführt werden. Würde es sich um ein Filter sechster Ordnung handeln, befände sich die finale Stufe dieses Filters am Ende der Signalleitung, während drei erste Stufen vorangeschaltet sind.

Die MFB-Topologie wird in Tiefpass-, Hochpass- und Bandpassfiltern häufig eingesetzt. Bei Bandstopp-Filtern dagegen weist sie einige gravierende Nachteile auf. So ist die Abhängigkeit der Übertragungsfunktion von den Parametern der Operationsverstärker ausgeprägter als bei der Sallen-Key-Topologie. Wegen der begrenzten offenen Schleifenverstärkung des Verstärkers bei hohen Frequenzen gestaltet es sich außerdem schwierig, Hochfrequenz-Stufen mit hohem Gütefaktor herzustellen.

Bild 5 gibt den Frequenzgang einer MFB-Schaltung sechster Ordnung bei geschlossener Regelschleife wieder. Ein Filter sechster Ordnung wird implementiert, indem drei Filter zweiter Ordnung (Bild 4) in Serie geschaltet werden. Die geschlossene Schleifenverstärkung beträgt  $4,58 \text{ V/V}$  und die lineare Phase  $0,5^\circ$ .  $f_0$  beträgt  $1 \text{ kHz}$ .

Das in Bild 5 gezeigte Filter ist aus idealen Widerständen (12), Kondensatoren (6) und Verstärkern (4) aufgebaut. Der Frequenzgang bei geschlossener Regelschleife lässt mit diesen idealen Bauelementen eine Abschwächung von ungefähr  $-36,6 \text{ dB}$  in der Kerbe erkennen. An beiden Seiten der Kerbe erhöht sich die Verstärkung des Filters jedoch auf ein mehr als wünschenswertes Maß von  $1,4 \text{ dB}$ . Diese beiden Buckel resultieren aus der Notwendigkeit, das Hochpass- und das Tiefpassfilter dieses Systems auf die finale Summierfunktion abzustimmen.

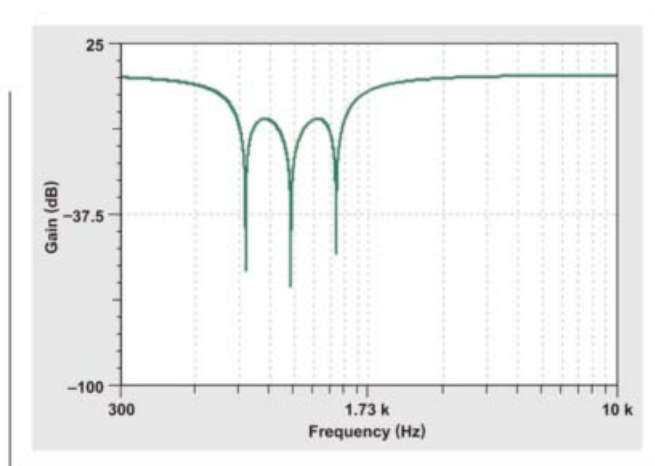


Bild 3. Frequenzgang eines Sallen-Key-Notch-Filters sechster Ordnung bei geschlossener Regelschleife

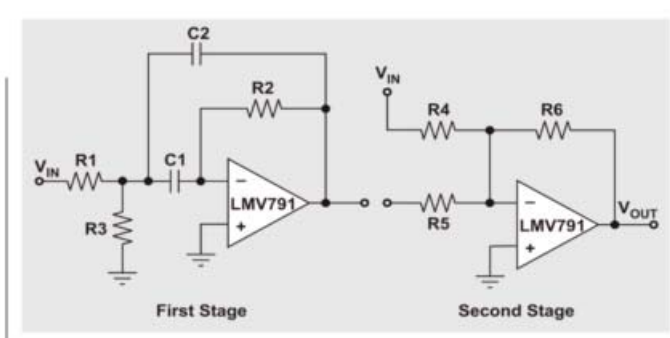


Bild 4. Bandstopp- oder Notch-Filter zweiter Ordnung, implementiert mit der Multiple-Feedback-Topologie

