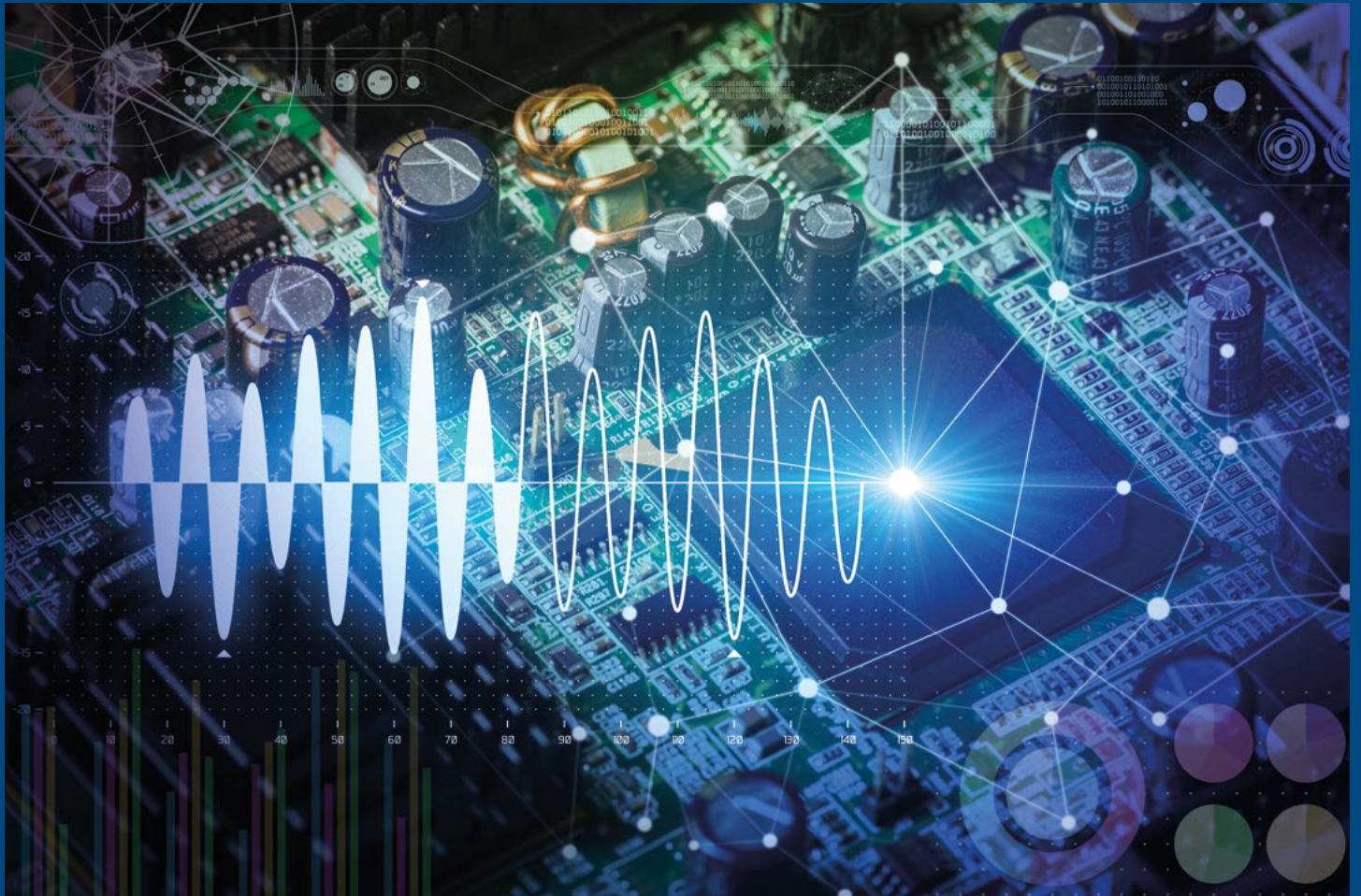


# Grundlagen des analogen Designs

Mark Patrick, Mouser Electronics



## Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>2</b>
<b>Die Bedeutung analoger technischer Fähigkeiten für die Elektronikbranche</b>	<b>3</b>
<b>Grundlagen zur Signalkette</b>	<b>5</b>
<b>Analoge Design-Tools und Ressourcen</b>	<b>8</b>
<b>Analoges Design einfach gemacht</b>	<b>11</b>
<b>Fazit</b>	<b>16</b>

---

## Vorwort

Analoges Design ist eine Disziplin, die für viele Ingenieure relevant ist, aber nicht unbedingt von allen verstanden wird. Angesichts der immer kleiner werdenden Zahl von Analog-Experten neigen einige Ingenieure dazu, das analoge Design als etwas zu betrachten, das sich grundlegend vom Rest des Bereichs der Elektronik unterscheidet, mit eigenen Regeln und eigenem Jargon.

In diesem E-Book möchten wir dazu beitragen, diese Sichtweise zu ändern und das analoge Design zu entmystifizieren, indem wir ein Verständnis für die analogen Prinzipien vermitteln.

Wir werden uns zunächst mit dem grundlegenden Aufbau analoger Schaltkreisdesigns und den Tools befassen, die Ingenieuren zur Verfügung stehen, damit sie ihre Designs selbstbewusst erstellen können. Wir werden aufzeigen, dass sich das Design analoger Schaltkreise weiterentwickelt hat und sich heutzutage durch eine sehr strukturierte Methodologie auszeichnet. Wir werden einige der fortschrittlichen Hardware- und Software-Tools genauer unter die Lupe nehmen, die dazu beitragen, dass viele komplexe manuelle Berechnungen nicht mehr erforderlich sind. Und wir hoffen, dass wir unser Ziel erreichen, mehr junge Ingenieure zu ermutigen, das Design analoger Schaltkreise als eine geschätzte und lohnenswerte Fähigkeit zu betrachten, die ihre Karriere Möglichkeiten weiter verbessern wird.

