

Software für den Entwurf aktiver Filter

AktivFilter 3.3-Handbuch

Handbuch zum Filterentwurf mit AktivFilter 3.3

Ausgabe vom 09. Januar 2022

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	2
2	Einleitung	3
3	Funktionsumfang einer Vollversion	5
4	Unterstützte Operationsverstärkertypen	6
4.1	Hinweis zur Mindestverstärkung	7
4.2	Hinweise zur Dimensionierung von Operationsverstärkerschaltungen	7
4.3	Ausgangsimpedanz eines aktiven Filters	8
4.4	Eingangsimpedanz eines aktiven Filters	8
5	Bedienung des Programms	9
6	Das Ergebnis	11
6.1	Grafik	11
6.2	Dimensionierung des Filters	12
6.3	Schaltbild des Filters	13
6.4	Ergebnis abspeichern	14
6.5	Ergebnis ausdrucken	14
6.6	Kapazitäten ändern	15
7	Spice-Aufrufschnittstelle	17
7.1	Spice-Version	17
7.2	Hinweise zum OPV-Modell	17
7.3	Konfiguration	18
7.3.1	Beispiel einer Spice-Konfiguration für LTSpice	20
7.4	Amplitudengang mit Spice simulieren	21
7.5	Gruppenlaufzeit mit Spice simulieren	24
7.6	Sprungantwort mit Spice simulieren	25
8	Bandpassfilter	26
9	Bandsperrefilter	29
10	Filter mit individueller Charakteristik	32

2 Einleitung

AktivFilter 3.3 ist ein Programm zur Dimensionierung aktiver Bandpassfilter, Bandsperren, Hochpass- und Tiefpassfilter mit Operationsverstärkern. Die Besonderheit dieses Programmes besteht darin, dass es die Dimensionierung des Filters auf den Operationsverstärkertyp und auf die Normwerte der Bauteile abstimmt. Ein späterer Abgleich der aufgebauten Schaltung wird dadurch überflüssig. In vielen Anwendungsfällen wird es durch den Einsatz von **AktivFilter 3.3** ermöglicht, preiswerte Operationsverstärkertypen anstelle teurer Spezialtypen einzusetzen.

AktivFilter ist nach unseren Informationen weltweit das einzige erhältliche Programm, das in der Lage ist, Filterentwürfe auf bestimmte Operationsverstärkertypen abzustimmen.

Bei der Spezifikation eines Hoch- oder Tiefpassfilters können Sie in **AktivFilter 3.3** selbstverständlich die üblichen Filter-Charakteristiken Bessel, Butterworth und Tschebyscheff (wobei Sie die Welligkeit bis maximal 20 dB beliebig vorgeben können) verwenden. Darüber hinaus können Sie auch eine individuelle Charakteristik vorgeben, bei der Sie für jede Stufe Ihres aktiven Filters die Parameter Polgüte Q und normierte Polfrequenz vorgeben. Dies ist beispielsweise interessant, wenn Sie eine aktive Frequenzweiche für Lautsprecher entwickeln wollen.

Falls Sie Ihre Filter bisher mit Hilfe von Filterkatalogen entworfen haben, können Sie diese jetzt beiseite legen, denn Filterkataloge sind in **AktivFilter 3.3** eingebaut. Sie werden bei der Bedienung von **AktivFilter 3.3** trotzdem keinen Filterkatalog sehen. Das Programm wählt aufgrund Ihrer Vorgaben automatisch den passenden Filterkatalog aus und normiert ihn.

Eine weitere nützliche Eigenschaft von **AktivFilter 3.3** ist die Fähigkeit, jedes Filter ausschließlich mit Normwerten zu realisieren – mit Hilfe der im Programm integrierten Abstimmtechnik erhalten Sie auch mit Normwerten stets ein optimales Design. Sie können bei der Spezifikation eines Filters auswählen, ob alle Widerstandswerte aus der Normreihe E12, E24, E48, E96 oder E192 realisiert werden sollen (bei Bandsperrefiltern: E24, E48, E96 oder E192). Kapazitäten wählt das Programm grundsätzlich aus der Normreihe E12.

AktivFilter 3.3 ist ablauffähig unter Windows in der Version Windows 2000, Windows XP, Windows Vista, Windows 7, Windows 8, Windows 8.1 und Windows 10.

Das Programm ist in vier verschiedenen Ausgaben erhältlich:

- Die **AktivFilter 3.3 Personal Edition** ist eine Vollversion für einen Benutzer mit einem Rechner, die den vollen Funktionsumfang enthält. Sie kann bei Circuit Experts käuflich erworben werden.
- Die **AktivFilter 3.3 Professional Edition** ist eine Vollversion für einen Benutzer mit einem Rechner, die den vollen Funktionsumfang sowie zusätzlich die Möglichkeit zur eigenen Erweiterung der unterstützten Operationsverstärker enthält. Sie kann bei Circuit Experts käuflich erworben werden.
- Die **AktivFilter 3.3 Campus Edition** ist eine Vollversion für beliebig viele Benutzer und Rechner einer Universität, Schule oder Behörde, die den vollen Funktionsumfang sowie zusätzlich die Möglichkeit zur eigenen Erweiterung der unterstützten

Operationsverstärker enthält. Sie kann bei Circuit Experts käuflich erworben werden.

- Die kostenlose **AktivFilter 3.3 Demo Edition** unterstützt Hoch- und Tiefpassfilter bis zweiter Ordnung und die Operationsverstärkertypen uA741 und LF411. Die **AktivFilter 3.3 Demo Edition** kann von der Internetseite www.aktivfilter.de heruntergeladen werden.

Dieses Handbuch ist für alle genannten Ausgaben geeignet; einige der vorgestellten Funktionen, z.B. der Entwurf eines Bandpasses, sind jedoch nur mit einer Vollversion von **AktivFilter 3.3** durchführbar.

3 Funktionsumfang einer Vollversion

Filtertypen und Filterstrukturen :	<ul style="list-style-type: none"> ■ Hoch- und Tiefpass mit Mehrfachgegenkopplung ■ Hoch- und Tiefpass mit Sallen-Key-Struktur ■ Sallen-Key-Hochpass 3. Ordnung mit 1 Operationsverstärker ■ Sallen-Key-Tiefpass 3. Ordnung mit 1 Operationsverstärker ■ Bandpass mit Mehrfachgegenkopplung ■ Aktive Doppel-T-Bandsperre
Filterordnung :	Hochpass, Tiefpass und Bandpass 1. bis 30. Ordnung; Bandsperre 2. Ordnung
Filtercharakteristik für Hoch- und Tiefpässe :	Bessel; Butterworth; Tschebyscheff mit vorgebbarer Welligkeit bis 20 dB; individuelle Charakteristik
Filtercharakteristik für Bandpässe :	Bessel; Butterworth; Tschebyscheff mit vorgebbarer Welligkeit bis 20 dB
Grafische Ausgabe :	<ul style="list-style-type: none"> ■ Amplitudengang in dB nach jeder Berechnung ■ Gruppenlaufzeit
Abspeichern des Designs :	Als HTML-Datei mit Schaltbild als PNG-Datei
Druckausgabe :	<ul style="list-style-type: none"> ■ Grafische Ausgabe ■ Design (Bauteilwerte und Schaltbild)
Speichern / Laden der Spezifikation :	Als Datei vom Dateityp AktivFilter-Spezifikation, *.afs. Dies ist eine Textdatei, die in jedem Editor (z.B. Notepad) lesbar ist. Bei einem Doppelklick auf eine AktivFilter-Spezifikation startet AktivFilter und berechnet das spezifizierte Filter.
Spice-Schnittstelle :	Aufrufsschnittstelle für AC-Analyse mit Ausgabe des Amplitudengangs in dB, des Phasengangs oder der Gruppenlaufzeit; Transient-Analyse für Sprungantwort
OPV-Typen :	> 300 Operationsverstärkertypen und der ideale OPV

4 Unterstützte Operationsverstärkertypen

Eine **AktivFilter 3.3**-Vollversion unterstützt mindestens die folgenden OPV-Typen:

AD648	AD711	AD712	AD713	AD741	AD743	AD797	AD8031	AD8032	AD8045
AD8047	AD8057	AD8058	AD8099	AD817	AD822	AD823	AD825	AD826	AD845
AD847	ADA4528-1	ADA4528-2	CA3140	CA3160	EL2245	EL2445	FAN4174	FAN4274	HA-2600
HA-2602	HA-2620	HA-2622	HA-2841	HA-2842	HA-5020	HA-5101	HA-5102	HA-5104	HA-5112
HA-5114	HA-5127	HA-5137	HA-5147	HA-5190	HA-5221	HA-5222	HA17082	HA17083	HA17084
HA17558	HA17741	LF351	LF353	LF356	LF357	LF411	LF412	LF441	LF442
LF444	LF451	LM107	LM118	LM124	LM139	LM148	LM158	LM193	LM218
LM224	LM239	LM258	LM2902	LM2904	LM293	LM307	LM318	LM324	LM3302
LM339	LM358	LM393	LM4562	LM6118	LM6142	LM6144	LM6152	LM6154	LM6161
LM6162	LM6164	LM6165	LM6171	LM6172	LM833	LMC6062	LMC662	LME49710	LME49720
LME49740	LME49860	LME49870	LME49990	LMH6624	LMH6626	LMH6642	LMH6643	LMH6644	LMH6657
LMH6658	LMP7701	LMP7702	LMP7704	LMV771	LMV772	LMV774	LMV821	LMV822	LMV824
LT1013	LT1013D	LT1014	LT1028	LT1055	LT1056	LT1115	LT1151	LT1211	LT1212
LT1213	LT1214	LT1352	LT1353	LT1355	LT1356	LT1357	LT1358	LT1359	LT1361
LT1362	LT1363	LT1364	LT1365	LT1413	LT1462	LT1463	LT1464	LT1465	LT1492
LT1493	LT1494	LT1495	LT1496	LT1498	LT1499	LT1635	LT1638	LT1639	LT1677
LT1792	LT1793	LT1801	LT1802	LT1815	LT1816	LT1817	LT1884	LT1885	LT2078
LT2079	LT2178	LT2179	LT6236	LT6237	LT6238	MAX410	MC1458	MC1558	MC33078
MC33079	MC33272	MC33274	MCP6001	MCP6002	MCP6004	NCV33274	NE5532	NE5533	NE5534
OP07	OP113	OP1177	OP15	OP16	OP160	OP20	OP21	OP213	OP2177
OP27	OP270	OP275	OP37	OP413	OP4177	OP467	OP470	OPA130	OPA132
OPA134	OPA141	OPA1611	OPA1612	OPA1652	OPA1654	OPA2107	OPA2132	OPA2134	OPA2141
OPA2227	OPA2228	OPA227	OPA228	OPA2334	OPA2335	OPA2340	OPA2354	OPA2355	OPA2356
OPA2369	OPA2604	OPA2652	OPA2725	OPA2726	OPA334	OPA335	OPA3355	OPA340	OPA354
OPA355	OPA356	OPA369	OPA4132	OPA4134	OPA4141	OPA4227	OPA4228	OPA4340	OPA4354
OPA4820	OPA604	OPA606	OPA627	OPA637	OPA650	OPA655	OPA725	OPA726	OPA820

OPA842	OPA843	THS4001	THS4304	TL022	TL031	TL032	TL034	TL051	TL052
TL054	TL061	TL062	TL064	TL071	TL072	TL074	TL081	TL082	TL084
TL3472	TL3474	TL971	TL972	TL974	TLC2201	TLC2202	TLC2272	TLC2274	TLE2071
TLE2072	TLE2074	TLE2081	TLE2082	TLE2084	TLV2460	TLV2461	TLV2462	TLV2463	TLV2464
TLV2465	TS902	TS904	TS912	TS914	TS924	TS951	TS952	TS954	uA741

4.1 Hinweis zur Mindestverstärkung

Einige der von **AktivFilter 3.3** unterstützten OPV-Typen, z.B. der LF 357, erfordern aus Gründen der Stabilität beim Einsatz eine Mindestverstärkung. Das bedeutet, dass Sie bei Verwendung eines solchen Typs sicherstellen müssen, dass der Operationsverstärker mindestens mit der genannten Verstärkung betrieben wird. In **AktivFilter 3.3** ist es in allen Filterschaltungen möglich, den OPV mit Verstärkung zu betreiben. Falls Sie sich nicht sicher sind, ob Ihre Filterschaltung mit dem gewünschten OPV-Typ stabil ist, führen Sie im Anschluss an den Entwurf eine Spice-Simulation (Amplitudengang in dB oder linear) Ihres entworfenen Filters durch. Falls Sie keine Spice-Simulation durchführen wollen oder können, sollten Sie im Datenblatt des Herstellers nachlesen, welche Mindestverstärkung für den von Ihnen eingesetzten OPV erforderlich ist.

4.2 Hinweise zur Dimensionierung von Operationsverstärkerschaltungen

Es leuchtet ein, dass ein Operationsverstärker nicht so weit angesteuert werden darf, dass das Ausgangssignal begrenzt (abgeschnitten) wird. Hierzu wird der Operationsverstärker üblicherweise mit Versorgungsspannungen betrieben, die die maximal auftretende Signalamplitude deutlich übersteigen. Beispielsweise verarbeiten Operationsverstärker in Audio-Schaltungen typischerweise Signalamplituden von ca. 1 Volt und werden mit Versorgungsspannungen von +/-12 Volt oder mehr betrieben.

Die Widerstandswerte von Operationsverstärkerschaltungen sollten typischerweise im Bereich von 1 k .. 100 k liegen. 10 k kann für die meisten Schaltungen mit Operationsverstärkern als optimaler Wert angesehen werden. Kleinere Werte als 1 k stellen für den Ausgang des Operationsverstärkers eine unnötige Belastung dar, die zu einem unerwünschten Spannungsabfall an seinem Ausgangswiderstand führt. Größere Werte als 100 k können den Signal-Rauschabstand unnötig verringern. Jedoch gibt es auch Ausnahmen, in denen ein Verlassen des genannten Bereichs notwendig sein kann:

- Falls Sie eine Schaltung bauen, die Signale mit Frequenzen im Megahertzbereich verarbeiten soll, können Widerstandswerte unter 1 k notwendig sein.
- Falls Sie ein aktives Filter bauen, das extrem niedrige Frequenzen ausfiltern soll, z.B. Frequenzen mit einer Periodendauer im Bereich von Minuten oder Stunden, sind wegen der großen Zeitkonstanten Widerstandswerte oberhalb von 100 k erforderlich.