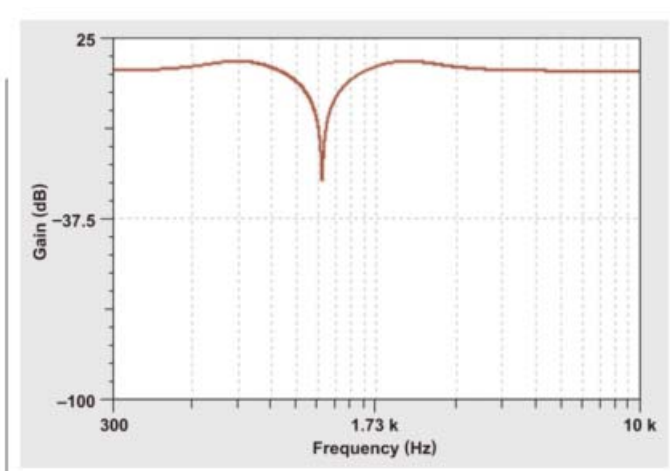


Bild 5. Frequenzgang eines MFB-Notch-Filters sechster Ordnung bei geschlossener Regelschleife

Wegen dieser Mängel wird auch das MFB-Notch-Filter nicht als Topologie für Bandstopp-Filter empfohlen.

## Die Bainter-Schaltungstopologie

Wie Bild 6 zeigt, besteht die Bainter-Filtertopologie [2] aus drei einfachen Verstärkerstufen mit zwei Rückkopplungsschleifen. Der Frequenzgang am Ausgang von A1 ist der eines Hochpassfilters, während am Ausgang von A2 der Frequenzgang eines Tiefpasses vorliegt. A3 fungiert als Summierglied und produziert an seinem Ausgang die gewünschte Notch-Filter-Charakteristik.

Die Schaltung in Bild 6 weist eine Reihe faszinierender Eigenschaften auf. So ist der Gütefaktor des Notch-Filters nicht von der Anpassung der Bauelemente, sondern vom Verstärkungsfaktor der Verstärker abhängig. Die Tiefe der Kerbe wird folglich nicht von Temperaturdrift- und Alterungseffekten beeinflusst. Die Tiefe der Kerbe bleibt sogar weitgehend gleich, auch wenn sich die Mittenfrequenz  $f_0$  des Filters verschiebt. Mit etwa 0,5 ist auch die Bauelemente-Empfindlichkeit dieses Filters sehr gering.

In Bild 7 ist der Frequenzgang einer Bainter-Schaltung sechster Ordnung bei geschlossener Regelschleife dargestellt. Ein Filter sechster Ordnung erhält man, indem man drei Filter zweiter Ordnung (Bild 6) in Reihe schaltet. Die geschlossene Schleifenverstärkung beträgt  $4,58 \text{ V/V}$  und die lineare Phase  $0,5^\circ$ .  $f_0$  beträgt  $1 \text{ kHz}$ .

Dieses Filter beruht auf idealen Widerständen (21), Kondensatoren (6) und Verstärkern (9). Mit diesen idealen Komponenten ergibt sich bei geschlossener Regelschleife eine Abschwächung von unter  $-100 \text{ dB}$ . Anders als bei der Sallen-Key- und der MFB-Topologie entsteht hier außerdem ein Notch-Filter mit sehr sauberem Frequenzgang.

Das Bainter-Notch-Filter ist somit definitiv eine empfehlenswerte Topologie für die Implementierung von Bandstopp-Filtern.