---

# Die Bedeutung analoger technischer Fähigkeiten für die Elektronikbranche

Wir hören Begriffe wie „digitale Wirtschaft“ und „digitale Transformation“ so oft, dass sie fast schon zu Klischees geworden sind. Der Fokus der Industrie auf digitale Technologie führt dazu, dass manch einer vergisst, dass die reale Welt nicht digital, sondern analog ist. Der Irrglaube, dass „analoge“ Technologie veraltet und nicht mehr relevant sei, hat schwerwiegende Auswirkungen auf die Elektronikindustrie und führt dazu, dass sich viele Ingenieure im Studium und in der Forschung ausschließlich mit digitaler Elektronik befassen.

Dies sorgt für einen Mangel an Verständnis und praktischer Erfahrung im Bereich des analogen Designs und der Anwendungsfähigkeiten unter Elektronikingenieuren. Dies wird noch dadurch verschlimmert, dass viele junge Ingenieure denken, das Design analoger Schaltkreise sei schlecht definiert, erfordere die regelmäßige Anwendung schwieriger mathematischer Berechnungen und verfüge nicht über die ausgefeilten Software-Tools, die digitalen Ingenieuren zur Verfügung stehen. Wenn wir diesen Trend nicht schnell umkehren, wird die Elektronikindustrie bald an einem Punkt angelangt sein, an dem es nicht mehr ausreichend Ingenieure mit analoger Erfahrung gibt, um Innovationen im Einklang mit den Erwartungen der Verbraucher zu liefern.

Mit diesem E-Book möchten wir das Gleichgewicht zwischen Wissen und Verständnis für analoges Design wiederherstellen.

## Was bedeuten „analog“ und „digital“?

„Analog“ bezieht sich auf Signale oder Informationen, die durch eine kontinuierlich variable physikalische Größe dargestellt werden. Beispiele für analoge Größen sind Spannung, Licht, Wärme, Druck und Schall. Im Gegensatz dazu kann die digitale Darstellung einer Größe immer nur einer von einer vorgegebenen Anzahl von voreingestellten (oder diskreten) Werten sein. Der Unterschied zwischen „analog“ und „digital“ lässt sich anhand der folgenden einfachen Beispiele veranschaulichen:

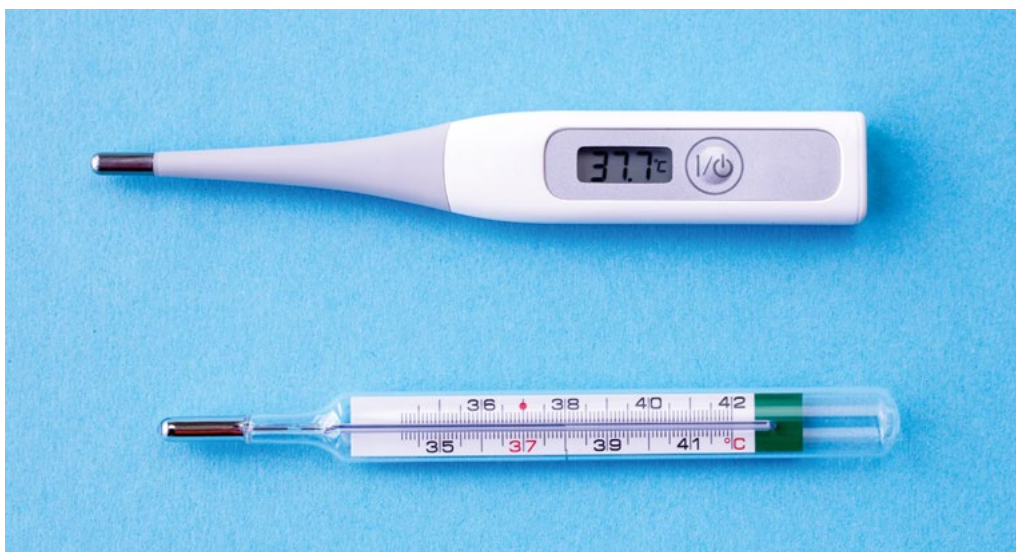
- Das Licht in einem Raum ganz ein- oder ausschalten (digital) im Gegensatz zur Verwendung eines variablen Dimmschalters, um die Beleuchtung auf ein gewünschtes Beleuchtungsniveau einzustellen (analog).
- Die Verwendung eines Thermostats, der die Heizung vollständig ein- und ausschaltet, wenn die Temperatur in einem Raum einen voreingestellten Wert über- oder unterschreitet (digital), im Gegensatz zu einem Thermostat, das den Betrieb der Heizung kontinuierlich anpasst, um die Raumtemperatur auf einer voreingestellten Temperatur zu halten (analog).
- Ein Audiosystem mit voreingestellter Lautstärkeregelung (digital) im Vergleich zu einem System mit Drehregler, mit dem die Lautstärke beliebig eingestellt werden kann (analog).