AktivFilter 3.3 lässt es zu, alle diese Schaltungen, auch die genannten Ausnahmefälle, zu dimensionieren.

In den meisten Fällen werden Sie vermutlich Filter wünschen, die im Niederfrequenzbereich oder zumindest im Bereich 1 Hz .. 1 MHz arbeiten. Dann stellt der o.g. Wert von 10 k eine gute Wahl dar. Dies ist auch der Wert, den **AktivFilter 3.3** beim ersten Aufruf des Menüpunkts **DATEI, NEUES FILTER** nach jedem Programmstart für das Impedanzniveau vorschlägt.

4.3 Ausgangsimpedanz eines aktiven Filters

Alle aktiven Filter arbeiten mit gegengekoppelten Operationsverstärkern. Die Ausgangsimpedanz eines gegengekoppelten Operationsverstärkers ist nahezu Null. Dies entspricht auch theoretisch annähernd der Ausgangsimpedanz eines aktiven Filters bei niedrigen Frequenzen, bei denen man die Gegenkopplung als eingeschwungen also quasi-statisch betrachten kann.

Allerdings darf man den Ausgang eines üblichen Operationsverstärkers nicht beliebig niederohmig belasten. Bei speziellen Leistungsoperationsverstärkern, zu denen z.B. auch Endstufenschaltungen zur Ansteuerung von Lautsprechern gehören, kann der Abschlusswiderstand je nach Spezifikation des Verstärkers im Bereich weniger Ohm liegen. Bei den Standard-Operationsverstärkern, die auch in AktivFilter 3.3 bei der Berechnung angeboten werden, liegt die minimale Lastimpedanz wesentlich höher, da: der Ausgangswiderstand eines üblichen OPV (ohne Gegenkopplung) etwa 100 Ohm beträgt.

Falls man maximal 50 % Spannungsabfall am Innenwiderstand des OPV-Ausgangs in Kauf nimmt, müsste man den Ausgang mit mindestens 100 Ohm abschließen; allerdings würde sich dabei sowohl die maximale Ausgangsamplitude als auch die Verstärkung des OPV um 50 % reduzieren. Falls man den Ausgang hingegen mit 1 kOhm belastet, reduzieren sich Verstärkung und maximale Ausgangsamplitude nur um 10 %. Daher sollte man am Ausgang einen Lastwiderstand von 1 kOhm oder mehr anschließen.

Da die Ausgangsimpedanz eines aktiven Filters aufgrund der Gegenkopplung relativ niedrig ist, was i.d.R. erwünscht ist, braucht und kann man in **AktivFilter 3.3** die Ausgangsimpedanz des Filters nicht vorzugeben.

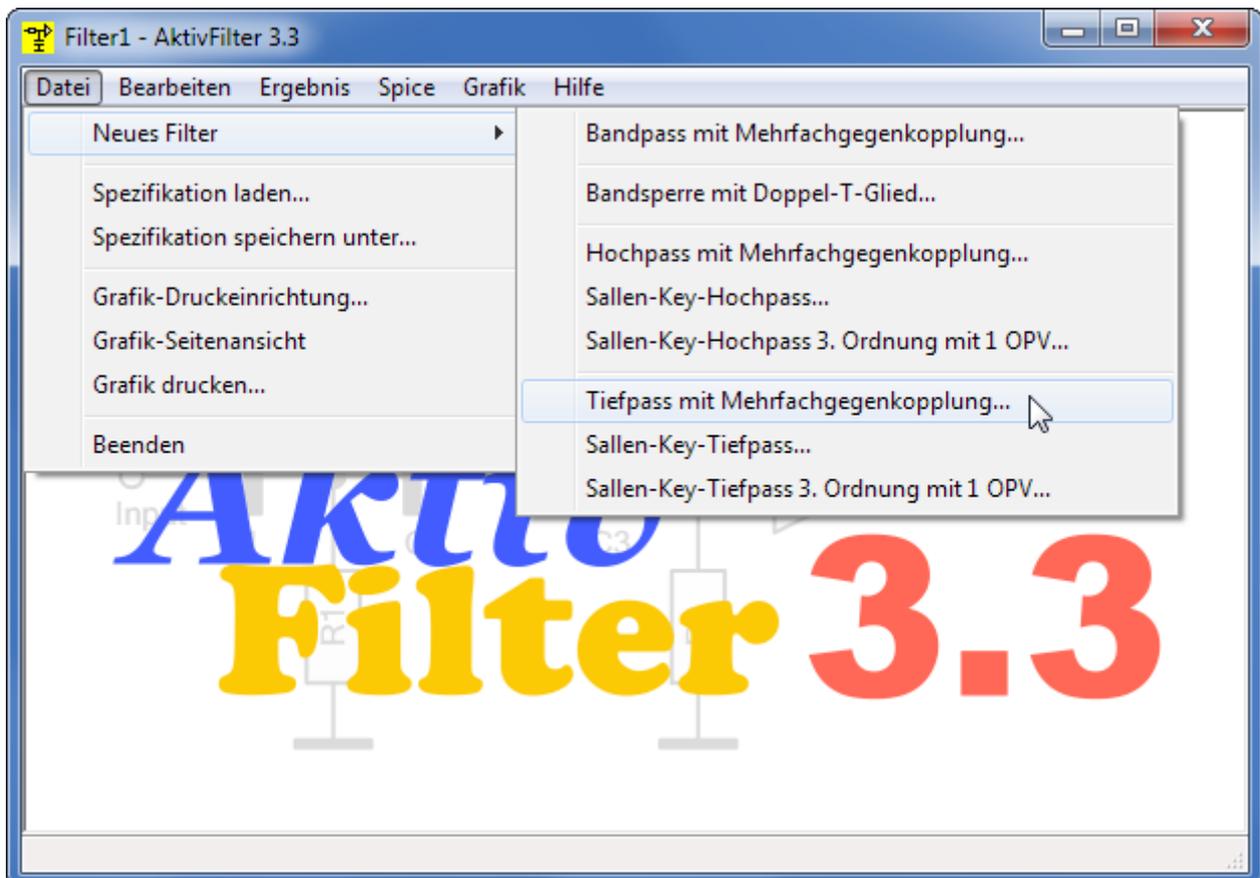
4.4 Eingangsimpedanz eines aktiven Filters

Die Eingangsimpedanz eines aktiven Filters ist fast immer frequenzabhängig. Meistens möchte man wissen, welchen Mindestwert die Eingangsimpedanz eines Filters hat, um beispielsweise sicherzustellen, dass eine Schaltung, die ein Signal in das Filter einspeist, mit einem ausreichend großen Lastwiderstand abgeschlossen wird.

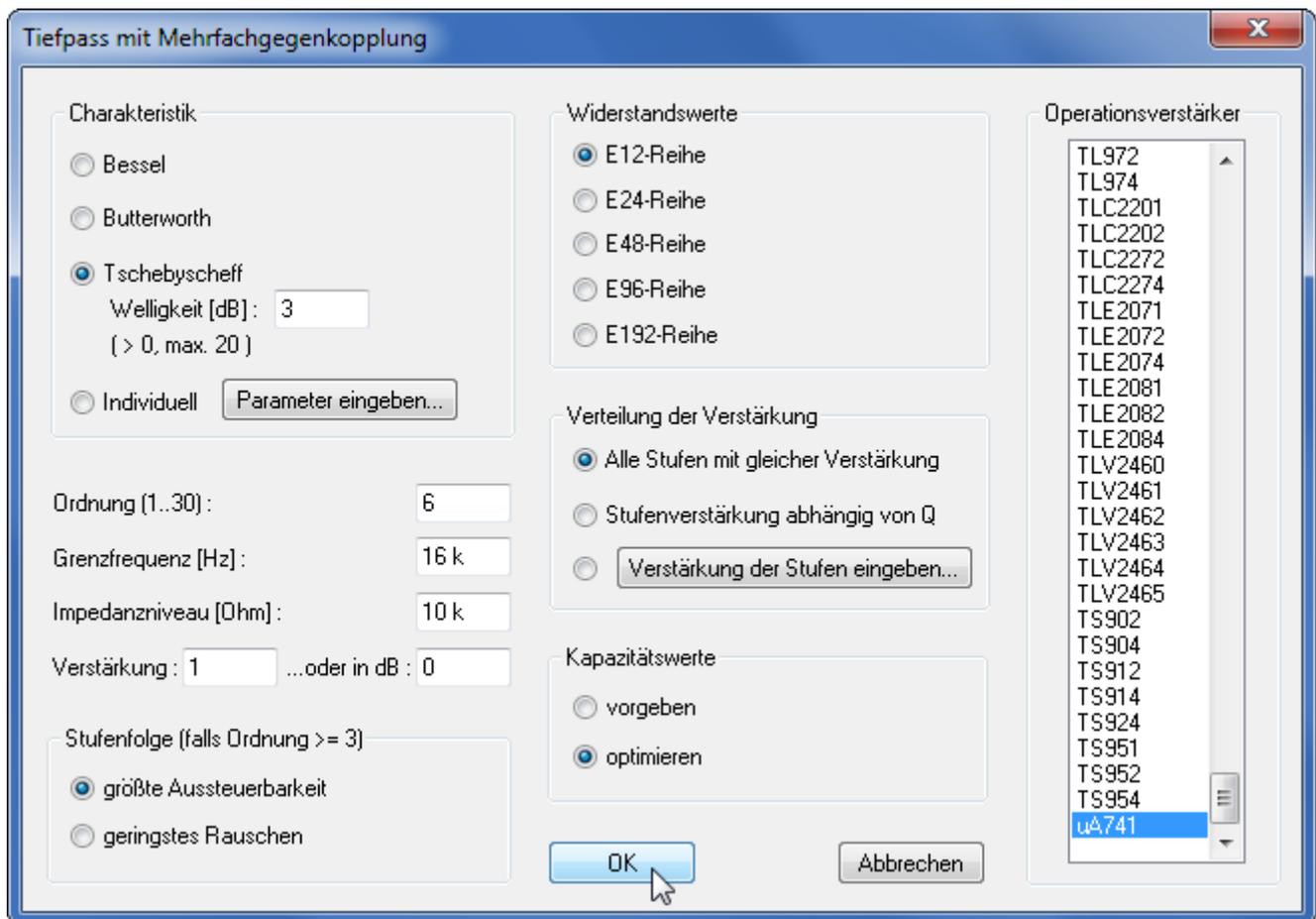
In **AktivFilter 3.3** entspricht dieser Wert näherungsweise dem Impedanzniveau, einem Parameter, den Sie bei der Spezifikation Ihres Filters vorgeben.

5 Bedienung des Programms

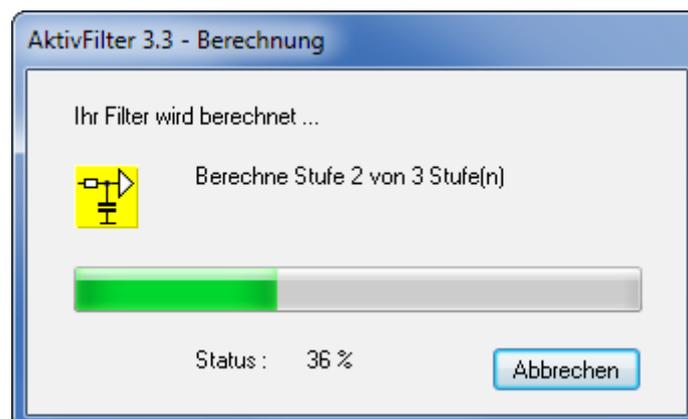
Einen neuen Filterentwurf starten Sie stets mit dem Menüpunkt **DATEI, NEUES FILTER**. Im Untermenü wählen Sie den Filtertyp und seine Struktur aus. Im folgenden Beispiel soll ein Tiefpass mit Mehrfachgegenkopplung entworfen werden:



Im folgenden Dialog spezifizieren Sie alle Vorgaben für Ihr zu entwerfendes Filter. Wenn Sie auf **OK** klicken, wird die Berechnung des Filters mit diesen Vorgaben gestartet:



Während der Berechnung wird für jede Stufe des Filters durch eine Verlaufsanzeige der Berechnungsfortschritt in % angezeigt. Sie erkennen also, wie lange Sie auf das Ergebnis warten müssen:

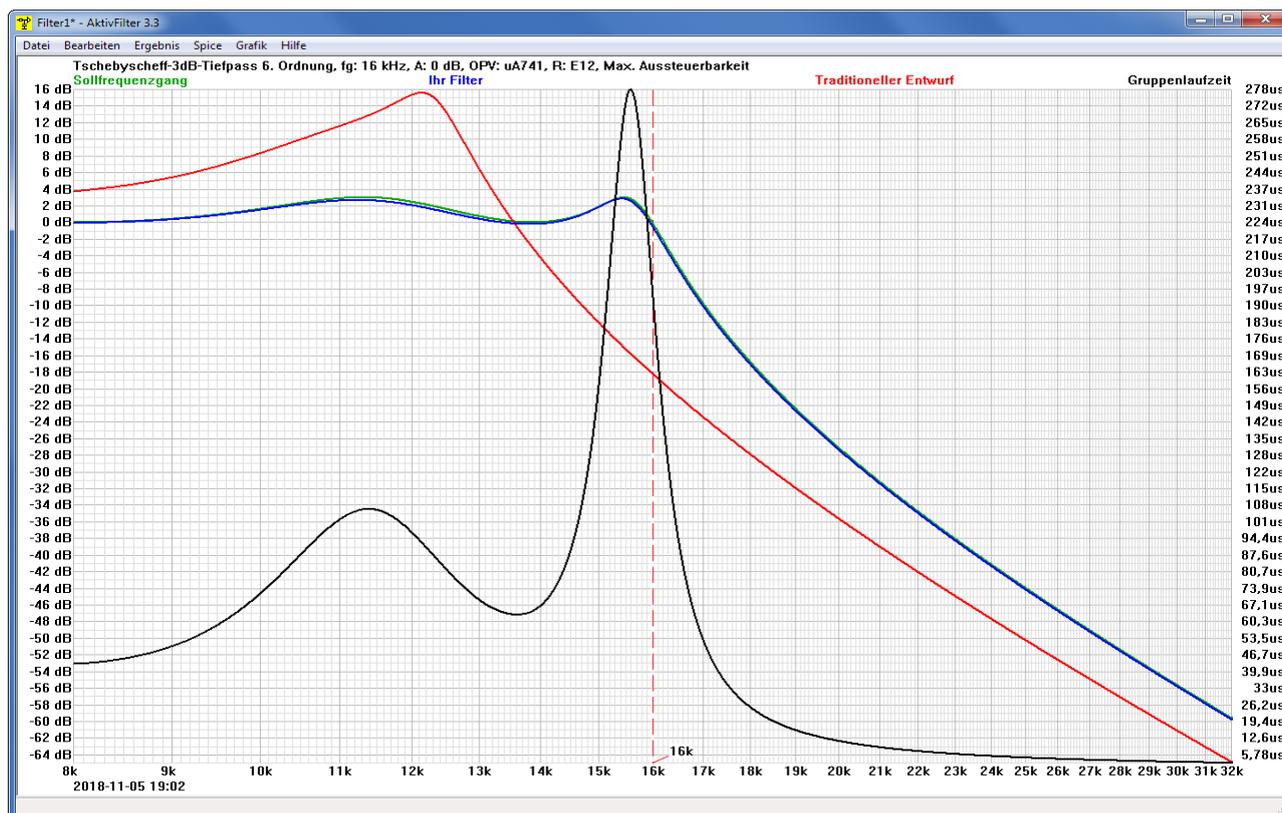


Das Programm prüft bei der Dimensionierung jeder Stufe, ob ggf. eine weitere Optimierung der Bauteilwerte sinnvoll ist. Sollte dies der Fall sein, erscheint der gezeigte Dialog mit der Ausgabe „zusätzliche Abstimmung dieser Stufe“. Diese zusätzliche Abstimmung kann auch mehrfach, bis zu viermal, vorgenommen werden.

6 Das Ergebnis

6.1 Grafik

Nach Abschluss der Berechnung zeigt Ihnen **AktivFilter 3.3** sofort ein Diagramm mit dem Frequenzgang des Filters:



Die im Bild **grün dargestellte Kurve** stellt den Sollfrequenzgang des Amplitudenfrequenzgangs dar, entsprechend dem theoretischen Verlauf eines Filters mit einem idealen OPV und Bauteilen mit kontinuierlichen Werten.

Zu jedem Amplitudenfrequenzgang gehört die Skala am linken Rand des Diagramms.

Die **blaue Kurve** zeigt den Amplitudenfrequenzgang Ihres entworfenen Filters, wobei der OPV-Typ und auch die Normwerte der Widerstände und Kondensatoren berücksichtigt sind. Wie Sie erkennen, wird die grüne Kurve fast vollständig von der blauen Kurve verdeckt. **AktivFilter 3.3** hat also Ihr Design sehr gut abgeglichen. Behalten Sie jedoch im Hinterkopf, dass diese Grafik unter Verwendung des internen Operationsverstärkermodells zustande gekommen ist. Dieses interne OPV-Modell ist einfacher als z.B. die in Spice verwendeten Modelle und berücksichtigt nur ausgewählte Attribute des OPVs. Diese Grafik soll Ihnen nur einen ersten schnellen Anhaltspunkt für Ihr Entwurfsergebnis liefern. Eine Überprüfung des Ergebnisses mit Spice, z.B. mit Hilfe der Spice-Aufrufchnittstelle, empfiehlt sich auf jeden Fall.

Die **rote Kurve** zeigt, welchen Amplitudenfrequenzgang Ihr Filter hätte, wenn Sie es nach der herkömmlichen Methode, die von einem idealen OPV ausgeht, entworfen hätten. Man erkennt, dass das Ergebnis des traditionellen Entwurfs hier unbrauchbar ist. Zur Erinnerung: Das vorliegende Filter ist ein Tschebyscheff-Tiefpass 6. Ordnung mit 16 kHz Grenzfrequenz mit dem OPV uA741. Eigentlich sind dies keine besonders ungewöhnlichen Anforderungen – trotzdem erkennt man bereits hier die Notwendigkeit eines Programms wie **AktivFilter 3.3**.

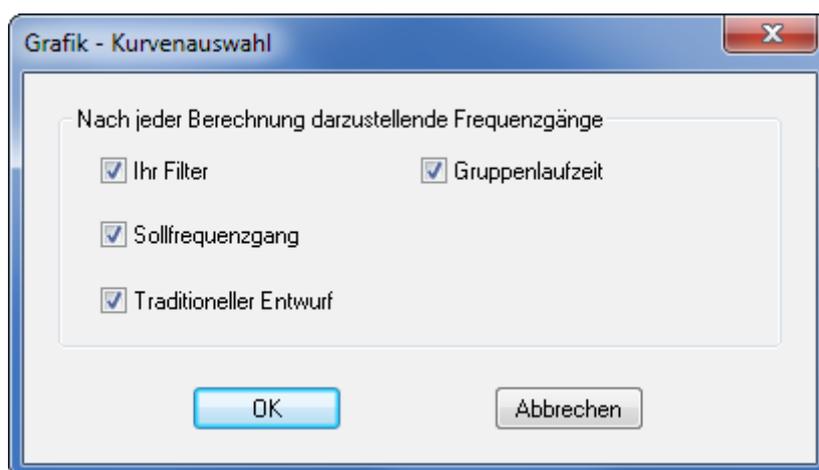
Die Abweichung der roten Kurve von der grünen Kurve gibt darüber hinaus Aufschluss über die Abhängigkeit des Filters von den OPV-Parametern. Bedenken Sie, dass ein Design, das die frequenzabhängigen Parameter des OPVs stärker kompensiert, auch mehr von den herstellungsbedingten Toleranzen dieser Parameter abhängig ist. Bei zu großen Abweichungen der beiden Kurven empfiehlt sich – abhängig von Ihren Toleranzanforderungen – ggf. die Wahl eines anderen OPV-Typs.

Hinweis zu den Tschebyscheff-Filtern: Die Grenzfrequenz eines Filters mit Tschebyscheff-Charakteristik ist in **AktivFilter 3.3** stets dort, wo der Amplitudenverlauf den Kanal der vorgegebenen Welligkeit in Richtung Sperrbereich verläßt. Dies geschieht in Übereinstimmung mit der Standardliteratur zum Filterentwurf (z.B. L. v. Wangenheim, Aktive Filter, Hüthig Verlag). Bei der Bessel- und Butterworth-Charakteristik bezieht sich die Grenzfrequenz hingegen auf die Frequenz, bei der die Amplitude auf -3 dB abgefallen ist.

Die **schwarze Kurve** zeigt Ihnen den Verlauf der Gruppenlaufzeit Ihres Filters. Zur Gruppenlaufzeit gehört die Skala am rechten Rand des Diagramms.

Die gestrichelte senkrechte **rote Linie** markiert die von Ihnen vorgegebene Grenzfrequenz des Filters.

Sie können die darzustellenden Kurven in einem Dialog auswählen, den Sie unter **GRAFIK, KURVENAUSWAHL** aufrufen können:



6.2 Dimensionierung des Filters

Zur Anzeige der Bauteil-Werte klicken Sie im Menüpunkt **ERGEBNIS** auf **DIMENSIONIERUNG**. Wie Sie im folgenden Bild sehen, sind alle Bauteilwerte aus der Normreihe E12:

Ergebnis - Dimensionierung

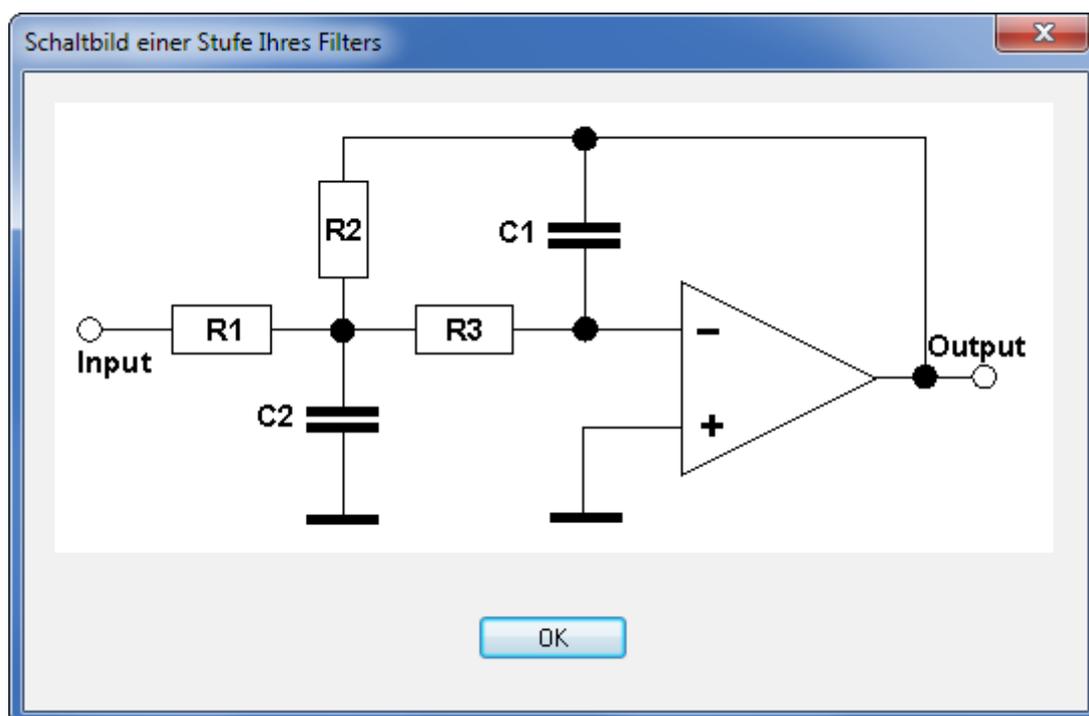
Struktur: Mehrfachgegenkopplung
 Tschebyscheff-3dB-Tiefpass 6. Ordnung, fg: 16 kHz, A: 0 dB
 OPV: uA741, R: E12, Max. Aussteuerbarkeit

Stufe	R1	R2	R3	C1	C2
1	10 k	10 k	1 k	2,7 n	39 n
2	10 k	10 k	1 k	330 p	39 n
3	10 k	10 k	15 k	15 p	27 n

OK

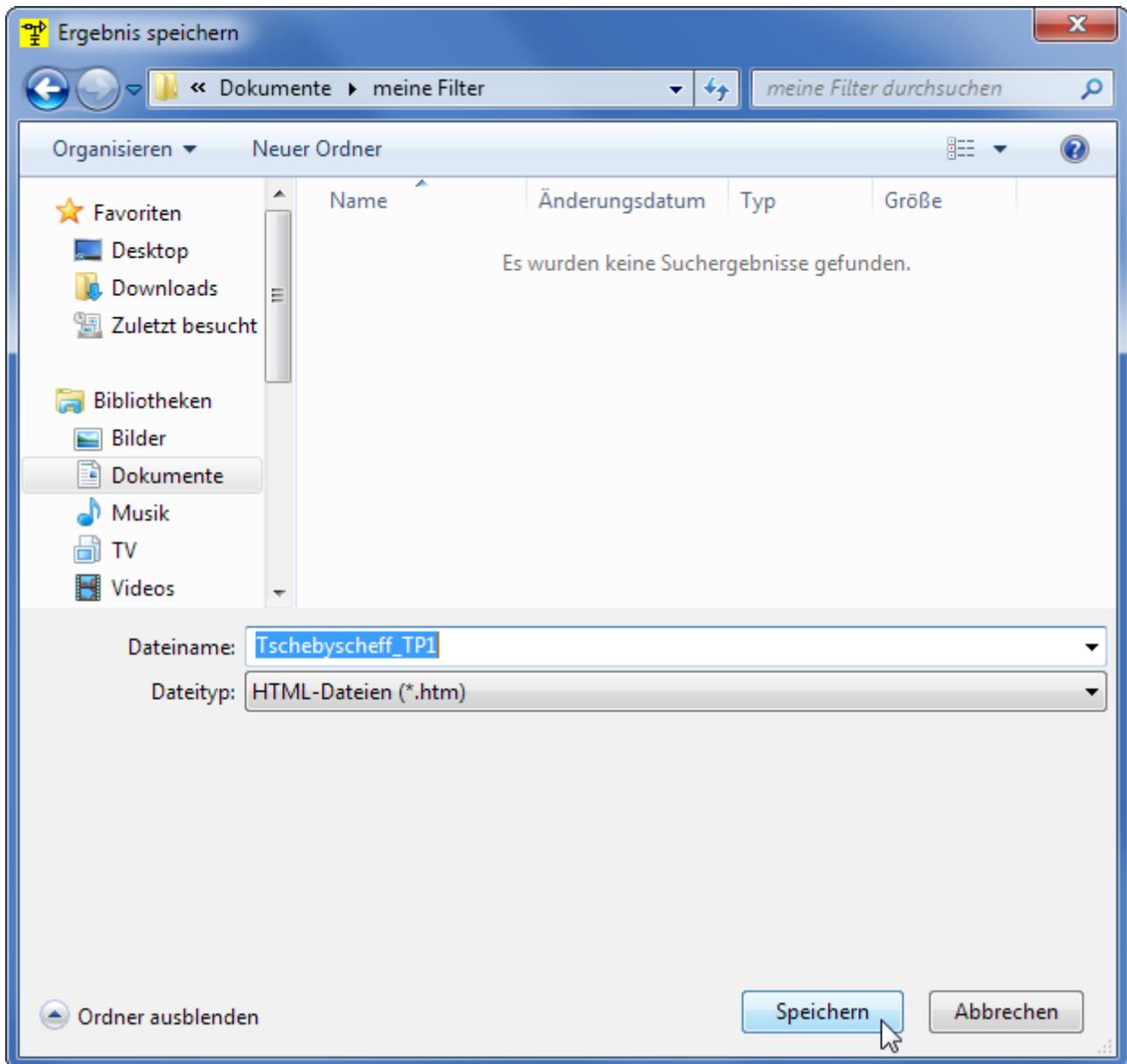
6.3 Schaltbild des Filters

Auch dem Schaltbild sollten Sie einen Blick widmen. Klicken Sie hierzu einfach auf **ERGEBNIS, SCHALTBILD** und Sie sehen das unten dargestellte Bild (das zuvor angezeigte Fenster mit den Bauteilwerten können Sie dabei geöffnet lassen). Dargestellt wird dabei immer das Schaltbild einer Stufe Ihres Filters. Falls Ihr Filter aus mehreren Stufen besteht, hat jede Stufe dieses Schaltbild. Sie müssen die Stufen hintereinander schalten, d.h. der Ausgang (Output) von Stufe 1 wird mit dem Eingang (Input) von Stufe 2 verbunden, der Ausgang von Stufe 2 mit dem Eingang von Stufe 3 usw. Der Eingang von Stufe 1 ist der Eingang Ihres Filters und der Ausgang der letzten Stufe ist der Ausgang Ihres Filters.



