

Entwurf hochwertiger Aktivfilter mit AktivFilter 3 (1)

NORBERT GRAUBNER – DL1SNG

Auch im Zeitalter von Soundkarte und digitalen Signalprozessoren besteht Bedarf nach Analogfiltern mit Operationsverstärkern. Alte, womöglich noch unter MS-DOS laufende Freeware ist nicht mehr zeitgemäß. Da liegt das Windows-Programm AktivFilter 3 von Stefan Bayer, DH1STB, genau richtig, denn es berücksichtigt die Eigenschaften realer Operationsverstärker, arbeitet mit Bauteil-Normreihen, bietet eine sehr komfortable Bedienoberfläche und hat sogar eine Spice-Schnittstelle.

Anstatt sich ein Filter mit undefinierbaren Eigenschaften selbst zu basteln, ist es fast immer sinnvoll, auf eine der in der Fachwelt seit Jahrzehnten etablierten Standard-Filtercharakteristiken zurückzugreifen: *Bessel*-, *Butterworth*- oder *Tschebyscheff*-Filter. Jeder Typ ist auf ganz bestimmte Eigenschaften hin optimiert, auf die es – je nach Anwendung – ankommt. Durch rückwirkungsfreies Hintereinanderschalten mehrerer Filterstufen nähert man sich den idealen Eigenschaften der jeweiligen Charakteristik. Dabei haben die einzelnen Stufen keineswegs die Charakteristik des Zieltyps, sondern diese entsteht erst im gemeinsamen Zusammenwirken.

Da die Mathematik von Filtern sehr kompliziert ist, wurden einst Tabellenwerke geschaffen, z. B. in [1] oder [2], die wenigstens die Parameter der einzelnen Stufen, also Güte und Verhältnis zur Grenzfrequenz des Gesamtfilters, angaben. Diese mussten dann unter Bezug auf die gewünschte Grenzfrequenz „nur“ noch in die einzusetzenden Bauteilwerte umgerechnet werden.

Diese Aufgabe erledigt man seit langem per Software. Doch während z. B. ältere Shareware-Programme im DOS-Fenster noch relativ umständlich zu bedienen waren und teilweise sogar falsch rechneten [3], löst man die Aufgabe inzwischen am Windows-PC mit einem Filterprogramm wie AktivFilter 3 geradezu spielerisch.

■ Filtercharakteristik

Aber ganz ohne Theorie geht es doch nicht. Denn man sollte wenigstens wissen, für welche Anwendungen die einzelnen Filtercharakteristiken optimal sind.

In der Nachrichtentechnik wird diejenige Zeitverzögerung, die ein im Vergleich zur Bandbreite des Filters schmalbandiges Signal beim Passieren des Filters erfährt, als *Gruppenlaufzeit* bezeichnet. Im Allgemeinen ist die Gruppenlaufzeit als Funktion der Frequenz im Durchlassbereich eines Filters nicht konstant, d. h. es wird Frequenzbereiche geben, die schneller übertragen werden als andere. Wenn Impulse

durch ein solches Filter übertragen werden, führt das zu Verformungen, üblicherweise zu Überschwüngen. Wenn es darauf ankommt, Impulse möglichst formtreu zu übertragen, muss die Gruppenlaufzeit des Filters innerhalb seines Durchlassbereichs möglichst konstant sein.

Diese Eigenschaft trifft auf das *Besselfilter* am ehesten zu. Dabei ist der Amplitudenfrequenzgang im Durchlassbereich deutlich abgerundet und die Flankensteilheit im Sperrbereich relativ gering.

Im Gegensatz dazu ist das *Butterworth*-Filter auf einen möglichst flachen Frequenzgang im Durchlassbereich hin ausgelegt. Eine typische Anwendung ist z. B. ein AM-ZF-Verstärker, bei dem es nicht auf Impulstreue, sondern auf den Frequenzgang des demodulierten NF-Signals ankommt (das menschliche Ohr erkennt keine Impulsverzerrungen, wohl aber nichtlineare Frequenzgänge).

Die Gruppenlaufzeit ist weniger konstant als beim Besselfilter, doch die Flankensteilheit im Sperrbereich ist deutlich besser.

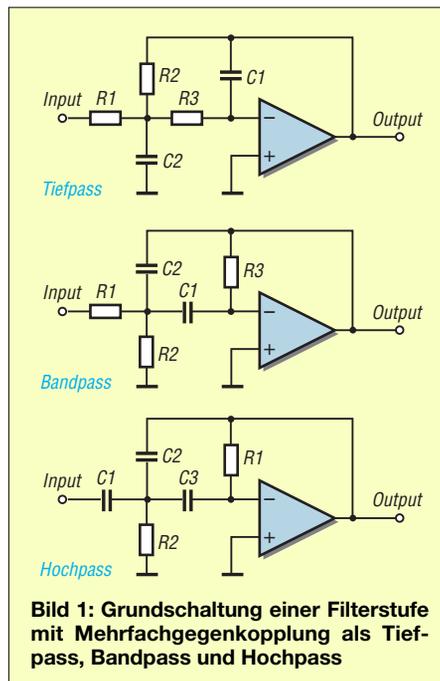


Bild 1: Grundschaltung einer Filterstufe mit Mehrfachgegenkopplung als Tiefpass, Bandpass und Hochpass