Der Grund für die Umwandlung analoger Größen in eine digitale Form ist, dass sie dann schnell von digitalen Schaltkreisen verarbeitet werden können. Das bedeutet jedoch nicht, dass digitale Signale immer die präzisesten sind. Um das Beispiel eines Thermometers zu verwenden: Im Gegensatz zu seinem analogen Gegenstück misst ein digitales Thermometer die Temperatur nur in regelmäßigen Abständen – ein Prozess, der als Abtasten bezeichnet wird. Des Weiteren kann es diese Messung nur mit einem seiner voreingestellten Werte anzeigen – ein Prozess, der Quantisierung genannt wird.

Damit die Anzeige eines digitalen Thermometers (**Abbildung 1**) als Reaktion auf eine Temperaturänderung aktualisiert werden kann, muss es erstens seine Messung durchführen (was geschehen kann, nachdem die Temperaturänderung bereits stattgefunden hat), und zweitens muss die gemessene Änderung größer sein als der



kleinste voreingestellte Wert, den es erkennen kann. Zugegeben, die modernsten digitalen Messgeräte sind heute so konzipiert, dass sie viele Hochgeschwindigkeitsmessungen durchführen und sehr kleine Veränderungen erkennen können (weil sie viele diskrete Werte haben). Und obwohl sie in Bezug auf reine Messungen nie ganz so genau sein können wie ihre analogen Gegenstücke, ist ihre Leistung in der Regel ausreichend für die entsprechende Applikation.



**Abbildung 1** Ein analoges und ein digitales Thermometer

## Sensoren und Signalkette

Ein Sensor (oder Wandler) wird verwendet, um eine Form von Energie zu erkennen und in eine andere umzuwandeln, z. B. Temperatur, Licht oder Schall zu erfassen und in elektrische Energie umzuwandeln, üblicherweise in Form eines analogen Spannungssignals. Zu den Sensoren, die üblicherweise zur Erkennung der Temperatur verwendet werden, gehören Thermoelemente und Temperaturwiderstandsdetektoren (RTD), während Fotodioden zur Erkennung von Licht und Mikrofone zur Erkennung von Schall verwendet werden.

Letztlich arbeiten die meisten Sensoren nach analogen Prinzipien und die elektrischen Ausgangssignale, die sie erzeugen, sind üblicherweise sehr schwach (Millivolt oder weniger). Das heißt, dass ihr Signal aufbereitet werden muss, um Rauschen zu entfernen und die Amplitude oder den Pegel zu erhöhen, bevor es in die digitale Form umgewandelt wird, die das nachgeschaltete Steuersystem benötigt. Der Sensor und die Schaltkreise, die für diese Aufbereitung verwendet werden, bezeichnet man als analoge Signalkette (Verstärker, Filter und Datenwandler).

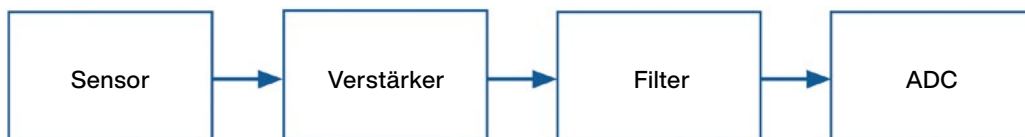
# Grundlagen zur Signalkette

Im Folgenden sehen wir uns die Funktion der analogen Signalkette und die technischen Daten der wichtigsten Bauelemente an.

Viele Elektronikgeräte, die wir täglich benutzen und auf die wir angewiesen sind, würden ohne die Verwendung von echten Eingangssignalen, die von Elektronikingenieuren konzipiert wurden, schlichtweg nicht funktionieren.

## Was ist die analoge Signalkette?

Die analoge Signalkette (**Abbildung 2**) besteht aus vier Hauptelementen: Sensor, Verstärker, Filter und Datenwandler (ADC). Sie werden eingesetzt, um analoge Signale zu erkennen, aufzubereiten und in ein digitales Format umzuwandeln, das von einem Mikrocontroller oder einem anderen digitalen Steuersystem verarbeitet werden kann.



**Abbildung 2** Blockdiagramm der analogen Signalkette

## Sensoren

Der erste Teil der analogen Signalkette ist der Sensor (oft als Wandler bezeichnet), der das Eingangssignal erfasst und in elektrische Energie umwandelt, normalerweise in Form einer analogen Spannung oder eines Stroms. Sensoren arbeiten nach einer Vielzahl von physikalischen Prinzipien, unter anderem zum Beispiel:

- Temperatur – Thermoelemente und Temperaturwiderstandsdetektoren (RTD)
- Druck – Dehnungsmessstreifen oder kapazitive Membranen
- Herzfrequenz – EKG-Elektroden
- Licht – Fotowiderstände
- Schall – Mikrofone

Bei Sensoren mit einem Spannungsausgang liegt der Bereich üblicherweise zwischen einigen Mikrovolt ( $\mu\text{V}$ ) und mehreren Millivolt ( $\text{mV}$ ), was das Signal sehr anfällig für Störungen durch unerwünschtes elektrisches Rauschen macht. Das Rauschen kann aus vielen Richtungen kommen, wird aber im Allgemeinen als elektromagnetische Störung (EMI) oder Hochfrequenzstörung (RFI) eingestuft. Um dieses Problem zu vermeiden, wird der Sensorausgang in der Regel als Differenz zwischen zwei Anschlüssen (Differenzial) gemessen, sodass Rauschsignale, die an beiden Anschlüssen anliegen, unterdrückt werden.