6.4 Ergebnis abspeichern

Zum Abspeichern Ihres Entwurfsergebnisses wählen Sie **ERGEBNIS, SPEICHERN UNTER** und geben Sie einen Dateinamen ein:



AktivFilter 3.3 speichert Ihren Filterentwurf stets als HTML-Datei mit eingebetteter Grafik des Schaltbilds. Für die Grafik wird im selben Verzeichnis eine Datei gleichen Namens mit dem Dateityp PNG abgespeichert. Bitte denken Sie daran, dass Sie beide Dateien benötigen, wenn Sie Ihr Ergebnis weitergeben wollen - z.B. indem Sie es in einem Intranet, im Internet oder auf einem Datenträger ablegen.

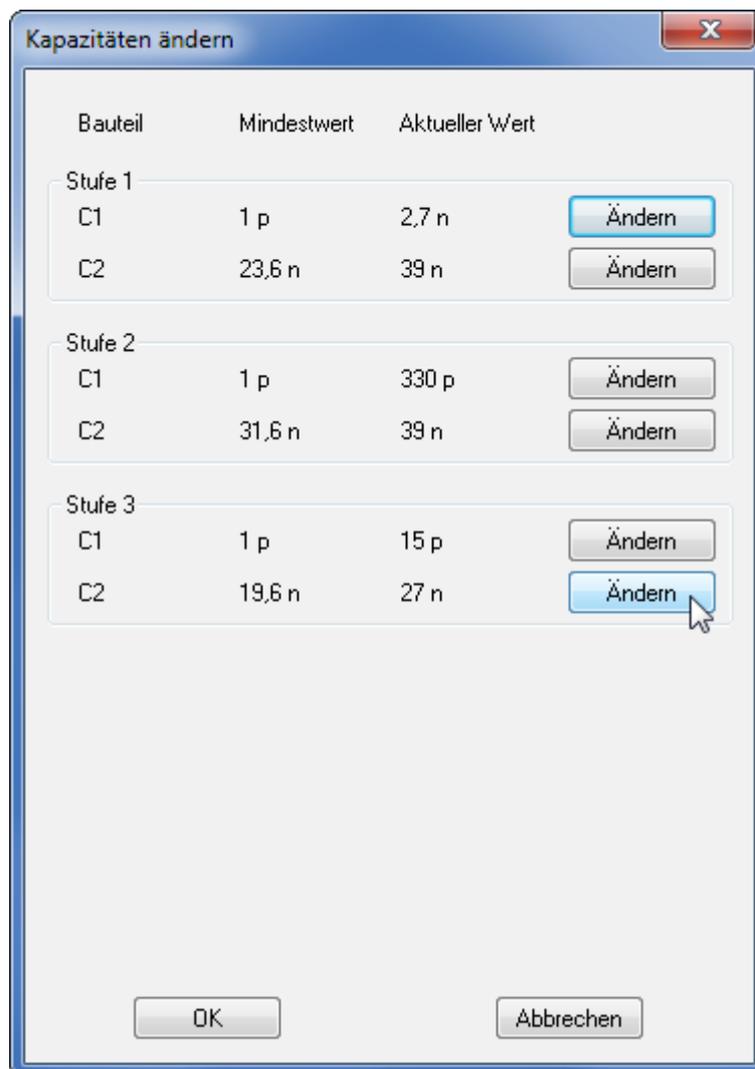
6.5 Ergebnis ausdrucken

Zum Ausdrucken Ihres Filterentwurfs wählen Sie **ERGEBNIS, DRUCKEN**.

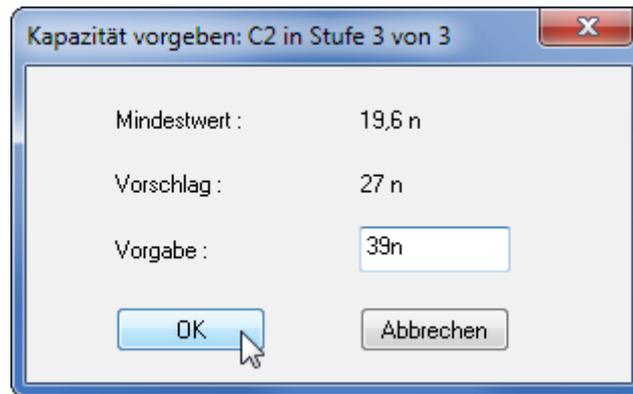
6.6 Kapazitäten ändern

Betrachten Sie noch einmal die Bauteilwerte des letzten Entwurfs, speziell die Kapazitätswerte (siehe 6.2). Wünschenswert wäre es, wenn C2 auch für die 3. Stufe einen Wert von 39 nF hätte. Dies können Sie mit **AktivFilter 3.3** sehr einfach erreichen:

Wählen Sie **BEARBEITEN, KAPAZITÄTEN ÄNDERN** und sehen Sie sich den dabei erscheinenden Dialog an:

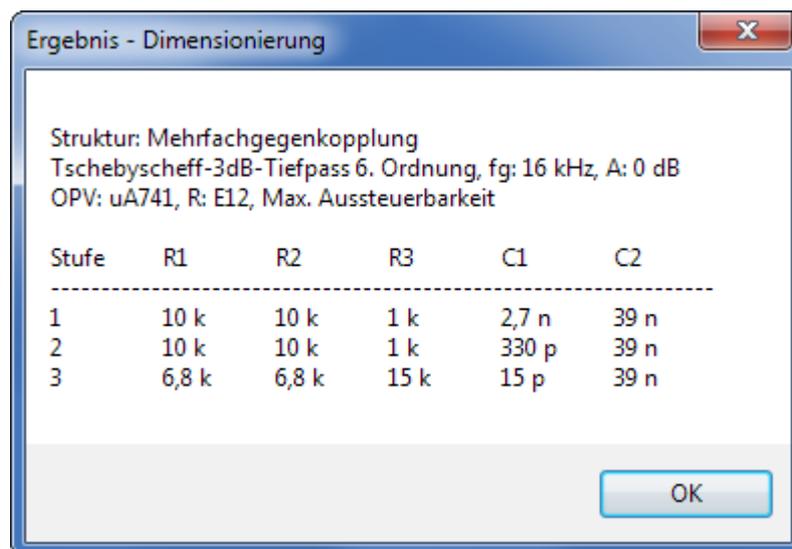


Dieser Dialog listet alle Kapazitätswerte Ihres entworfenen Filters und die zulässigen Mindestwerte auf. Sie können hier jede Kapazität einzeln ändern. Klicken Sie auf den Knopf **ÄNDERN** für C2 in Stufe 3:



Hier können Sie den neuen Kapazitätswert von C2 in Stufe 3 direkt eingeben. Geben Sie dort 39n ein und klicken Sie auf **OK**. Es erscheint wieder der vorherige Dialog „Kapazitäten ändern“, so dass Sie die Gelegenheit haben, einen weiteren Kapazitätswert vorzugeben. Da Sie keine weiteren Kapazitäten ändern wollen, klicken Sie jetzt auf **OK**.

AktivFilter startet sofort die Berechnung. Der Aufruf von **ERGEBNIS, DIMENSIONIERUNG** zeigt die Bauteilwerte des Filters nach der Änderung von C2 in Stufe 3:



7 Spice-Aufrufsschnittstelle

Vielleicht können Sie sich nicht so recht vorstellen, dass die von **AktivFilter 3.3** entworfenen Filter dem Sollfrequenzgang wirklich so nahe kommen. Schließlich wissen Sie nicht, wie genau das in **AktivFilter 3.3** enthaltene Modell des Operationsverstärkers, das bei der Berechnung verwendet wurde, wirklich ist. Aber es ist für Sie ein Leichtes, Ihren mit Hilfe von **AktivFilter 3.3** erzeugten Entwurf zu überprüfen. Hierzu enthält **AktivFilter 3.3** eine einfach zu bedienende Spice-Aufrufsschnittstelle. Die Spice-Aufrufsschnittstelle ist in Verbindung mit einem Spice-Simulationsprogramm wie PSpice oder LTSpice verwendbar.

7.1 Spice-Version

Beispielhaft wollen wir hier die Nutzung der Spice-Aufrufsschnittstelle mit dem Simulationsprogramm PSpice beschreiben. Sie können ebenso das kostenlose und sehr leistungsfähige Programm LTSpice von Linear Technologies verwenden, das auf der Webseite <http://www.linear.com/designtools/software> heruntergeladen werden kann.

Bei der Nutzung von PSpice spielt es zunächst keine Rolle, ob Sie auf Ihrem Rechner eine kostenlose Demo-Version oder eine Vollversion von PSpice installiert haben. Falls Sie PSpice nicht besitzen, können Sie sich eine kostenlose PSpice-Version (die PSpice-Student-Edition oder die ORCAD-Lite-Edition) von der ORCAD-Webseite (www.orcad.com) herunterladen oder z.B. das PSpice-Buch von Robert Heinemann kaufen (siehe www.spicelab.de), das diese kostenlosen PSpice-Versionen enthält.

Die kostenlosen PSpice-Versionen haben gegenüber einer PSpice-Vollversion Einschränkungen, die Sie bei Benutzung der Spice-Aufrufsschnittstelle von AktivFilter 3.3 kennen sollten: Abhängig von der Programmversion können Sie nur Schaltungen mit maximal 2 oder 3 Operationsverstärkern simulieren und die mitgelieferten Bibliotheken enthalten nur die OPV-Typen uA 741 und LF 411. Falls Sie die Spice-Aufrufsschnittstelle für Filter mit anderen Operationsverstärkertypen benutzen wollen, benötigen Sie eine Bibliothek (.LIB-Datei), die das Modell Ihres OPV-Typs enthält. Für fast alle in **AktivFilter 3.3** integrierten OPV-Typen können Sie solche Bibliotheken von den Webseiten der Halbleiterhersteller kostenlos herunterladen; beachten Sie die Hinweise zum OPV-Modell (siehe 7.2).

7.2 Hinweise zum OPV-Modell

Die für die Spice-Aufrufsschnittstelle von **AktivFilter 3.3** gespeicherten Dateien sind so aufgebaut, dass der OPV die Anschlüsse (+)-Eingang, (-)-Eingang, Ausgang, (+)-Versorgungsspannung und (-)-Versorgungsspannung hat und diese wie beim uA741 oder LF411 belegt sind. Falls der von Ihnen eingesetzte OPV weitere Anschlüsse hat, die beschaltet werden müssen, müssen Sie diese Beschaltung in der LIB-Datei einfügen, also ein geändertes Modell erstellen. Ein geändertes Modell ist auch erforderlich, falls die Anschlüsse Ihres gewählten OPVs gegenüber dem uA741 vertauscht sind. Dann müssen Sie nämlich das Modell so ändern, dass die Anschlussbelegung passt. Für solche geänderten Modelle empfiehlt sich die Erstellung einer eigenen LIB-Datei, die Sie nur in Verbindung mit **AktivFilter 3.3** nutzen.

Glücklicherweise verfügen die meisten Operationsverstärkertypen über die gleiche

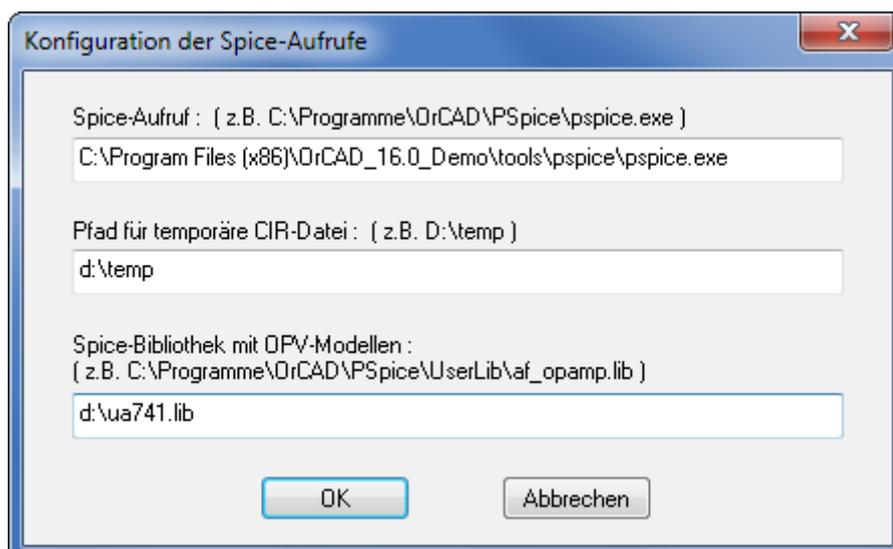
Anschlussbelegung wie der uA741 und erfordern keine zusätzliche Beschaltung. In den meisten Fällen werden Sie also keine besonderen Spice-Modelle erstellen müssen.