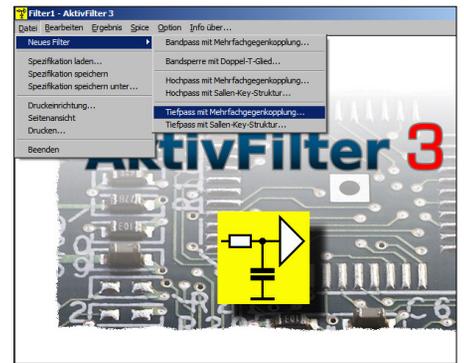


Bild 2: Startmaske für den Entwurf eines neuen Filters Screenshot: DL1SNG

Wer im Sperrbereich noch größere Flankensteilheit möchte und dabei eine gewisse Welligkeit im Durchlassbereich akzeptieren kann, sollte das *Tschebyscheff*-Filter verwenden, die gewünschte Welligkeit muss jeweils definiert werden. Bei dieser Filtercharakteristik schwankt die Gruppenlaufzeit am stärksten, d. h. die Impulstreue ist am geringsten. Aber dafür ist die Flankensteilheit beim Übergang in den Sperrbereich am größten. Übrigens wird die Grenzfrequenz beim Tschebyscheff-Filter nicht am 3-dB-Punkt angegeben, sondern am Punkt der angegebenen Welligkeit.

Die typischen Durchlasskurven der drei Filtercharakteristiken werden später in Bildern gezeigt.

Nur der Vollständigkeit halber sei hier auch das *Cauer*-Filter erwähnt. Man kann nämlich den Übergang vom Durchlass- in den Sperrbereich noch steiler machen, wenn man oberhalb der Grenzfrequenz Nullstellen in den Amplitudenfrequenzgang einbaut. Ein Cauer-Filter erhält man dann, wenn auch im Sperrbereich eine gleichmäßige Welligkeit des Amplitudenfrequenzganges vorhanden ist. Leider lassen sich diese Filter nicht mit den ansonsten möglichen, sehr einfachen Grundschaltungen realisieren, weswegen dieser Typ im Programm AktivFilter 3 bisher nicht berücksichtigt wurde.

Neben den drei vorgenannten Standardfiltertypen lassen sich auf Wunsch auch beliebige eigene Kreationen verwirklichen oder nachrechnen. Für die Eingabe von Polfrequenz und Polgüte bietet das Programm eine gesonderte Maske an.

Filter werden auch nach ihrer Ordnungszahl unterschieden. Diese beschreibt die Flankensteilheit außerhalb des Durchlassbereichs. Man kann auch sagen, die Ordnungszahl gibt die Anzahl der frequenzbestimmenden Blindelemente (z. B. Kondensatoren) an, die das Filter insgesamt enthält. Ein Tiefpass 1. Ordnung, z. B. ein RC-Glied, hat – wenn man es weit genug oberhalb seiner Grenzfrequenz betrachtet – bei Verdopplung der Frequenz (eine Ok-

tave) eine Verstärkungsabnahme von 6 dB, d.h. bei Verdopplung der Frequenz sinkt die Spannung um die Hälfte, bei der zehnfachen Frequenz (eine Dekade) auf ein Zehntel (20 dB). Somit wird bei einem Tiefpass 4. Ordnung die Spannung beim Verzehnfachen der Frequenz auf $1/10^4 = -80$ dB abgefallen sein.

Das Gleiche gilt sinngemäß für Hochpässe weit unterhalb der Grenzfrequenz. Bei Bandpässen muss man die Ordnungszahl bei gleicher Flankensteilheit verdoppeln, denn hier haben wir es ja mit zwei Flanken zu tun. Somit hat ein Bandpass 2. Ordnung zwei Flanken mit je 20 dB/Dekade.

Natürlich verwendet man für die einzelnen Filterstufen keine passiven RC-Glieder, sondern meist eine Schaltung mit Operationsverstärker und Mehrfachgegenkopplung (Bild 1). Dabei handelt es sich um ein sehr universelles Filter 2. Ordnung, bei dem die drei Parameter *Güte*, *Resonanzfrequenz* und *Gesamtverstärkung* allein durch die Dimensionierung der Bauteilwerte unabhängig voneinander eingestellt werden können. Auch das rückwirkungsfreie Hintereinanderschalten solcher Stufen ist problemlos möglich. Wie man an den drei Teilbildern von Bild 1 sieht, ist die Schaltung für Hochpässe, Bandpässe und Tiefpässe gleichermaßen brauchbar, man muss nur Kondensatoren und Widerstände sinnvoll gegeneinander vertauschen.

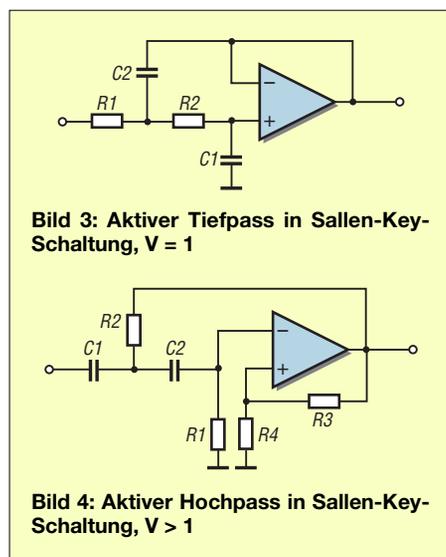


Bild 3: Aktiver Tiefpass in Sallen-Key-Schaltung, V = 1

Bild 4: Aktiver Hochpass in Sallen-Key-Schaltung, V > 1

Neben der Schaltung mit Mehrfachgegenkopplung gibt es noch eine Variante mit Einfachmitkopplung, die so genannte *Sallen-Key-Schaltung* (Bilder 3 und 4). Sie ist praktisch nur für Hoch- und Tiefpässe üblich und kann keine Verstärkung von weniger als 1 haben – ein Nachteil, wie wir noch sehen werden. Überdies ist sie gegenüber Bauteiltoleranzen wesentlich empfindlicher (bis hin zur Selbsterregung). Eine Klasse für sich bildet die Bandsperre, für