## Verstärker

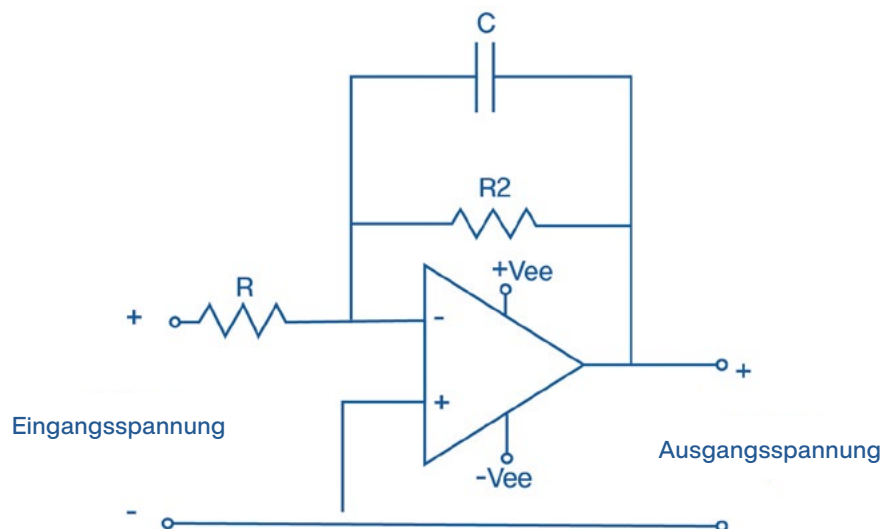
Das zweite Bauelement in der Signalkette ist der (Differenz-)Verstärker, ein elektronischer Schaltkreis, der die Größe des Sensorausgangs um einen Skalierungsfaktor, A, entsprechend der folgenden Formel erhöht, wobei A als Verstärkung bezeichnet wird.

$$V_{\text{Ausgang}} = A * V_{\text{Eingang}}$$

Der Verstärker wird benötigt, da das Sensorsignal in der Regel zu klein ist, um vom Analog-Digital-Wandler (ADC) am Ende der Kette in ein digitales Format umgewandelt zu werden. Der Verstärker hebt die Signalamplitude auf einen Pegel an, den der ADC effektiv lesen kann. Die maximale Ausgangsspannung, die von einem Verstärker erzeugt werden kann, liegt sehr nahe am Spannungspegel seines Netzteils.

Eine weitere technische Erwägung, die sich auf das Design und die Auswahl der Bauelemente auswirkt, ist das Signal-Rausch-Verhältnis (SRV). Das SRV wird in Dezibel gemessen und ist das Verhältnis der Signalstärke zum unerwünschten Rauschen. Ein hoher SRV-Dezibel-Wert weist auf ein leistungsstarkes Signal hin, das widerstandsfähiger gegen die Auswirkungen von Rauschen ist.

Bei vielen Applikationen wird ein programmierbarer Verstärker mit Verstärkung (PGA) in Verbindung mit einem automatischen Verstärkungsregelkreis (AGC) verwendet, der die Verstärkung des Verstärkers dynamisch erhöht oder verringert, wenn die Größe des Sensorsignals (aufgrund von Umweltbedingungen oder anderen Gründen) außerhalb des erwarteten Bereichs liegt. Wenn das Sensorsignal zu hoch wird, könnte der Verstärker gesättigt sein, sodass er versucht, ein höheres Ausgangssignal zu erzeugen, als physikalisch möglich ist.



**Abbildung 3** Tiefpass-Filterschaltkreis unter Verwendung eines Operationsverstärkers

## Filter

Nach der Verstärkung muss das Sensorsignal dann einen analogen Filterschaltkreis durchlaufen, um alle unerwünschten Frequenzkomponenten zu entfernen. Die drei Hauptkategorien analoger Filterschaltkreise sind:

- Tiefpassfilter (beseitigt hochfrequente Signale)
- Hochpassfilter (entfernt niederfrequente Signale)
- Bandpassfilter (lässt nur Signale innerhalb eines bestimmten Bereichs durch)

Filterschaltkreise werden mit einer Kombination aus Kondensatoren, Widerständen und einem Operationsverstärker aufgebaut (Abbildung 3).

#### Zu den wichtigsten technischen Leistungsdaten des Filters gehören:

- **Filterbandbreite**, die den Bereich der Frequenzen beschreibt, die ein Schaltkreis ohne Verringerung der Amplitude (Dämpfung) durchlässt, wobei die 3-dB-Eckfrequenz(en) die Leistung ist, bei der das Ausgangssignal auf die Hälfte der Leistung des Eingangssignals fällt.
- **„Roll-Off“**, der die Dämpfungsrate beschreibt, d. h. die Geschwindigkeit, mit der der Filter unerwünschte Frequenzkomponenten am Eingang unterscheidet und die in Dezibel/Dekade gemessen wird. Filter mit schnellerem Roll-Off benötigen mehr Bauelemente, was die Komplexität und die Kosten erhöht.
- **„Phase“**, die sich auf die relative Verzögerung zwischen den Ein- und Ausgangssignalen bezieht, ist wichtig, wenn eine Rückkopplungsschleife in der Signalkette verwendet wird, da sie die Stabilität der Schleife beeinflussen kann.

## Analog-Digital-Wandler (ADCs)

Das letzte zwischen den analogen und digitalen Signalen angeordnete Bauelement ist der Analog-Digital-Wandler (ADC). Damit ein ADC eine genaue digitale Darstellung des analogen Signals erzeugen kann, muss er mit der doppelten höchsten Frequenzkomponente des Signals (der sogenannten Nyquist-Frequenz) abtasten. Dies geschieht mithilfe eines „Sample-and-Hold“-Schaltkreises, der regelmäßig die analoge Eingangsspannung misst und sie so lange auf einem konstanten Pegel hält, bis der ADC die Umwandlung vorgenommen hat, bevor er zur nächsten Abtastung übergeht.