## Fazit

Wenn es darum geht, die richtige Topologie für ein Bandstopp-Filter zu finden, gilt es den Frequenzgang bei geschlossener Regelschleife zu untersuchen. Industrielle Implementierungen von Bandstopp-Filtern können auf der Sallen-Key- oder der MFB-Topologie basieren. Beide Varianten haben allerdings gewisse Probleme im Sperr- und Durchlassbereich. Während die Eigenschaften in der Kerbe unzureichend sein können, kann die Kennlinie im Durchlassbereich unnötige Maxima aufweisen. Das Bainter-Filter ist den beiden anderen Topologien in seinen Bandsperr-Eigenschaften weit überlegen und ergibt ein Notch-Filter mit sauberem Kennlinienverlauf.

Mit dem WEBENCH® Filter Designer steht ein Werkzeug zur Verfügung, das effektive Hilfestellung beim Anfertigen eigener Filter leisten kann. Tiefpass-, Hochpass-, Bandpass- und Notch-Filter lassen sich auf einfache Weise entwerfen. Das Filter-Designsystem hilft beim Design von Filtern sowie beim Ausfindig machen der passenden Verstärker und übrigen Bauteile. Für gründlichere Evaluierungen stellt es eine SPICE-Simulationsplattform bereit.

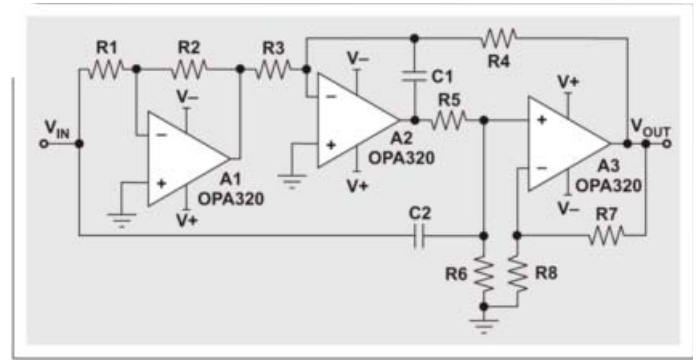


Bild 6. Bandstopp- oder Notch-Filter zweiter Ordnung auf Basis der Bainter-Topologie

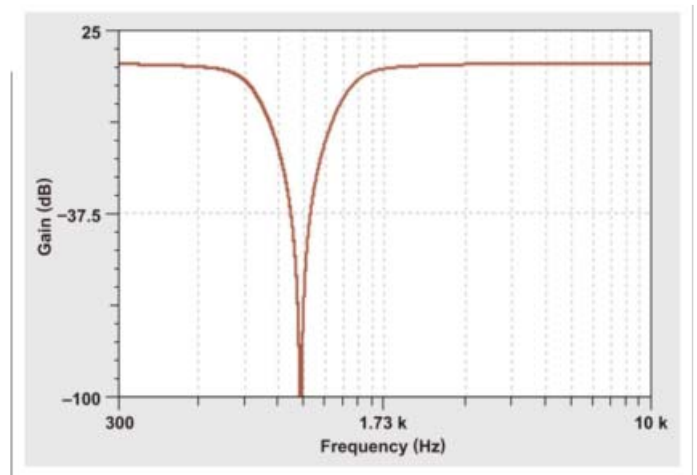


Bild 7. Frequenzgang eines Bainter-Notch-Filters sechster Ordnung bei geschlossener Regelschleife

## Referenzen

1. "Analog Filters and Specifications Swimming: Selecting the right bandwidth," Baker, On board with Bonnie, 8. 11. 2013. Verfügbar auf: [e2e.ti.com/blogs\\_/](http://e2e.ti.com/blogs_/)
2. "Active filter has stable notch, and response can be regulated," Bainter, James, Electronics, 2. Oktober 1975. Verfügbar auf [www.google.com/](http://www.google.com/)

## Relevante Websites:

WEBENCH® Filter Designer  
[www.ti.com/webenchfilters](http://www.ti.com/webenchfilters)  
[www.ti.com/1q15-OPA316](http://www.ti.com/1q15-OPA316)  
[www.ti.com/1q15-OPA320](http://www.ti.com/1q15-OPA320)  
[www.ti.com/1q15-LMV791](http://www.ti.com/1q15-LMV791)