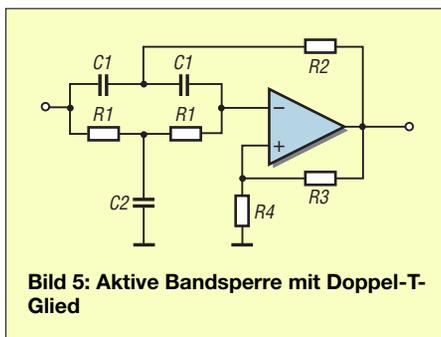


Bild 5: Aktive Bandsperre mit Doppel-T-Glied

die es eine eigene Schaltung gibt, das *Doppel-T-Glied* (Bild 5). Im Programm AktivFilter 3 sind alle drei Schaltungstypen verfügbar.

■ **Übersteuerung und Rauschen**

Um die Durchlasskurve im gewünschten Maß „eckig“ zu machen, kombiniert und staffelt man Güte und Resonanzfrequenz der Einzelfilter in ganz bestimmter Weise. Obwohl sich dabei der Frequenzgang des Gesamtfilters einfach nur aus dem Produkt seiner Einzelfilter ergibt, ist die Reihenfolge der Einzelfilter innerhalb der Kette dennoch nicht gleichgültig. Wenn z. B. alle Teilfilter die Verstärkung 1 haben und ein Teilfilter mit hoher Güte im Eingang liegt, dann besteht wegen der mit der Güte einhergehenden Spannungsüberhöhung die Gefahr von Übersteuerung dieser Eingangsstufe. Bei großen zu erwartenden Signalpegeln staffelt man deshalb die Stufen mit zum Ausgang hin zunehmender Güte. Dann senken die Eingangsstufen den Pegel auf der Resonanzfrequenz der Filter hoher Güte soweit ab, dass diese nicht mehr übersteuert werden können. Leider hat diese Reihenfolge auch einen Nachteil. Denn bei hoher Güte einer Stufe verschlechtert sich rapide deren Signal-Rausch-Verhältnis. Insbesondere bei der Resonanzfrequenz erhält man im Spektrum ein kräftiges Rauschmaximum. Das bedeutet, dass das Rauschen der letzten Stufe mit ihrer sehr scharfen Resonanz besonders unangenehm in Erscheinung tritt. Bei umgekehrter Reihenfolge der Teilfilter passiert dies nicht, denn dann wird ja das Rauschen auf der Resonanzfrequenz durch die nachfolgenden Stufen mit niedrigerer Grenzfrequenz zumindest auf dasjenige Maß, wie es der Durchlasskurve entspricht, abgesenkt. Im Programm AktivFilter 3 kann man zwischen beiden Konzepten wählen.

All dies gilt jedoch nur, solange das Gesamtfilter keine hohe Gesamtverstärkung hat. Sobald die Verstärkung aufeinanderfolgender Stufen das Verhältnis der Güten zueinander übersteigt, besteht (innerhalb des Durchlassbereichs) nicht mehr die Gefahr der Übersteuerung von Eingangsstufen, ohne dass gleichzeitig auch die Aus-

gangsstufe übersteuert wird. Und dann spielt auch das Rauschen einer Stufe, die am Ausgang der Kette platziert ist, kaum noch eine Rolle, denn mit zunehmender Verstärkung wird das Signal-Rausch-Verhältnis weitaus stärker von der ersten Stufe bestimmt.

Angesichts der Dimensionierung von Stufen hoher Güte gilt dies erst recht, denn diese rauschen nicht nur auf ihrer Resonanzfrequenz, sondern im gesamten Durchlassbereich relativ stark. Die hohe Güte der Filterschaltung wird nämlich durch eine hinsichtlich des Rauschens recht unglückliche Bauteildimensionierung erreicht: Das in Bild 1 nach Masse ableitende Bauteil (Tiefpass: C2; Bandpass und Hochpass: R2) wird nämlich mit $1/Q^2$ kleiner, während gleichzeitig das gegenkoppelnde Bauteil (Tiefpass: C1; Bandpass R3; Hochpass: R1) im gleichen Maß größer wird. Bei hoher Güte wird also das eingespeiste Nutzsignal zuerst extrem abgeschwächt und anschließend mit dem Operationsverstärker wieder hoch verstärkt. Dabei überlagert sich natürlich das Spannungsrauschen des Operationsverstärker-Eingangs und verschlechtert somit das Signal-Rausch-Verhältnis.

Bei hoher Gesamtverstärkung des Gesamtfilters ist daher das übersteuerungsfeste Konzept stets die bessere Wahl, denn eine Stufe mit niedriger Güte hat im Durchlassbereich des Gesamtfilters den kleineren Rauschfaktor und sollte deshalb am Eingang liegen.