Der nächste Schritt im Umwandlungsprozess ist die „Quantisierung“, bei der die abgetastete Spannung mit einer festen Anzahl diskreter Werte verglichen wird, die jeweils durch einen eindeutigen digitalen Code dargestellt werden. Ein Vier-Bit-ADC verfügt beispielsweise über sechzehn (2<sup>4</sup>) diskrete Pegel, die einen Abtastwert darstellen. ADCs mit mehr Bits erzielen eine bessere Auflösung (Genauigkeit), da sie mehr diskrete Werte verwenden, wobei sich die Auflösung mit jedem zusätzlichen Bit verdoppelt. Die gängigsten ADC-Architekturen sind:

- Register für sukzessive Annäherung (SAR)
- Sigma-Delta
- Flash
- Leitung

## Fazit

Bei der analogen Signalkette handelt es sich um eine Reihe von Schaltkreisen, die zur genauen Erkennung, Aufbereitung und Umwandlung analoger Signale in eine digitale Form erforderlich sind. Mit einem fundierten Verständnis der Grundlagen der Signalkette können Ingenieure Produkte entwickeln, die eine zuverlässige und effektive Leistung sicherstellen. Die Elektronikindustrie ist auf Ingenieure angewiesen, die über das nötige Wissen und die erforderliche Erfahrung mit analogen Schaltkreisen verfügen, um Produkte zu entwickeln, die eine zuverlässige und effektive Leistung erbringen.

## Analoge Design-Tools und Ressourcen

Welche Laborausrüstung benötigen Elektronikingenieure für ihre Arbeit? Zunächst sind da die bekannten Hilfsmittel – das Netzteil, der Signalgenerator und das Oszilloskop. Heute sind ihre ehemals diskreten Funktionen in einem einzigen, praktischen, über USB betriebenen Gerät vereint. Ingenieure können auch die Vorteile von Software-Tools nutzen, die den Prozess der Entwicklung analoger Filterschaltkreise erheblich vereinfacht haben.

### Laborausrüstung bei der Arbeit mit analogen Schaltkreisen

Der Zweck eines elektronischen Schaltkreises ist es, elektrischen Strom zu steuern und zu lenken, um so eine Reihe von Funktionen zu ermöglichen. Für das Prüfen der Leistung eines jeden analogen Schaltkreisdesigns ist ein Netzteil ein wichtiges Hilfsmittel.

Ein Netzteil (**Abbildung 4**) arbeitet durch Gleichrichtung einer Wechselspannung, um eine gepulste Gleichspannung zu erzeugen, die gefiltert wird und eine glatte Spannung erzeugt. Diese Spannung wird dann geregelt und sorgt für einen konstanten Ausgangspegel, der von Änderungen der Eingangswechselspannung oder der Belastung des Schaltkreises nicht beeinflusst wird.

In einer Laborumgebung verwenden Elektronikingenieure ein Tisch-DC-Netzteil (das je nach technischen Daten über zusätzliche Funktionen verfügen kann), um die Stromquelle nachzubilden, die ein Schaltkreis in einer Feldapplikation verwendet. Durch Drehregler lassen sich die geregelten DC-Spannung und DC-Ausgänge präziser einstellen. Einige eigenständige Netzteile sind programmierbar, d. h. sie lassen sich direkt an einen Laptop anschließen, über den sie dann gesteuert werden können.



**Abbildung 4** Labornetzteil



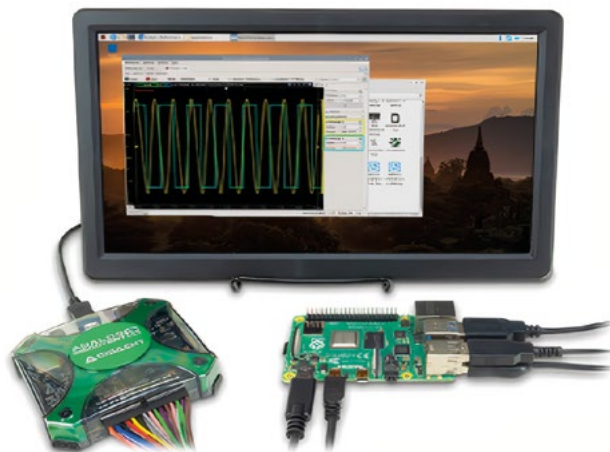
**Abbildung 5** Signalgenerator

Mit einem **Signalgenerator** können sich wiederholende oder nicht wiederholende Wellenformen erzeugt werden, sodass die Ingenieure die Größe, Form und Frequenz des gewünschten Prüfsignals festlegen können. In der Regel werden Sinus-, Dreieck- und Rechteckwellenoptionen angeboten, einschließlich Drucktasten zur Auswahl der Frequenzsteuerung und Drehregler zur Einstellung der Amplitude. Modelle mit höherer Spezifikation sind programmierbar und können auch über einen LCD-Bildschirm verfügen.



## Darstellung von analogen Signalen

Herkömmlicherweise verwendeten Ingenieure ein Oszilloskop, ein großes Tischgerät mit einem LED-Bildschirm, um analoge Signale zu betrachten. Neuartige ultrakompakte Geräte wie das Digilent Analog Discovery 2 vereinen den Funktionsumfang von Oszilloskop, Signalgenerator, DC-Netzteil und Voltmeter in einem kompakten Gehäuse. Diese „über USB angeschlossenen Geräte“ lassen sich ganz einfach mit einem Laptop konfigurieren, der auch zur Signalanzeige verwendet werden kann. Form und Funktionsumfang machen diese Kit-Lösungen ideal für Ingenieure, um Prüfungen und Signalanalysen virtuell und in jeder beliebigen Umgebung durchzuführen.