7.3 Konfiguration

Vor der erstmaligen Benutzung der Spice-Schnittstelle müssen Sie diese Schnittstelle konfigurieren. Wählen Sie hierzu **SPICE, KONFIGURATION...**



Daraufhin erscheint der folgende Dialog:



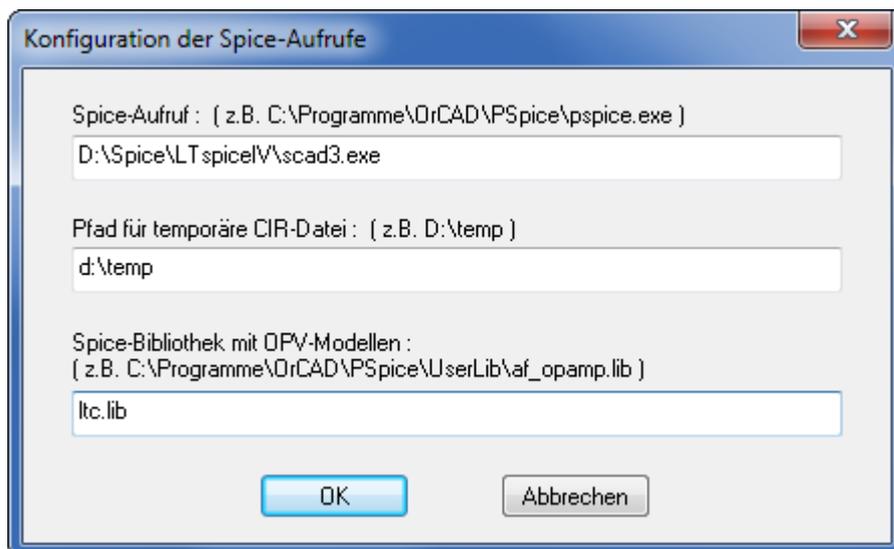
Geben Sie im oberen Feld den kompletten Pfad und Dateinamen des auf Ihrem Rechner installierten Spice-Programms an.

Im mittleren Feld des Dialogs geben Sie ein Verzeichnis an, in dem **AktivFilter 3.3** seine temporären Dateien, die für den Spice-Aufruf erforderlich sind, ablegt (dies sind zwei Dateien: eine Netzliste (*.CIR) und eine Datei zur Steuerung von PROBE (*.PRB)). Das anzugebende Verzeichnis muss existieren und Sie müssen in diesem Verzeichnis über Schreibrechte verfügen.

Im unteren Feld geben Sie den Namen der Bibliotheksdatei an, die Ihre OPV-Modelle enthält. Bei Verwendung der Student-Edition von Spice können Sie bei Angabe von eval.lib Filter mit den OPV uA741 und LF411 simulieren. Falls Sie eine eigene Datei mit Modellen erstellt haben, die Sie z.B. von den Webseiten der Halbleiterhersteller heruntergeladen haben, geben Sie den Namen dieser Datei hier an und legen diese Datei dort ab, wo die anderen Spice-Bibliotheken abgelegt sind. In unserem Beispiel verwenden wir eine Datei ua741.lib, die das Modell des uA741 enthält.

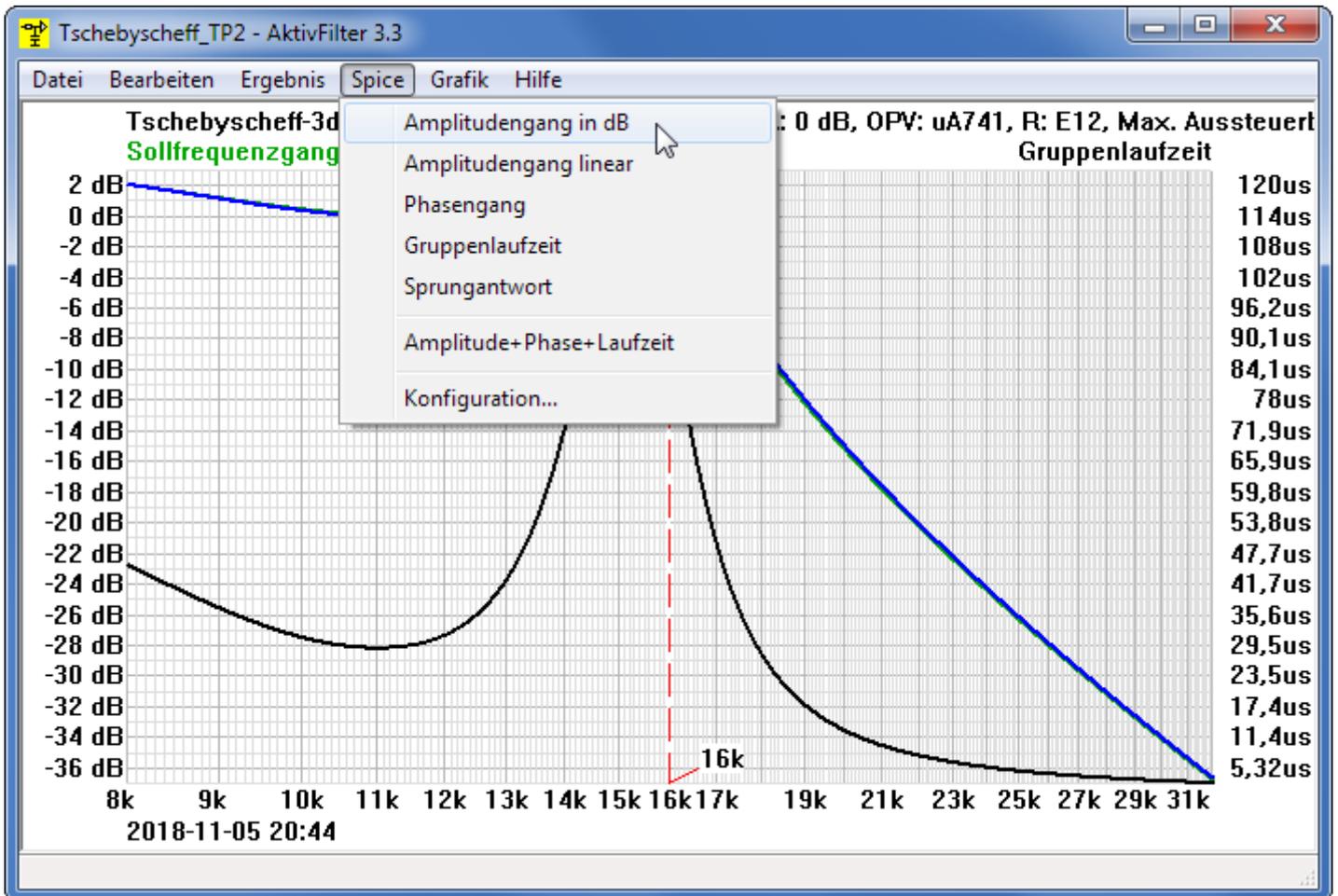
Die Einstellungen bleiben auch nach Verlassen des Programms erhalten: Sie stehen in der Registry unter HKEY_CURRENT_USER\Software\SoftwareDidaktik\AktivFilter und werden bei jedem Starten von **AktivFilter 3.3** automatisch geladen.

7.3.1 Beispiel einer Spice-Konfiguration für LTSpice

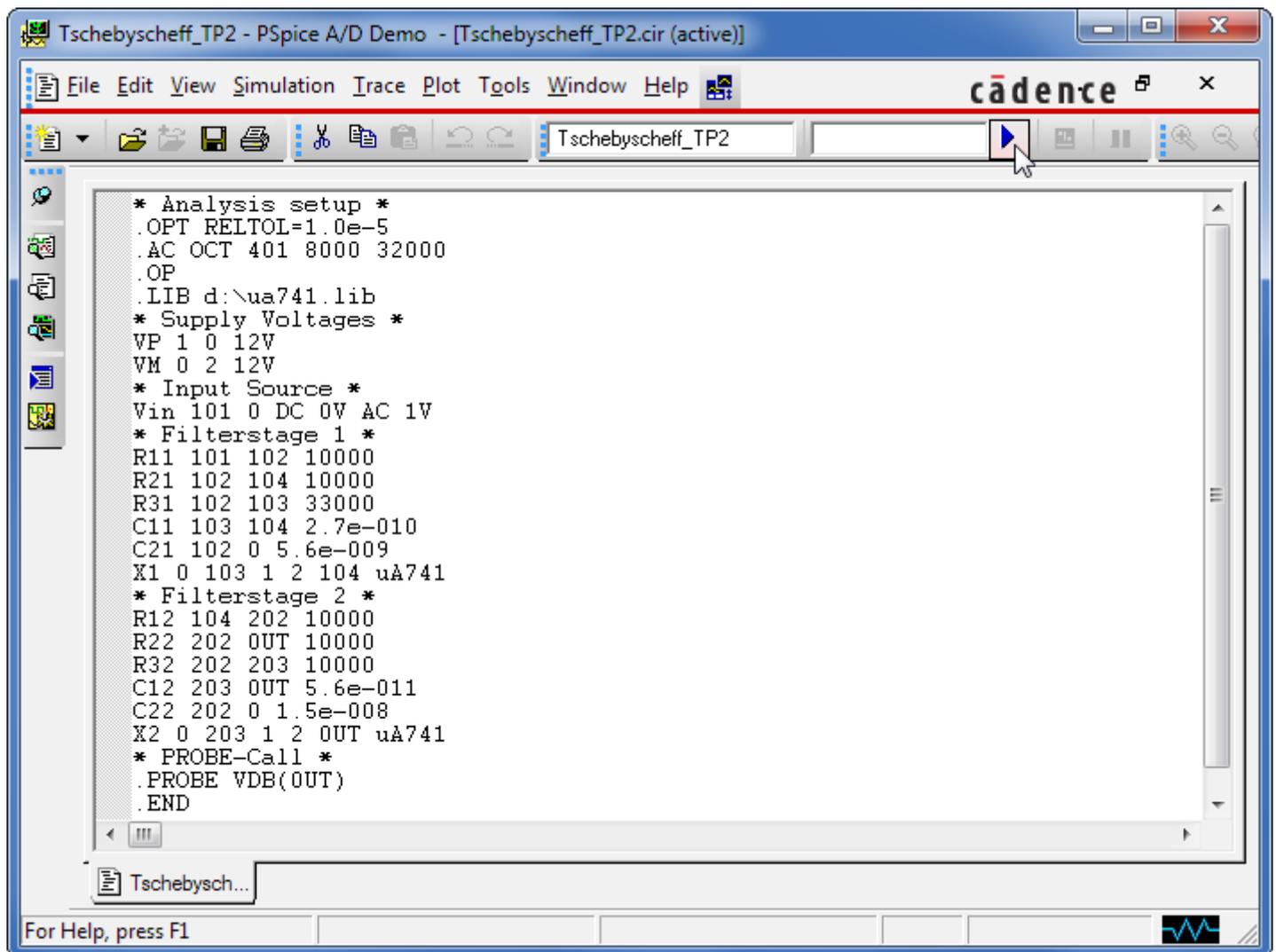


7.4 Amplitudengang mit Spice simulieren

Jetzt können Sie die Spice-Aufrufsschnittstelle benutzen. Im folgenden Beispiel wird ein Tschebyscheff-Tiefpass 4. Ordnung, der mit **AktivFilter 3.3** entworfen wurde, mit PSpice simuliert. Klicken Sie zunächst auf **SPICE, AMPLITUDENGANG IN DB**:

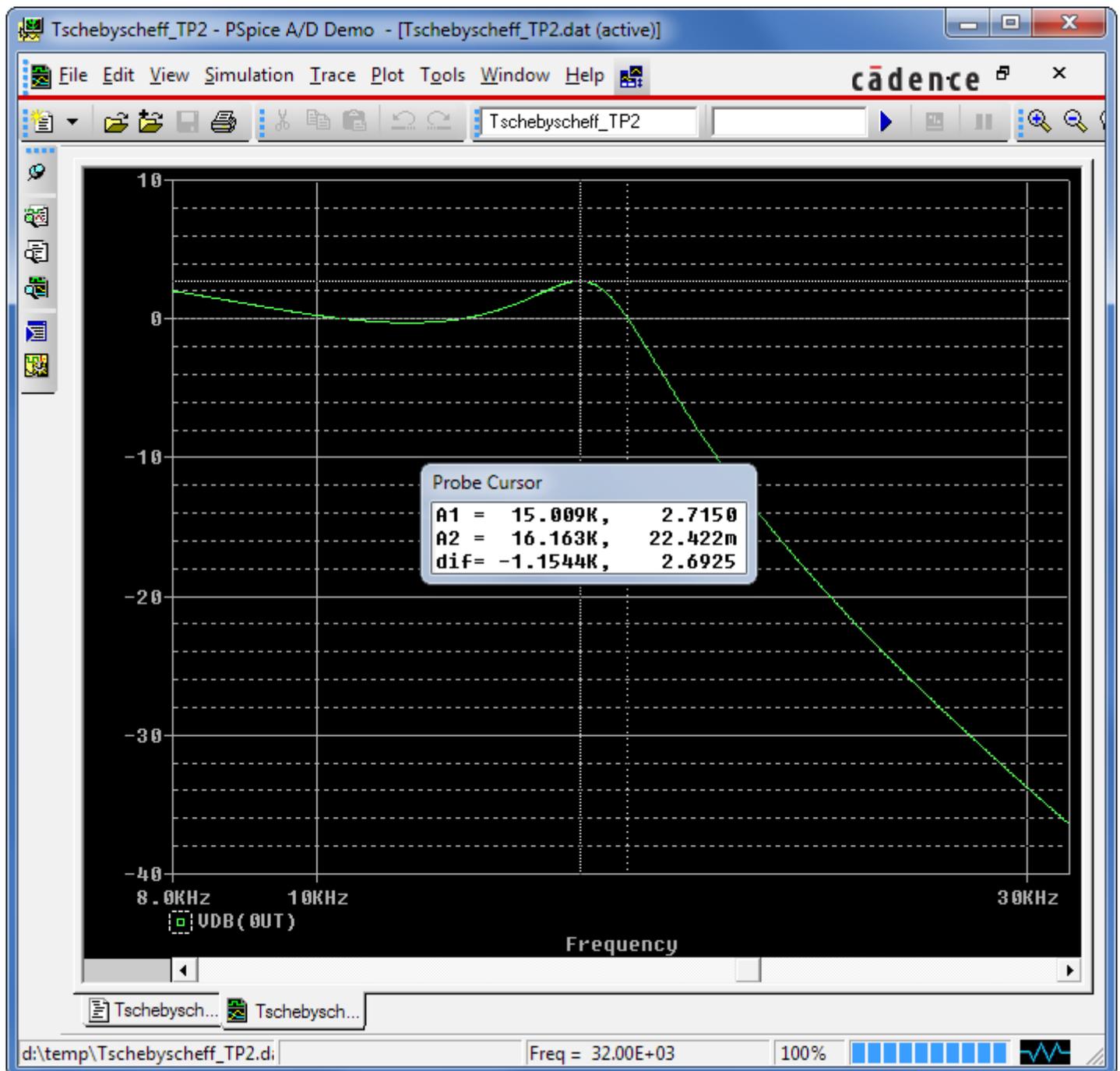


Wenn Sie die Spice-Schnittstelle korrekt konfiguriert haben (siehe 7.3), sehen Sie jetzt PSpice:



Klicken Sie jetzt auf den kleinen blauen Pfeil, der sich am oberen Fensterrand rechts neben dem Dateinamen befindet, um die Simulation zu starten. Statt auf den Pfeil zu klicken können Sie auch im Spice-Menü den Menüpunkt **SIMULATION, RUN** wählen.