Im Übrigen sollte man sich beim Rauschen von Operationsverstärkern keinen Illusionen hingeben. So hat z. B. der als rauscharm geltende JFET-Typ TL074 im Bereich von 100 Hz bis 10 kHz eine effektive Rauschspannung von $1,5 \mu\text{V}$; in den Datenblättern einiger Hersteller werden sogar $4 \mu\text{V}$ genannt. Hingegen sind es bei einem rauscharmen bipolaren Einzeltransistor ($F = 4$ dB) bei $1 \text{ k}\Omega$ Quellwiderstand gerade einmal $0,3 \mu\text{V}$. Gegenüber $1,5 \mu\text{V}$ sind das satte 14 dB Unterschied. Wenn es also wirklich aufs Rauschen ankommt, sollte man gegebenenfalls einen diskret aufgebauten, rauscharmen, breitbandigen Vorverstärker mit mindestens 20 dB Verstärkung spendieren – aber das nur am Rande. (wird fortgesetzt)

norbert.graubner@freenet.de

Literatur

[1] Tietze, U.; Schenk, C.; Halbleiterschaltungstechnik. 5. Aufl., Springer-Verlag, Berlin 1980
 [2] Herpy, M.; Analoge integrierte Schaltungen. Franzis Verlag GmbH, München 1976
 [3] Power Mountain Software Systems (nicht mehr existent), P.O. Box 243, Provo, Utah 84603: FILTER11.COM (DOS); 1987; damals Registrierung für 35 US-\$
 [4] Bayer, S., DH1STB: Aktive Filter mit der Software AktivFilter entwerfen. www.aktivfilter.de

Entwurf hochwertiger Aktivfilter mit AktivFilter 3 (2)

NORBERT GRAUBNER - DL1SNG

Nach den grundlegenden Bemerkungen zum Filterentwurf in der vorigen Ausgabe wenden wir uns in dieser zweiten und abschließenden Folge den Problemen beim Umgang mit realen Operationsverstärkern zu und lernen die Vorzüge der Arbeit mit dem Programm AktivFilter 3 kennen.

Nach [1] muss die Differenzverstärkung des verwendeten Operationsverstärkers bei der Resonanzfrequenz der Filterstufe möglichst groß gegenüber $2 Q^2 \cdot V_U$ sein – was nach vorstehender Betrachtung auch unmittelbar einleuchtet.

■ Reale Operationsverstärker

Man kann auch sagen, das Produkt aus $2 Q^2 \cdot V_U \cdot f_{\text{res}}$ muss deutlich kleiner als das seitens des Herstellers angegebene Verstärkungs-Bandbreite-Produkt (*unity gain bandwidth*) des Operationsverstärkers sein. Wegen des

stärkers arbeitet es (auf Wunsch) mit den Daten real existierender Typen, die man einfach aus einer sehr umfangreichen Liste auswählt. Am Beispiel eines Tschebyscheff-Tiefpasses, der mit einem $\mu A741$ realisiert wurde, zeigt Bild 6 den Unterschied. Die rote Kurve zeigt den Verlauf, den man ohne Berücksichtigung der Verstärkereigenschaften erhalten hätte.

Allerdings sollte man diese Programmfunktion mit Bedacht nutzen und keinesfalls übertreiben. Da ja die Schwankungsbreite des Verstärkungs-Bandbreite-Produkts eines

stärkung führen. Somit hat man einen zusätzlichen Freiheitsgrad beim Filterentwurf. Da die geforderte Differenzverstärkung proportional zu Q^2 ansteigt, ist es sinnvoll, die Stufenverstärkung reziprok zu diesem Faktor zu verteilen. Also erhält die Stufe mit der geringsten Güte die höchste Verstärkung und umgekehrt. Im Programm AktivFilter 3 kann man diese Einstellung vorwählen, man muss also nicht selber rechnen. Bild 7 zeigt die Verbesserung; man erkennt sofort, dass dem $\mu A741$ die Aufgabe nun wesentlich leichter fällt.

Auf Wunsch kann man die Stufenverstärkung manuell vorgeben. Bei der Sallen-Key-Schaltung ist eine güteabhängige Verstärkung nicht immer für alle Stufen möglich, denn es sind gelegentlich Verstärkungen von weniger als 1 notwendig. AktivFilter 3 bietet trotzdem die Möglichkeit, auch bei Sallen-Key-Filtern die Stufenverstärkung in Abhängigkeit zur Güte zu verteilen und berücksichtigt dabei, dass die Stufenverstärkung stets mindestens 1 betragen muss.



Bild 6: Frequenzgang mit (blau) und ohne (rot) Berücksichtigung der Eigenschaften eines realen Operationsverstärkers

■ Bauteilwerte in Normreihen?

Ein großes Problem beim traditionellen Filterentwurf besteht in der Rasterung der verfügbaren Bauteilwerte in Normreihen (E12, E24, E48, E96). SMD-Widerstände

quadratischen Zusammenhangs mit der Güte kommt man meist schon bei wenigen Kilohertz an die Grenzen realer Operationsverstärker. Die klassische Lösung dieses Problems besteht darin, einen breitbandigeren Operationsverstärker zu verwenden. Oder man verteilt die erforderliche Gesamtgüte bzw. Verstärkung auf eine höhere Anzahl Stufen.