**Abbildung 6** Digilent Analog Discovery 2

## Design von Filterschaltkreisen

Sobald ein Ingenieur die technischen Daten für seine Filterschaltung festgelegt hat, bestimmt er die Schaltkreiskonfiguration, die erforderlich ist, um diese Spezifikationen zu erreichen. Traditionell mussten sie dazu die Übertragungsfunktion (Gleichung) des Filters mathematisch berechnen und dann die Bauelemente (Kondensatoren, Widerstände und Operationsverstärker) für den Aufbau des Filters auswählen. Das kann eine zeitaufwendige und manchmal komplizierte Aufgabe sein, die jedoch durch die Verfügbarkeit von Software-Tools wie dem [Analog Filter Wizard](#) von Analog Devices erheblich vereinfacht wurde. Mit diesem Tool kann der Ingenieur einen Filterschaltkreis in fünf einfachen Schritten gestalten:

### Schritt 1: Auswahl des Filtertyps

Wählen Sie den gewünschten Filtertyp (Tiefpass, Hochpass oder Bandpass)

## Schritt 2: Technische Daten

Über die Registerkarte „Specifications“ (Technische Daten) lassen sich Verstärkung, Durchlassbereich, Sperrbereich und Filter-Roll-Off eingeben und mit einem Schieberegler das Verhältnis zwischen der Geschwindigkeit und der Anzahl der Phasen bestimmen. Das Tool liefert außerdem ein Diagramm der Filterfrequenzkurve, das sofort aktualisiert wird, wenn die technischen Eingangsdaten geändert werden.

## Schritt 3: Bauelemente

Die Registerkarte „Components“ (Bauelemente) zeigt die Konfiguration des Schaltkreises und die Werte der physikalischen Bauelemente (R, C und Operationsverstärker) an, die erforderlich sind, um die technischen Filterdaten zu erreichen.

## Schritt 4: Toleranzen

Hier können Ingenieure die Toleranzen der Bauelemente für den von ihnen gewählten Schaltkreis festlegen. Bauelemente mit geringerer Toleranz sind zwar kostengünstiger und leichter verfügbar, können aber die Variabilität zwischen einzelnen Filterinstanzen erhöhen. Dieser Kompromiss zwischen Kosten, Leistung und Verfügbarkeit sollte durch die Anwendung von „Design for Manufacture“ (Entwicklung für die Fertigung) vollständig berücksichtigt werden – eine Strategie, die das potenzielle Risiko einer falschen Bauelementspezifikation in einem frühen Stadium des Designprozesses verringert.

## Schritt 5: Next Steps (Nächste Schritte)

Damit kann der Ingenieur SPICE-Dateien für den Filterschaltkreis herunterladen – eine nützliche Funktion, mit der die „reale“ Leistung der Filterschaltung simuliert werden kann.

## Schaltkreissimulation

Die **SPICE**-Software-Tools ermöglichen die Simulation des Verhaltens von Schaltkreisen in praktischen Applikationen. Durch die Änderung von Variablen wie der Netzteil-Versorgungsspannung und der Temperatur können die Ingenieure die für jeden Schaltkreis zulässigen Toleranzen ermitteln, lange bevor sie sich zum Bau eines physischen Prototyps verpflichten – was sowohl kostspielig als auch zeitaufwendig ist. Elektronikingenieure können auch eine Vielzahl von Eingangssignalen, Spannungs-/Temperaturschwankungen und Simulationstypen festlegen, die es ihnen ermöglichen, das Verhalten von Schaltkreisen sowohl in Bezug auf die Zeit als auch auf die Frequenz zu analysieren.

## Fazit

Die neueste Generation von Hardware- und Software-Tools sorgt für eine erhebliche Vereinfachung der Aufgaben, die Elektronikingenieure bei der Entwicklung analoger Schaltkreise üblicherweise durchführen. Der Funktionsumfang von Netzteil, Signalgenerator und Oszilloskop wurde in eigenständigen, ultrakompakten Geräten wie dem Analog Discovery 2 von Digilent kombiniert. Dabei wird die Entwicklung eines analogen Filterschaltkreises durch die Verfügbarkeit von Software-Tools wie dem [Analog Filter Wizard](#) von Analog Devices weiter erleichtert.

## Analoges Design einfach gemacht

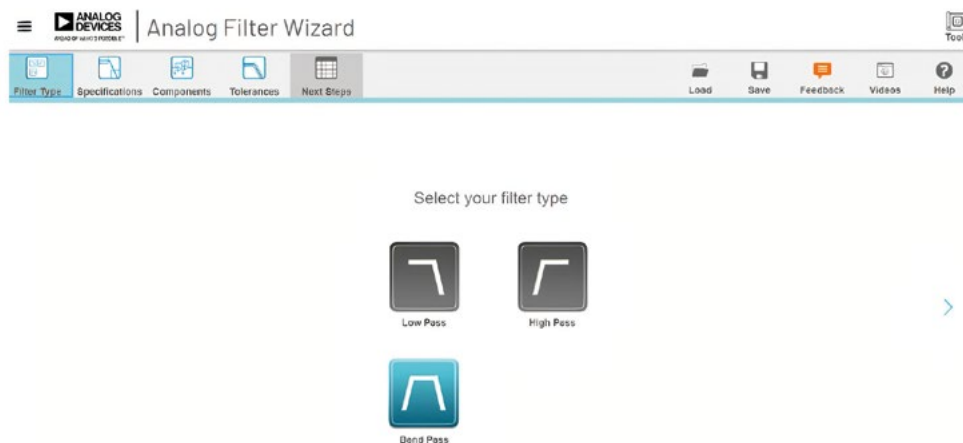
Viele Ingenieure müssen in kurzer Zeit einen voll funktionsfähigen analogen Filterschaltkreis entwickeln, würden dies aber viel lieber ohne manuelle Berechnung der Bauelementwerte, komplexe Zahlen oder Differenzialgleichungen tun. Mit kostenlosen Software-Tools wie [Analog Filter Wizard](#) und [LTSpice](#), beide von Analog Devices, können Elektronikingenieure jetzt das Verhalten eines Filterschaltkreises entwerfen und simulieren, bevor sie sie im Labor bauen oder in einer Prüfapplikation einsetzen.