Die Simulation läuft sehr schnell ab. Schon nach kurzer Zeit öffnet sich das Probe-Fenster von Spice und präsentiert das Ergebnis (siehe folgendes Bild). Im Probe-Fenster können Sie jetzt den Cursor einschalten und das Ergebnis genau inspizieren:



In unserem Beispiel sehen Sie, dass die Grenzfrequenz bei 16,163 kHz (Cursor A2) liegt und die maximale Welligkeit 2,715 dB (Cursor A1) beträgt. Damit kommt dieses Filter der Spezifikation ($f_g = 16$ kHz, Welligkeit = 3 dB) sehr nahe – und das trotz der verwendeten E12-Normreihe für die Widerstandswerte.

Das hervorragende Ergebnis von **AktivFilter 3.3** wird also durch PSpice bestätigt und Sie können jetzt Ihren Lötcolben einschalten, um den Prototyp zu bauen.

7.5 Gruppenlaufzeit mit Spice simulieren

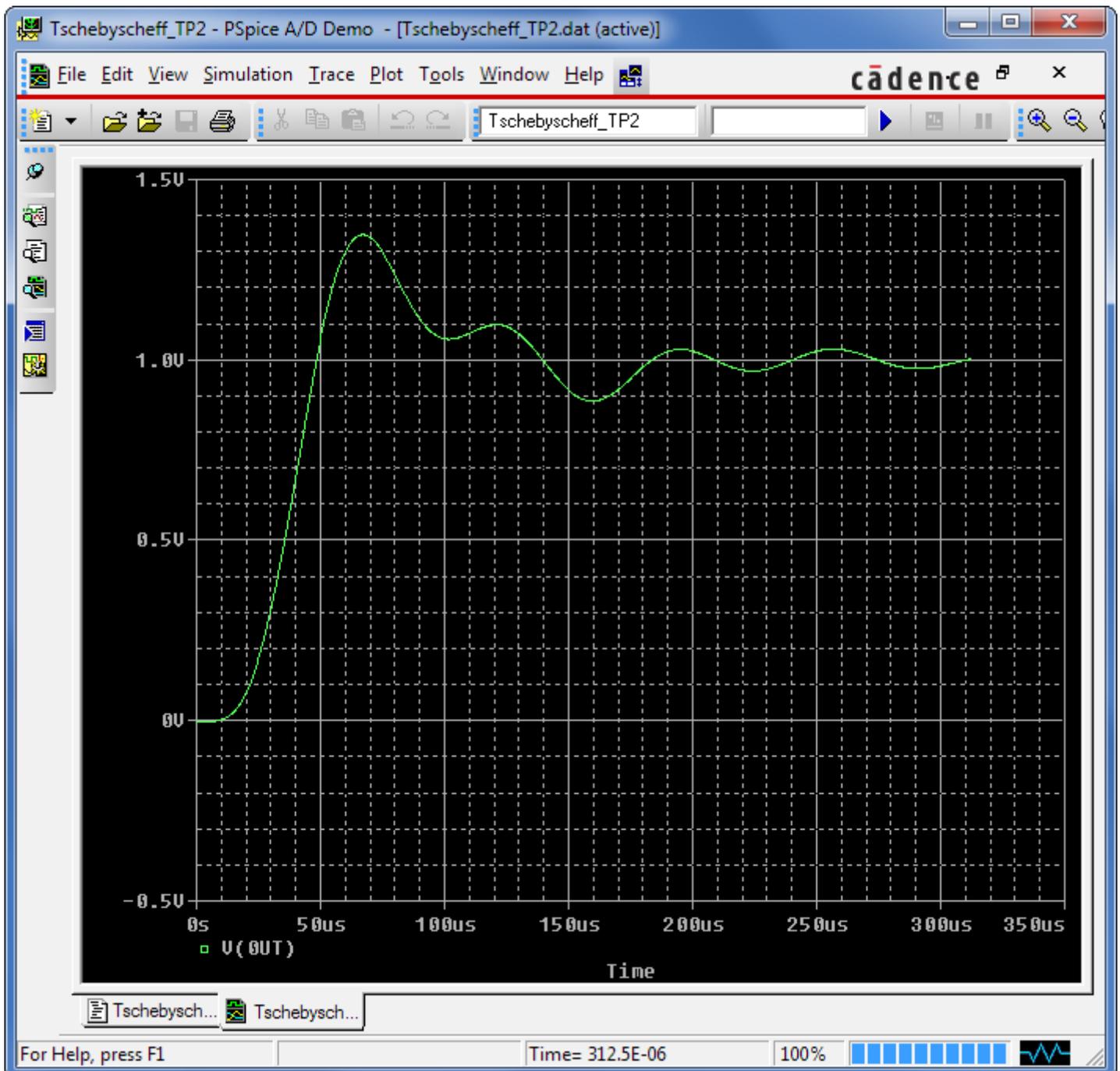
Beenden Sie jetzt PSpice. In **AktivFilter 3.3**, das Sie weiterhin geöffnet haben, wählen Sie jetzt **SPICE, GRUPPENLAUFZEIT**. Sie sehen dann wieder die oben gezeigte Netzliste in Spice. Klicken Sie jetzt wieder auf den blauen Pfeil, um die Simulation zu starten. Wieder erhalten Sie sehr schnell das Ergebnis im Probe-Fenster von Spice:



Wie Sie sehen, stimmt auch hier die Ausgabe von PSpice mit der grafischen Vorschau in **AktivFilter 3.3** überein. Sie erkennen hier übrigens eine typische Eigenschaft des Tschebyscheff-Tiefpasses: Die großen Schwankungen der Gruppenlaufzeit.

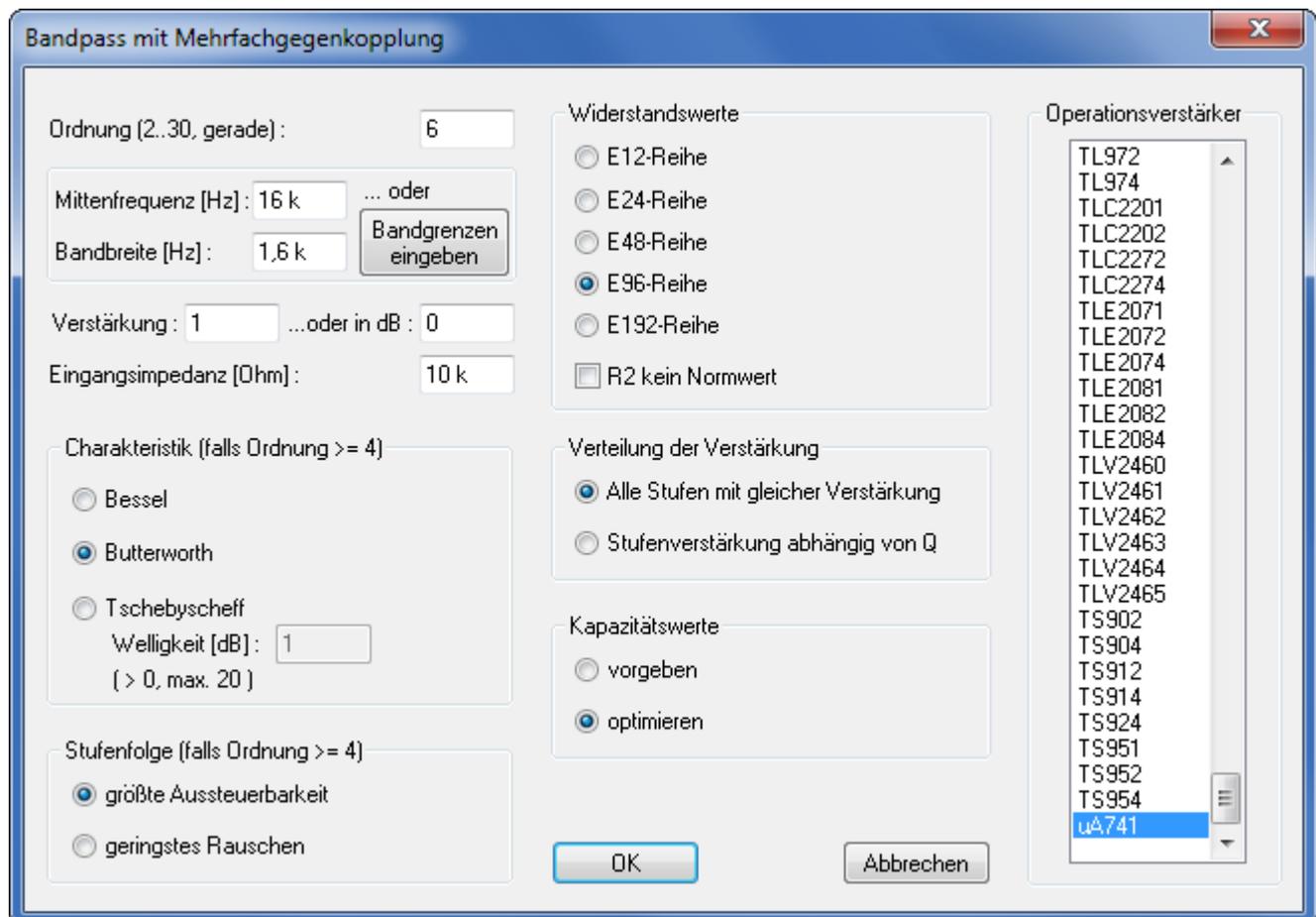
7.6 Sprungantwort mit Spice simulieren

Beenden Sie jetzt wieder PSpice. In **AktivFilter 3.3**, das Sie weiterhin geöffnet haben, wählen Sie jetzt **SPICE, SPRUNGANTWORT**, um die Sprungantwort des Filters mit Spice zu simulieren. Sie sehen dann wieder die oben gezeigte Netzliste in Spice. Klicken Sie jetzt wieder auf den blauen Pfeil, um die Simulation zu starten. Wieder erhalten Sie sehr schnell das Ergebnis im Probe-Fenster von Spice:



8 Bandpassfilter

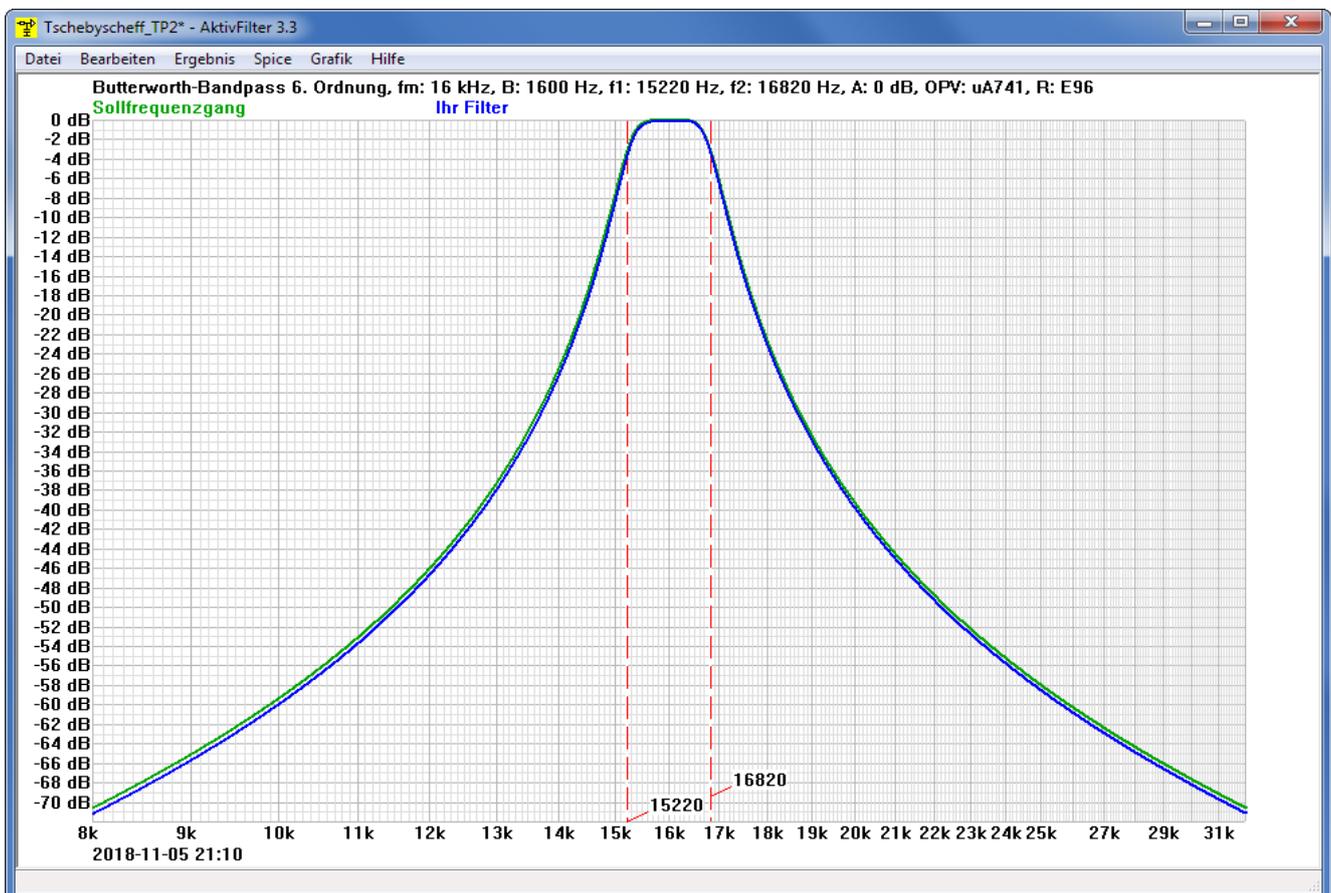
Mit Hilfe von **AktivFilter 3.3** können Sie Bandpassfilter mit Mehrfachgegenkopplung entwickeln. Das folgende Bild zeigt den Eingabedialog zur Spezifizierung eines Bandpassfilters; beachten Sie, dass **AktivFilter 3.3** in der Lage ist, Bandpässe der Ordnung 2 bis 30 zu entwerfen:



Sie können anstelle von Mittelfrequenz und Bandbreite auch die untere und obere Grenzfrequenz des Filters eingeben. Klicken Sie hierzu auf den Button „Bandgrenzen eingeben“ und es öffnet sich ein entsprechender Dialog:

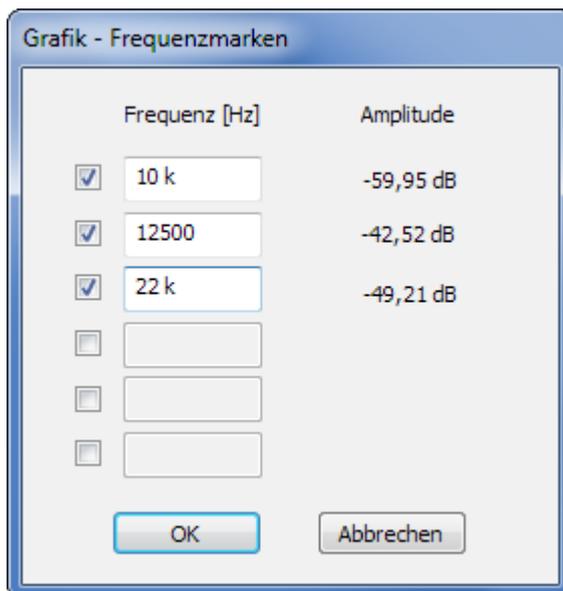


Hier sehen Sie den Frequenzgang des zu berechnenden Bandpasses:



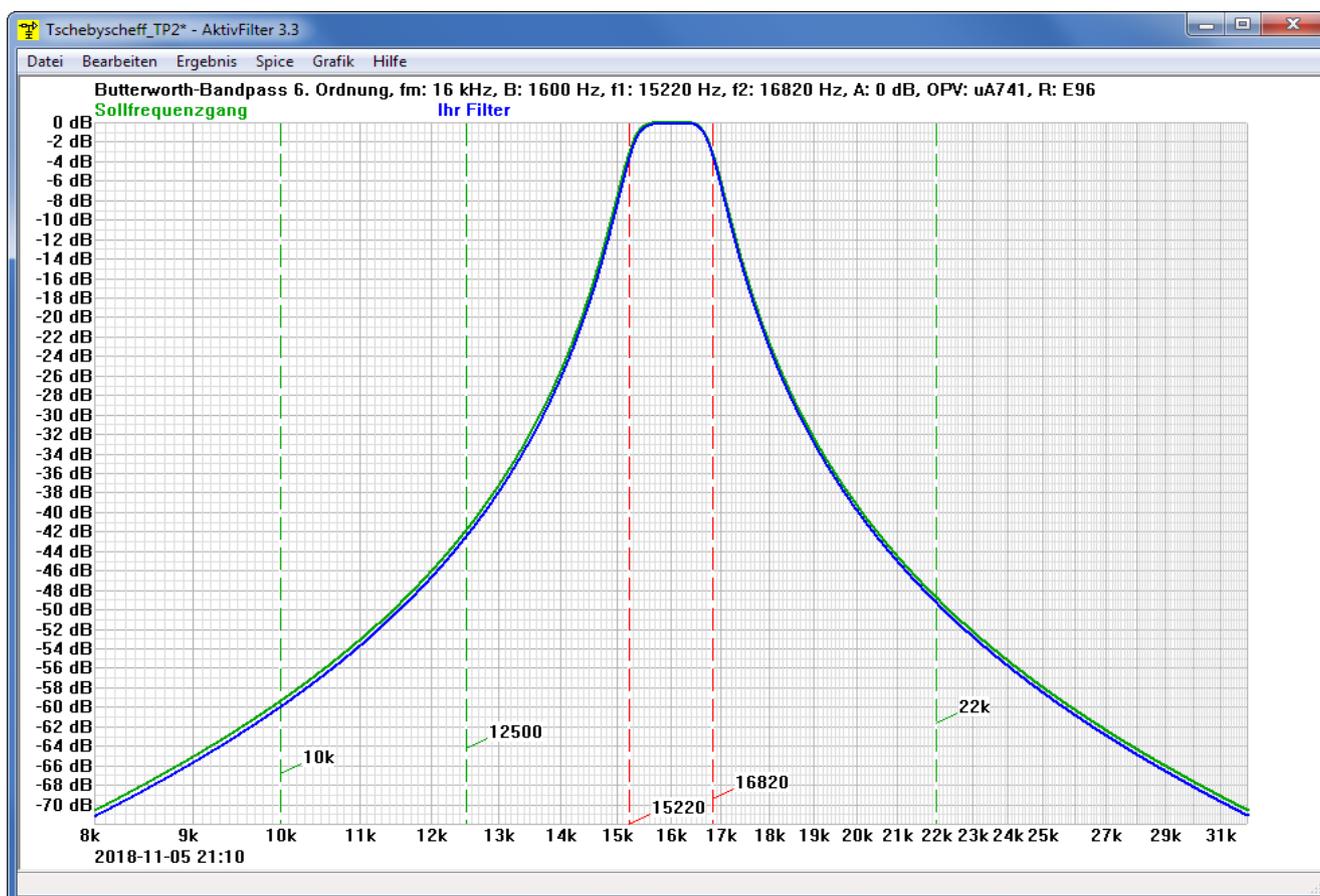
Die roten gestrichelten Linien markieren in der Grafik stets die Bandgrenzen.

Falls in der Grafik weitere Frequenzen markiert werden sollen, können Sie diese vorgeben, indem Sie **GRAFIK, FREQUENZMARKEN** auswählen. Im folgenden Dialog können Sie bis zu sechs Frequenzen angeben, die in der Grafik markiert werden sollen:



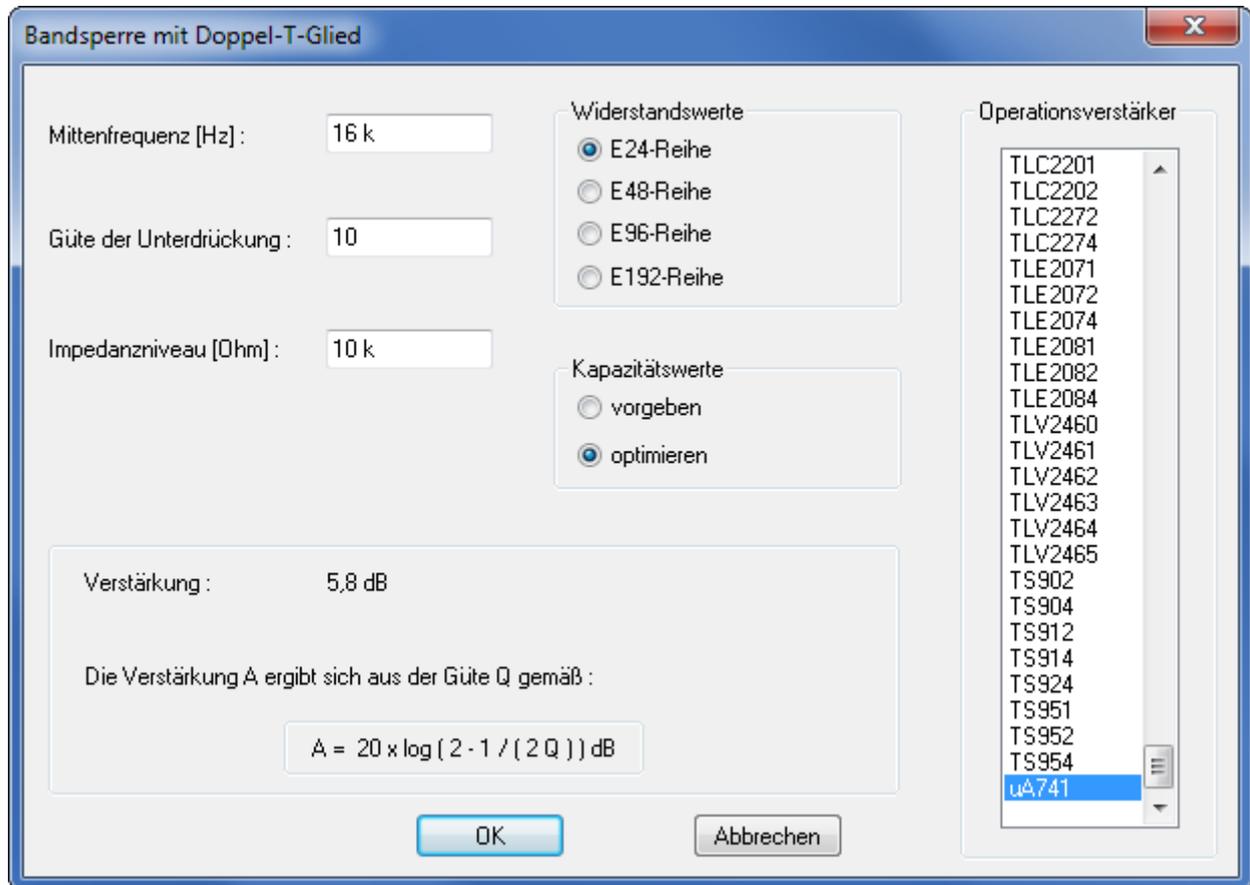
Wie Sie sehen, werden in diesem Dialog auch die Amplitudenwerte Ihres Filters bei den Frequenzmarken ausgegeben.

Nach Eingabe der o.a. Frequenzmarken werden diese in der Grafik als gestrichelte grüne Linien dargestellt:



9 Bandsperrfilter

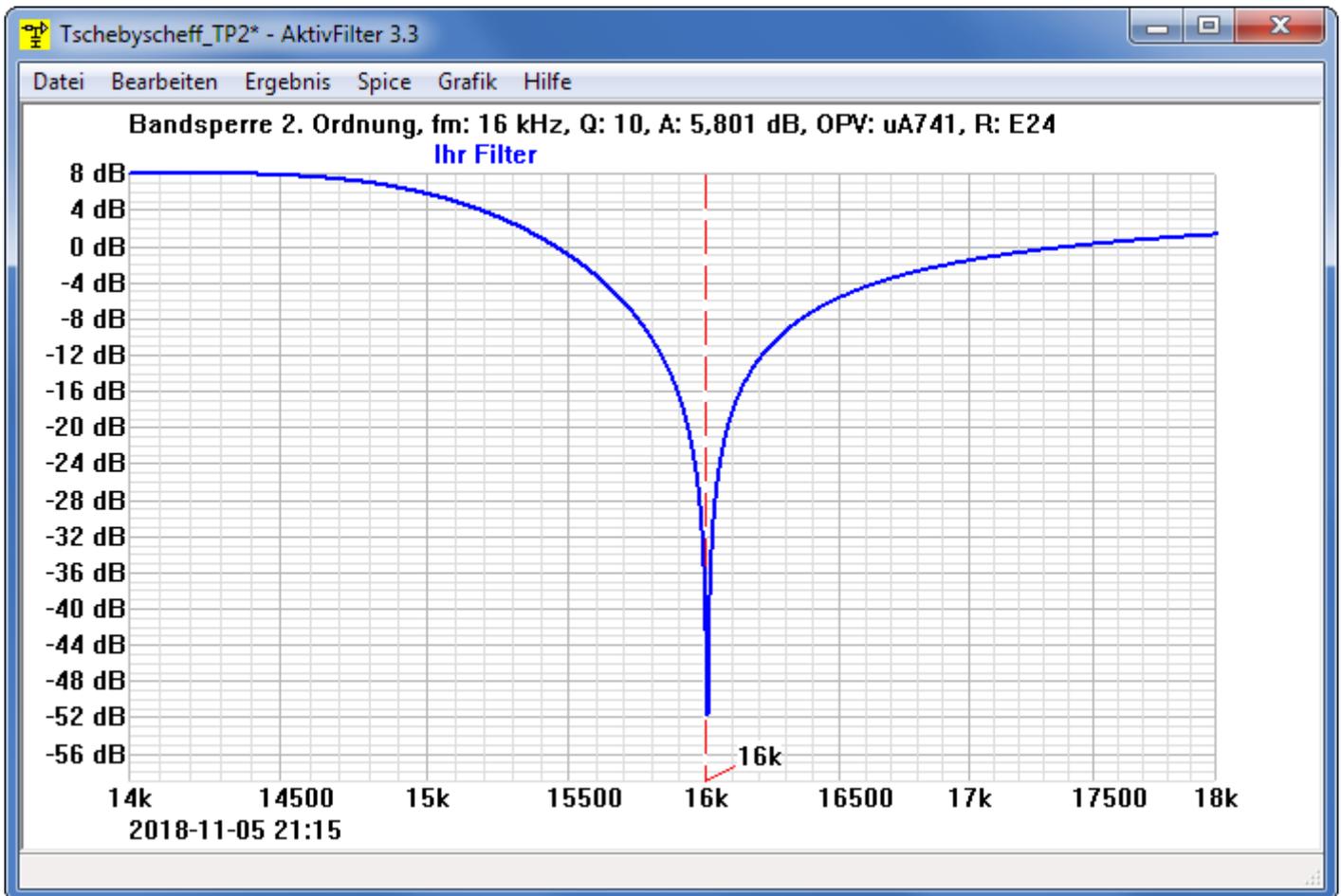
Mit Hilfe von **AktivFilter 3.3** können Sie aktive Doppel-T-Bandsperrfilter entwickeln. Das folgende Bild zeigt den Eingabedialog zur Spezifizierung eines solchen Bandsperrfilters:



Die Widerstandswerte für Bandsperrfilter können aus den Normreihen E24, E48, E96 oder E192 dimensioniert werden.