Doch ein guter Entwickler löst das Problem eleganter. Denn zumindest bei Tiefpass- und Bandpassfiltern braucht man ja ohnehin einen Kondensator, der die Verstärkung zu steigenden Frequenzen hin abfallen lässt (Tiefpass: C1; Bandpass: C2). Was liegt da näher, als den Frequenzgang des Verstärkers in diese Berechnung mit einzubinden und die Kapazität entsprechend kleiner zu machen?

Genau dies tut das Programm AktivFilter 3: Anstelle eines idealen Operationsver-

Bild 7: Frequenzgang nach Anpassung der Stufenverstärkungen



realen Operationsverstärkers ziemlich groß ist, hat ein Ausreizen der Grenzen exemplarabhängige Abweichungen der Durchlasskurve zur Folge. Es sollte also lediglich darum gehen, die Durchlasskurve, mit der man unter Verwendung eines realen Typs vielleicht gerade eben so zufrieden gewesen wäre, besser an die ideale Kurve anzunähern.

■ Güteabhängige Verstärkung

Nirgendwo steht, dass die Verstärkung der Filterstufen gleich hoch sein muss; allein das Produkt der einzelnen Stufenverstärkungen muss zur gewünschten Gesamtver-

stehen bestenfalls in der E24-Reihe zur Verfügung, Kondensatoren sogar nur in E6. Wenn man den genauen Wert nicht durch mehrere Bauteile annähern möchte, muss man den nächstliegenden Normwert verwenden – was zu Abweichungen der Durchlasskurve führt.

Im Programm AktivFilter 3 kann man die gewünschte Normreihe frei wählen. Es ist aber intelligent genug, um bei fortschreitender Berechnung etwaige Abweichungen zu berücksichtigen. Dabei versucht es, die Parameter der restlichen Stufen so zurechtzubiegen, dass die Gesamtkurve trotz der groben Normwerte bestmöglich angenähert wird.

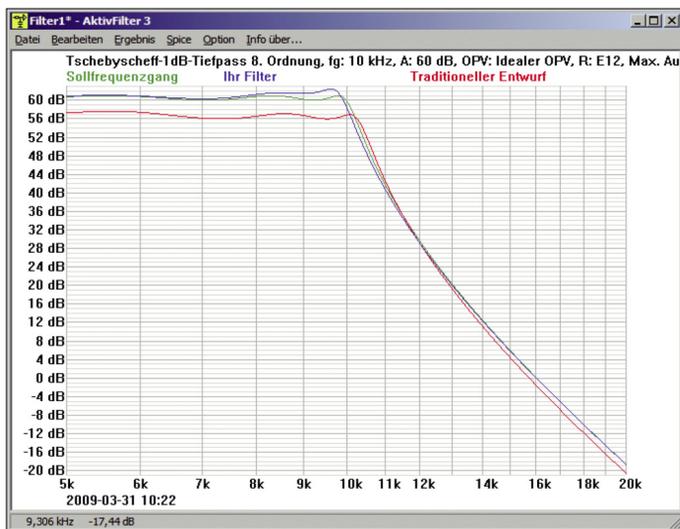


Bild 8: Über-Alles-Kompensation grob gerasterter Normwerte (E12) durch das Programm (blaue Kurve) bei idealem Operationsverstärker

Hier liegt der Grund, weshalb gelegentlich die blaue Kurve in Bild 8 (Normreihe E12!) trotz Verwendung des idealen Operationsverstärkers ein wenig von der grünen Sollkurve abweicht. Die rote Kurve gibt denjenigen Verlauf an, den man ohne die bei fortschreitender Berechnung vorgenommene Gesamtkompensation erhalten hätte.

im Menü den Eintrag *Datei* → *Neues Filter* (Bild 2 im ersten Teil des Beitrags) und sucht sich in der Auswahlliste die gewünschte Filterart aus. Wir wählen als Beispiel einen Tiefpass mit Mehrfachgegenkopplung. Daraufhin öffnet sich die entsprechende Maske. Hier können wir die gewünschten Eigenschaften eintragen.



Bild 9: Vorgabe der gewünschten Filterparameter

bei rauscherm Design, zweckmäßig, die Stufenfolge für *größte Aussteuerbarkeit* zu wählen.

Unser SMD-Widerstandssortiment ist wahrscheinlich nach der Normreihe E24 aufgebaut, die wir in der Maske markieren. Um die Operationsverstärker gleichmäßig zu belasten, wählen wir *Stufenverstärkung abhängig von Q*. Die Kapazitätswerte wollen wir zwar manuell vorgeben, denn eng tolerierte Kondensatoren sind sehr teuer und wir haben vielleicht nur wenige Werte in der Normreihe E6 am Lager. Aber ohne etwas Erfahrung ist es besser, wenn wir zunächst dem Programm die Auswahl der Werte überlassen. Deshalb wählen wir *Kapazitätswerte optimieren*; wir können die Kapazitätswerte auch später noch manuell ändern. Weil es uns auf Rauschermut ankommt, wählen wir aus der Liste den JFet-OpAmp TL074. Bild 9 zeigt die gesamte Voreinstellung.