### Die Design-Herausforderung

Die Frequenz der menschlichen Sprache liegt ungefähr zwischen 300 Hz und 3 kHz. Die Herausforderung besteht im Design eines Bandpassfilters (BPF), der es Signalen innerhalb dieses Bereichs (dem Durchlassbereich) ermöglicht, den Schaltkreis zu durchlaufen, während Frequenzen außerhalb dieses Frequenzbereichs (der Sperrbereich) ausgespart werden. Eine praktische Applikation dieses Filters findet man bei Telefonsystemen zur Bandbegrenzung des Signals, bevor es mit einem Analog-Digital-Wandler (ADC) digitalisiert wird.

### Aufbau des Schaltkreises

Starten Sie zunächst das Tool [Analog Filter Wizard](#) und wählen Sie einen Bandpassfilter aus der Auswahl der Optionen (**Abbildung 7**) aus.

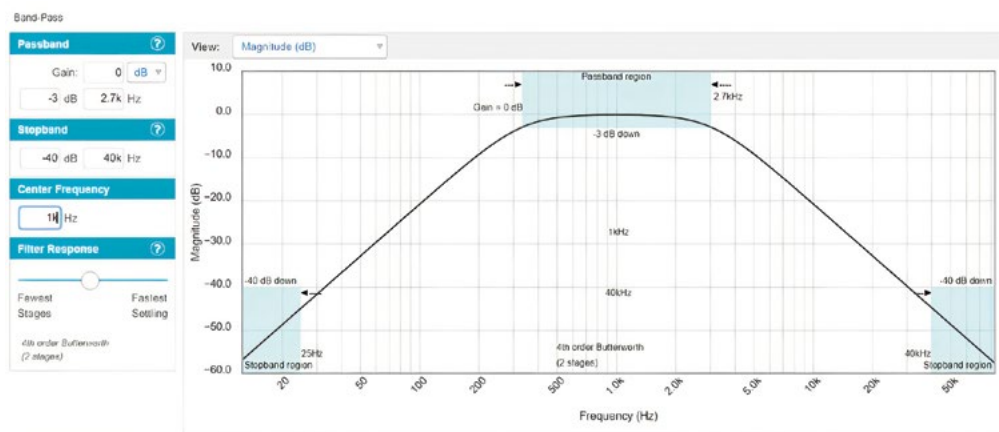


**Abbildung 7** Menü „Filter type“ (Filtertyp)

Öffnen Sie als Nächstes Registerkarte „**Specifications**“ (Technische Daten), um eine benutzerfreundliche grafische Oberfläche (GUI) anzuzeigen, die es dem Ingenieur ermöglicht, Filterspezifikationen einzugeben und dann ein Diagramm der entsprechenden Filterfrequenzkurve zu zeichnen. Für dieses Beispiel erzeugen die in **Abbildung 8** gezeigten Werte eine Frequenzkurve, die dem gewünschten Filterverhalten sehr nahe kommt.

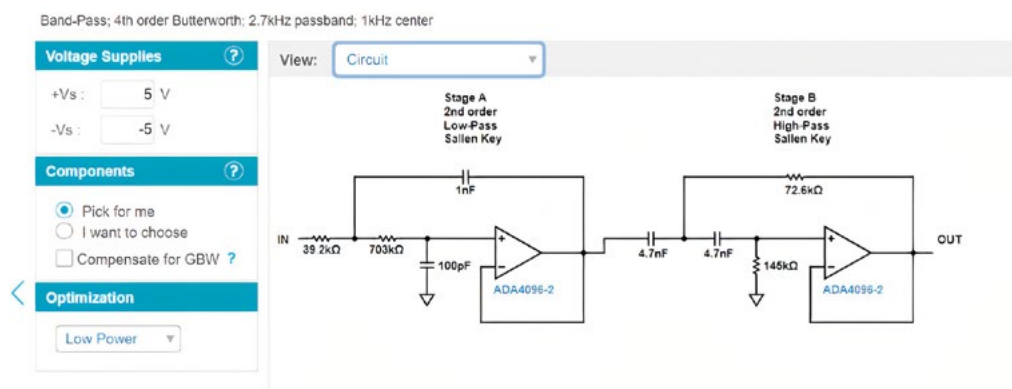
Der Durchlassbereich ist definiert als der Frequenzbereich, in dem das Ausgangssignal mindestens 70 % der Größe des Eingangssignals beträgt und wird durch den blau schattierten Bereich zwischen den beiden – 3-dB-Eckfrequenzen angezeigt. Der Filter „Roll-Off“ ist mit –40 dB/Dekade festgelegt, d. h. Signale, deren

Frequenzen 10 Mal höher (bzw. niedriger) als die beiden Eckfrequenzen von 300 Hz bzw. 3 kHz sind, werden um den Faktor 100 gedämpft (in der Größe reduziert).