Die Normreihe E12 ist für Bandsperrfilter nicht vorgesehen, da die Werte der E12-Normreihe sehr grob gestaffelt sind – daher wäre es mit der E12-Normreihe weitgehend „Glückssache“, ob die spezifizierte Mittelfrequenz getroffen wird.

Hier die Grafik mit dem Frequenzgang für das nach obigen Vorgaben berechnete Filter:



Wie Sie sehen, wird die vorgegebene Sperrfrequenz (16 kHz) von dem entworfenen Filter erstaunlich gut getroffen. Das „Geheimnis“ dieses außergewöhnlichen Resultats liegt in einer neuen Abstimmtechnik, die in **AktivFilter 3.3** implementiert ist. Dabei werden Widerstandswerte ggf. durch Reihen- oder Parallelschaltung von zwei Normwerten realisiert.

Zur Erläuterung hier die Dimensionierung und das Schaltbild des Filters (Sie können in **AktivFilter 3.3** beide Fenster öffnen, so dass sie zugleich auf dem Bildschirm erscheinen):

The screenshot displays three overlapping windows from the 'AktivFilter 3.3' software. The top window, titled 'Schaltbild einer Stufe Ihres Filters', shows a circuit diagram of a second-order active filter. The circuit includes an input terminal, two resistors labeled R1, two capacitors labeled C1, and three resistors labeled R2, R3, and R4. The filter is implemented using an operational amplifier (op-amp) configured as a voltage follower. The non-inverting input (+) is connected to a network of R1, C1, and R2. The inverting input (-) is connected to a network of R3, R4, and C2. The output of the op-amp is labeled 'Output'. The middle window, titled 'Ergebnis - Dimensionierung', provides the calculated component values for the filter. The bottom window shows a frequency response plot with a vertical axis for gain in dB (ranging from -56 dB to 8 dB) and a horizontal axis for frequency in kHz (ranging from 14k to 18k).

Schaltbild einer Stufe Ihres Filters

Ergebnis - Dimensionierung

Struktur: Doppel-T
 Bandsperre 2. Ordnung, fm: 16 kHz, Q: 10, A: 5,801 dB, OPV: uA741, R: E24

Realisierung von R1 durch Parallelschaltung von 10 k und 1,8 M
 Realisierung von R2 durch Parallelschaltung von 200 k und 5,1 k
 Realisierung von C2 durch Parallelschaltung von 2 x 1 n

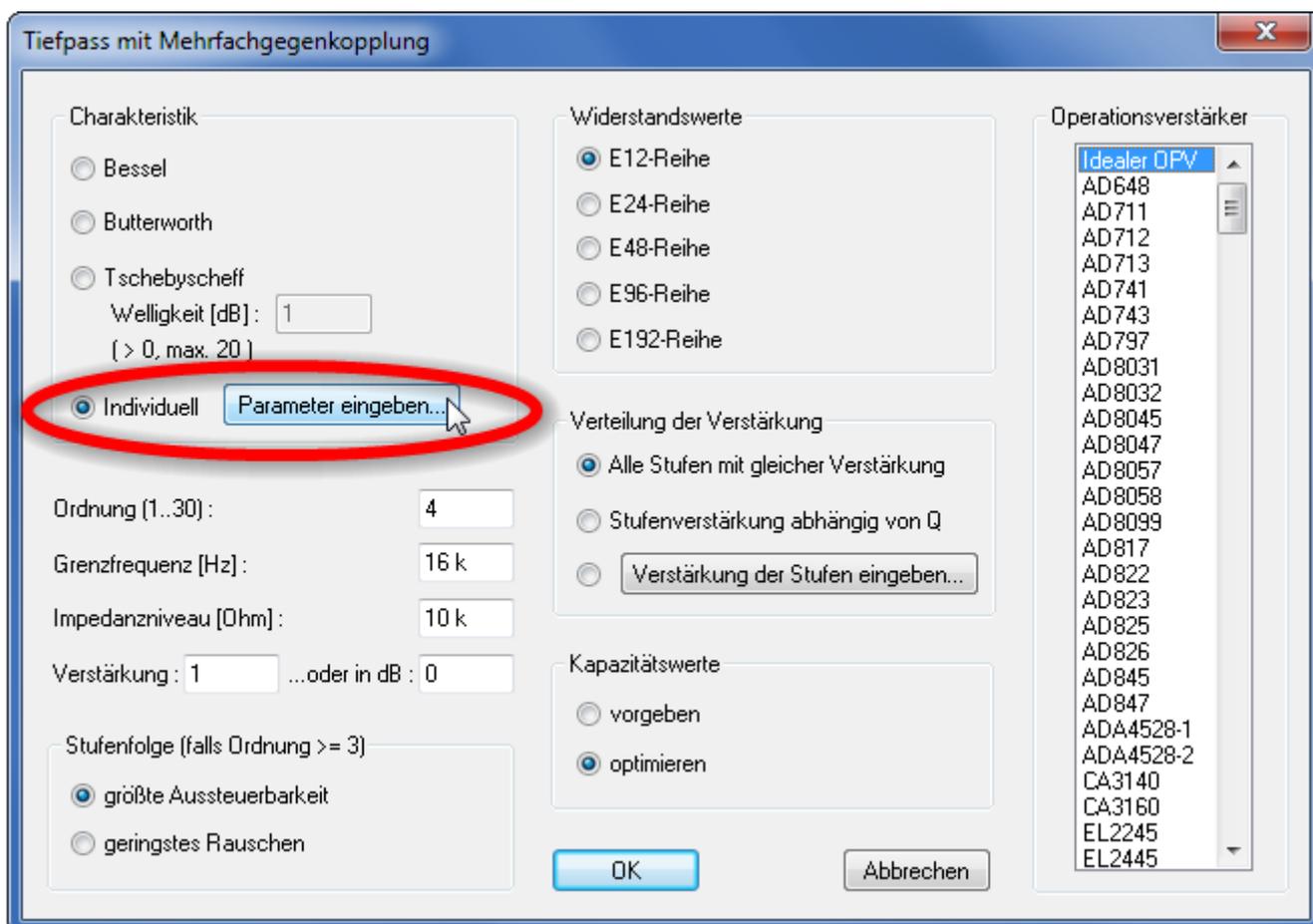
Stufe	R1	R2	R3	R4	C1	C2
1	9945	4973	15 k	16 k	1 n	2 n

Die gleichzeitige Darstellung mehrerer Fenster ist in **AktivFilter 3.3** für die unter dem Menüpunkt **ERGEBNIS** aufrufbaren Ausgaben **DIMENSIONIERUNG**, **SCHALTBILD** und **FILTERPARAMETER** möglich.

Wie Sie im obigen Beispiel sehen, wird $R1 = 9945 \text{ Ohm}$ durch eine Parallelschaltung der Normwerte 10 k und 1,8 M realisiert, sowie $R2 = 4973 \text{ Ohm}$ durch eine Parallelschaltung der Normwerte 200 k und 5,1 k realisiert. Auf diese Weise kann man mit Normwerten ein Sperrfilter bauen, das die Sperrfrequenz so gut wie praktisch möglich unterdrückt.

10 Filter mit individueller Charakteristik

AktivFilter 3.3 bietet Ihnen die Möglichkeit Hoch- und Tiefpassfilter zu entwerfen, die alternativ zu den üblichen Filter-Charakteristiken Bessel, Butterworth und Tschebyscheff eine individuelle Charakteristik aufweisen. Diese individuelle Charakteristik spezifizieren Sie, indem Sie für jede Stufe des Filters die Polfrequenz und Polgüte vorgeben. Den Dialog, in dem Sie diese Parameter eingeben können, bekommen Sie angezeigt, wenn Sie im Dialog **DATEI, NEUES FILTER** den Knopf **PARAMETER EINGEBEN** anklicken:



Bei der Eingabe der Parameter müssen Sie beachten, dass für ein Filter, das aus n Stufen besteht, nur die Einträge für die Stufen 1 bis n von Bedeutung sind. Normierte Polfrequenz und Polgüte Q müssen für jede der Stufen größer als 0 sein.

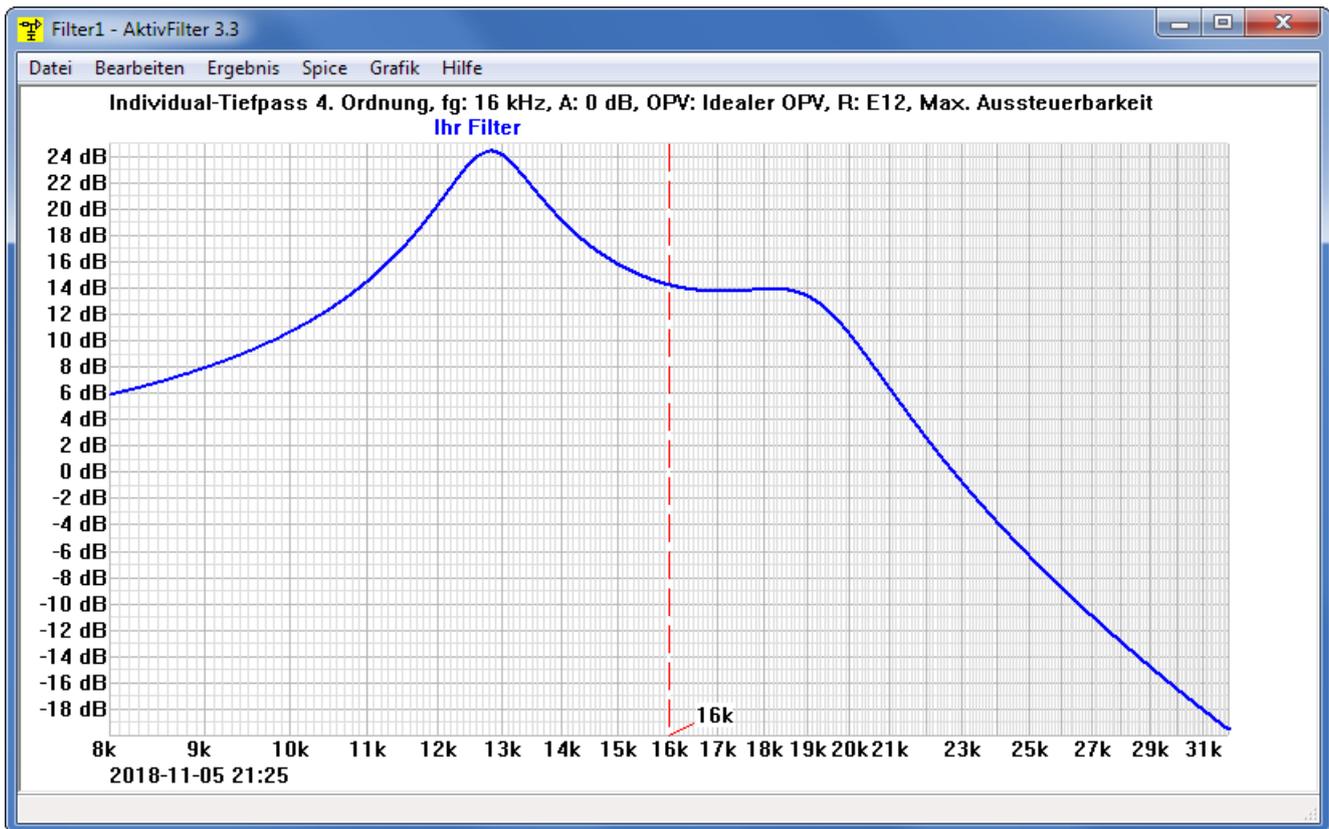
Hier ein Beispiel für ein Tiefpassfilter 4. Ordnung: Die beiden Stufen sollen die Polfrequenzen 0,8 fg und 1,2 fg haben und die Polgüten 10 und 5,5 aufweisen:

Parameter der individuellen Charakteristik eingeben

	Normierte Polfrequenz : (Polfrequenz der Stufe, dividiert durch die Nennfrequenz des Gesamtfilters)	Polgüte Q :
Stufe 1 :	0,8	10
Stufe 2 :	1,2	5,5
Stufe 3 :	1,00000000	1,00000000
Stufe 4 :	1,00000000	1,00000000
Stufe 5 :	1,00000000	1,00000000
Stufe 6 :	1,00000000	1,00000000
Stufe 7 :	1,00000000	1,00000000
Stufe 8 :	1,00000000	1,00000000
Stufe 9 :	1,00000000	1,00000000
Stufe 10 :	1,00000000	1,00000000
Stufe 11 :	1,00000000	1,00000000
Stufe 12 :	1,00000000	1,00000000
Stufe 13 :	1,00000000	1,00000000
Stufe 14 :	1,00000000	1,00000000
Stufe 15 :	1,00000000	1,00000000

OK Abbrechen

Im Dialog **DATEI, NEUES FILTER** wurde als Grenzfrequenz 16 kHz, als OPV-Typ der uA741 und als Widerstandsreihe E12 gewählt. Das folgende Bild zeigt das Ergebnis:



Selbstverständlich können Sie auch dieses Design, wie im Kapitel Spice-Aufrufschnittstelle beschrieben, schnell und einfach mit Spice simulieren, um das Ergebnis zu überprüfen.