Nach Betätigung des *OK*-Buttons beginnt das Programm zu rechnen und zeigt den Rechenfortschritt in einem kleinen Pop-up-Fenster an. Je nach Schwierigkeitsgrad kann das einige Sekunden dauern. Hier kann man gelegentlich auch beobachten,

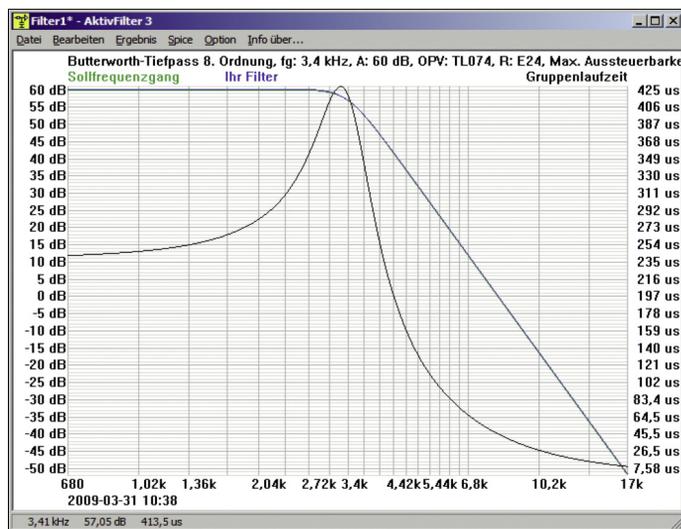


Bild 10: Durchlasskurve (blau) und Gruppenlaufzeit (schwarz) eines Butterworth-Filters 8. Ordnung

Bei Bandpässen ist das frequenzbestimmende Bauteil (R_2) besonders kritisch. Deshalb gibt das Programm diesen Wert auf Wunsch auch losgelöst von einer Normreihe aus. Dies entspricht dem Vorgehen in der Praxis, denn bei einem Bandpass führt man den frequenzbestimmenden Widerstand gerne als Potenziometer aus. Neben den Abweichungen, die durch die Festlegung auf Normwerte verursacht wurden, lassen sich hiermit auch die unvermeidlichen Bauteiltoleranzen, insbesondere die der Kondensatoren, ausgleichen. Zum Abgleich schickt man ein Sinussignal mit der Resonanzfrequenz der abzugleichenden Stufe durch die Filterkette und stellt R_2 auf Maximum. Die jeweiligen Resonanzfrequenzen sind unter *Ergebnis* → *Filterparameter* ablesbar.

Arbeiten mit AktivFilter 3

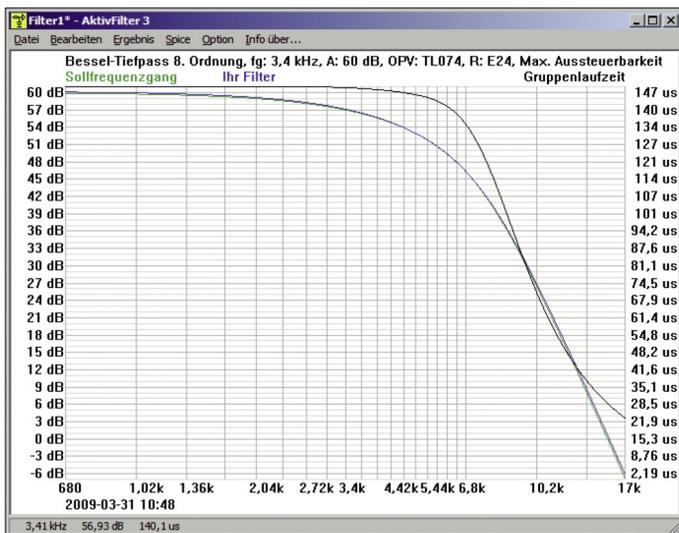
Die Bedienoberfläche des Programms ist angenehm intuitiv und sofort zu verstehen. Nach dem Start des Programms wählt man

Im Durchlassbereich soll das Filter einen ideal flachen Frequenzgang haben – also brauchen wir einen Tiefpass mit Butterworth-Charakteristik. Da Operationsverstärker meist als Vierfach-ICs angeboten werden, soll der Tiefpass mit vier Stufen realisiert werden. Da jede Stufe einen Tiefpass 2. Ordnung darstellt, bekommen wir einen Tiefpass 8. Ordnung. Er soll eine Grenzfrequenz von 3400 Hz haben. Das Feld „Impedanzniveau“ lassen wir, wie es ist; der tatsächliche Eingangswiderstand wird später von der Größe der gewählten Kondensatoren abhängen. Außerdem hätten wir gern eine Gesamtverstärkung von 60 dB (tausendfache Spannungsverstärkung).

Wie bereits erläutert, ist es bei Verstärkungen, die wesentlich größer als 1 sind, auch

wenn das Programm an einer Stufe mehrere Optimierungsversuche macht. Am Ende der Berechnung öffnet sich das Fenster mit der Durchlasskurve (Bild 10).

Was alles dargestellt wird, lässt sich übers Menü unter *Option* einstellen: die obere und untere Frequenzgrenze der Grafik (hier eingestellt auf das 0,2- bis Fünffache der Grenzfrequenz), die ideale und die tatsächliche Durchlasskurve (grüne und blaue Kurve), auf Wunsch auch denjenigen Verlauf, den die Durchlasskurve bei einem „traditionellen Entwurf“ bekommen hätte (rote Kurve, hier weggelassen) und die Gruppenlaufzeit. In unserem Beispiel wird die grüne Ideal-kurve von der blauen, realen Kurve komplett verdeckt, d. h., wir haben keine spürbare Abweichung. Wenn man an die abfal-



lende Flanke im Sperrbereich eine Tangente anlegt, schneidet diese die 60-dB-Linie genau bei 3,4 kHz; dies gilt nur beim Butterworth-Filter. Im Bereich oberhalb von 6,8 kHz fällt sie mit 48 dB pro Oktave – charakteristisch für 8-polige Filter. Auffällig ist die bei diesem Filtertyp schon recht starke Schwankung der Gruppenlaufzeit (schwarze Kurve, rechte Skala); dieses Filter wäre für Impulsübertragung kaum geeignet.

■ Ändern von Filtereigenschaften

Erst durch „Spielen“ mit den Vorgaben entwickelt man ein Gefühl für die Zusammenhänge und kommt dabei zu tieferem Verständnis. Anders als manch andere Filterprogramme eignet sich AktivFilter 3 hierfür ganz hervorragend. Anstatt jedes Mal alles neu einzugeben, bietet das Programm unter *Bearbeiten* → *Spezifikation* die Möglichkeit, bereits eingegebene Filterparameter beliebig zu ändern. So zeigen z. B. Bild 11 und Bild 12, wie die Durchlasskurven von Bessel- bzw. Tschebyscheff-Filtern mit 2 dB Welligkeit aussehen würden.

■ Ändern von Bauteilwerten

Wir bleiben beim Tschebyscheff-Filter und schauen uns unter *Ergebnis* → *Filterparameter* die zugehörigen Filterparameter an

Stufe	Güte	Frequenz	Norm. Freq.	Verstärkung
1	0,892	808,2 Hz	0,238	264,8
2	2,533	1,945 kHz	0,572	13,66
3	5,584	2,864 kHz	0,843	1,908
4	18,69	3,366 kHz	0,99	0,145

Bild 13: Tabelle der Filterparameter

Bild 11: Filter mit Besselcharakteristik – man beachte die Gruppenlaufzeit!

nuelle Eingabe anderer Kapazitätswerte ändern. Dazu wählen wir *Bearbeiten* → *Kapazitäten* ändern. Im Rahmen von Grenzen, die durch die internen Formeln festgelegt sind, können wir hier die einzelnen Kapazi-

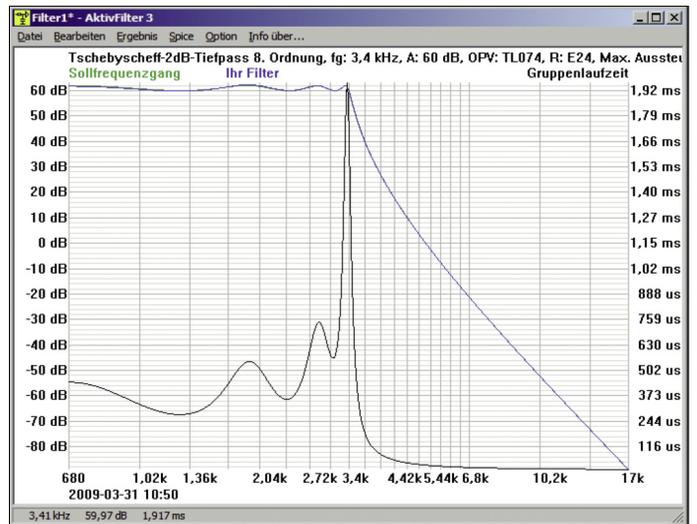


Bild 12: Die gleiche Schaltung wie in Bild 11, hier jedoch als Tschebyscheff-Filter mit 2 dB Welligkeit

(Bild 13). Wir sehen, dass die erste Stufe die geringste Güte aber dafür eine riesige Verstärkung bekommen hat. Gleichzeitig hat die letzte Stufe eine sehr hohe Güte und dafür eine Verstärkung von weit unter 1. Dies ist die Auswirkung der gleichmäßigen Verteilung der von den Operationsverstärkern abverlangten Differenzverstärkung.

Stufe	R1	R2	R3	C1	C2
1	9,1k	2,4M	2,2k	68 p	82 n
2	10k	130k	4,7k	150 p	68 n
3	8,2k	16k	4,7k	330 p	120 n
4	11k	1,6k	20k	100 p	680 n

Bild 14: Tabelle der vorläufigen Bauteildaten, wie sie vom Programm vorgeschlagen wurden

Diese Verstärkungsverteilung hat Auswirkungen auf die Bauteildimensionierung, die wir uns nun unter *Ergebnis* → *Dimensionierung* ansehen (Bild 14). Die hohe Verstärkung der ersten Stufe hat zur Folge, dass das Programm einen reichlich hochohmigen Gegenkopplungswiderstand $R2 = 2,4 \text{ M}\Omega$ vorschlägt. Der erfahrene Praktiker verwendet solch hochohmige Schaltungen nur ungern, denn sie sind anfällig für elektrische und mechanische „Schmutzeffekte“; eine vernünftige Grenze liegt bei $1 \text{ M}\Omega$. Gleichzeitig sehen wir, dass z. T. sehr unbequeme Kapazitätswerte (82 nF, 120 nF) vorgeschlagen wurden. Beides können wir durch ma-

tätswerte beliebig verändern. Die Kapazitäten wurden vom Programm so ausgewählt, dass jeweils der vorgegebene Eingangswiderstand eingehalten wurde. Jede Änderung an den Kondensatoren wird auch Einfluss auf den Eingangswiderstand der jeweiligen Filterstufe haben.

Um nun das Impedanzniveau der ersten Stufe zu senken, wählen wir einfach zwei Kondensatoren, die ungefähr um den gesuchten Faktor größer sind. Wir versuchen es mit $C1 = 100 \text{ pF}$ und $C2 = 100 \text{ nF}$. Auch die übrigen Kondensatoren werden vorsichtig auf handlichere Werte geändert (Bild 15). Dabei haben wir durchaus die Freiheit, zwecks kostengünstiger Fertigung möglichst viele gleiche Werte aus der E6-Reihe anzustreben. Auf die Durchlasskurve werden sich diese Änderungen aufgrund der Rasterung auf neue Widerstandsnormwerte nur ganz geringfügig auswirken. Bild 16 zeigt alle neuen Bauteilwerte. Der verkleinerte Eingangswiderstand von nur noch $2,4 \text{ k}\Omega$ ist eine Folge der Umdimensionierung der ersten Stufe ($R2$ ist nun deutlich kleiner als $1 \text{ M}\Omega$) und muss hingenommen werden. Die Bezeichnung der Bauteile richtet sich nach der bereits gezeigten Grundschaltung der Einzelfilter (Bild 1). Die Darstellung finden wir im Menüeintrag unter *Ergebnis* → *Schaltbild*.

■ Datenausgabe

Selbstverständlich lassen sich die Daten des entworfenen Filters auch speichern – allerdings nicht die fertigen Werte, sondern die eingegebenen Filterparameter. Beim erneuten Einlesen errechnet sich das Programm die Bauteilwerte neu. Eine weitere Ausgabemöglichkeit findet sich unter *Ergebnis* → *Speichern*. Hier werden die Design-Vor-

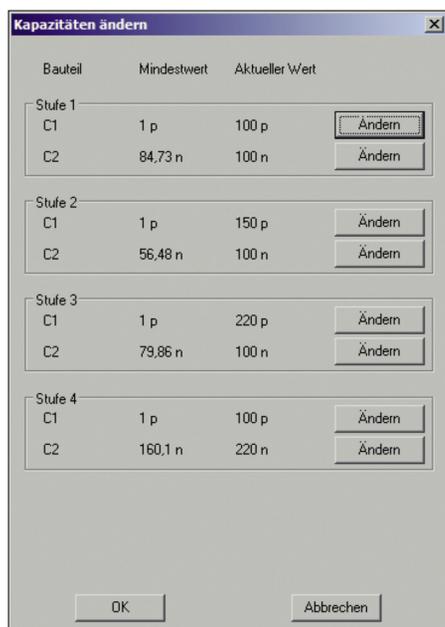


Bild 15: Maske zum Ändern der Kapazitätswerte
Screenshots: DL1SNG

gaben, die Schaltung einer einzelnen Stufe und die Tabelle der Bauteilwerte in Form einer HTML-Datei in ein beliebiges Verzeichnis ausgegeben. Da jeder normale PC

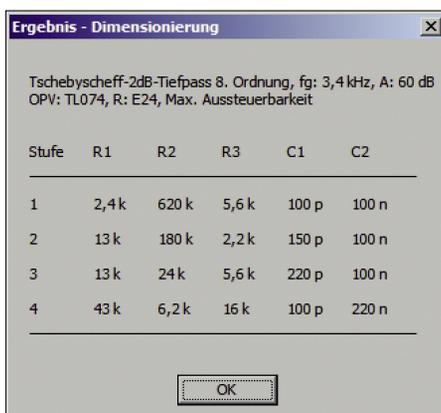


Bild 16: Tabelle der endgültigen Bauteilwerte; oben sind die Filterparameter ausgewiesen.

dieses Format kennt, ist dies eine Ausgabemöglichkeit an Leute, die (noch) nicht über das Programm AktivFilter 3 verfügen. Die HTML-Datei lässt sich übrigens sehr einfach und ohne abgeschnittene Ränder aus dem Browser ausdrucken.

Schließlich sei auch die SPICE-Schnittstelle erwähnt, über welche die Filterdaten zur weiteren Verwendung einem entsprechenden Simulator (z. B. PSpice oder LTspice) mitgeteilt werden können. Neben der Über-

prüfung der Filtereigenschaften durch ein unabhängiges Programm lässt sich hier u. a. auch die Sprungantwort darstellen.

All die vielfältigen, weiteren Möglichkeiten, die das Programm bietet, näher zu beschreiben, würde den Rahmen dieses Beitrags sprengen. Deshalb sei auf die Website www.aktivfilter.de des Entwicklers [4] verwiesen. Das Programm hat eine achtjährige Entwicklungszeit hinter sich und wurde stetig vervollkommen. Verständlicherweise ist es *nicht* als Share- oder Freeware erhältlich.

Wer jedoch nur einmal ein ordentliches Filter gebraucht hat, wer deswegen tage- und wochenlang vergeblich versucht hat, in die Filtermathematik einzusteigen oder wer nach viele Abende füllendem Drauflosbasteln entnervt mit unbefriedigenden Filtereigenschaften aufgab – der begreift schnell, dass die für eine Einzelplatz-Lizenz aufzubringenden 69 € (Software per Download) auf jeden Fall eine lohnenswerte Investition sind. Zum Kennenlernen steht eine kostenlose Demo-Version zur Verfügung.

norbert.graubner@freenet.de