**Abbildung 8** BPF-Frequenzkurve

Auf der Registerkarte „Components“ (Bauelemente) werden die für die Erstellung des Filters erforderlichen Bauelemente angezeigt. Es besteht die Möglichkeit, die Spannungspegel für den Schaltkreis hinzuzufügen und benutzerdefinierte Bauelementtypen (Widerstände, Kondensatoren, Operationsverstärker) auszuwählen oder einfach die vom Tool ausgewählten Standardkomponenten zu übernehmen.



**Abbildung 9** BPF-Schaltkreis-Bauelemente

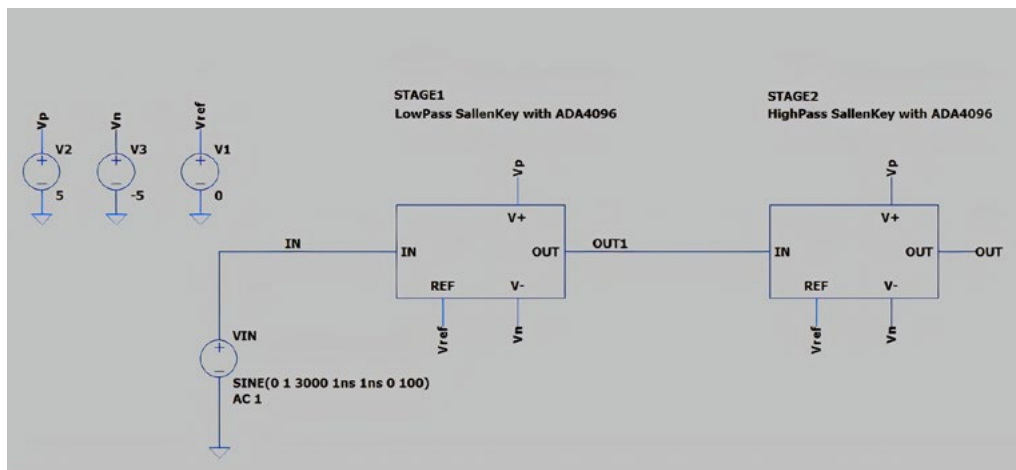
Die dargestellte Schaltkreiskonfiguration ist ein Butterworth-Filter vierter Ordnung, der aus einem Sallen-Key-Tiefpassfilter zweiter Ordnung und einem Sallen-Key-Hochpassfilter zweiter Ordnung besteht. In Kombination bieten sie die gewünschte Bandpass-Frequenzkurve.



Mit der Funktion „**SPICE Only**“ (Nur SPICE) (unter Registerkarte „Next Steps“ [Nächste Schritte]) können Ingenieure die Software-Dateien herunterladen, die für die Simulation des Schaltkreises mit dem [LTSpice-Simulations-Tool](#) benötigt werden, das von der Website von Analog Devices heruntergeladen werden kann.

## Definition von Eingangssignalen

**Abbildung 10** zeigt den LTSpice-Schaltplan, der nach dem Öffnen der Datei „TransientAnalysis.asc“ (bereitgestellt vom [Analog Filter Wizard](#)) dargestellt wird. Die beiden Filterstufen zweiter Ordnung, die Netzteile (V2, V3) und die Eingangssignalquelle (VIN) sind deutlich sichtbar.



**Abbildung 10** LTSpice BPF-Simulations-Schaltplan

Designer können schnell zwei Arten von Simulationen durchführen, um zu bestätigen, dass sich das Filterdesign wie festgelegt verhält.

- Transientenanalyse
- AC-Analyse
- Die Transientenanalyse simuliert das Filterverhalten für ein reales Zeitbereichssignal mit einer festgelegten Eingangsspannung und Frequenz. Die maximale Eingangsspannung muss innerhalb der Betriebsspannung der gewählten Operationsverstärker liegen.

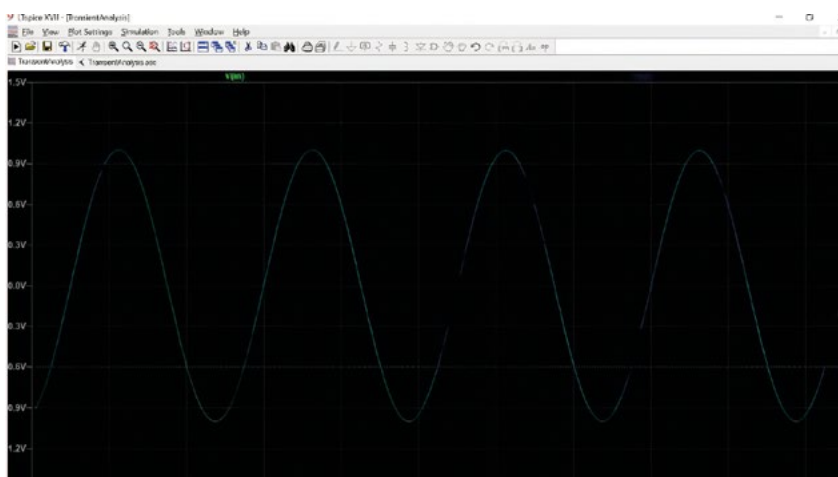
Mit der AC-Analyse wird das Filterverhalten über den gesamten Bereich der möglichen Eingangssignalfrequenzen simuliert.

## Simulation des Schaltkreises und Prüfung des Ausgangs

Für die Transientenanalyse ist das Eingangssignal eine Sinuswelle von 1V (Spitze) mit einer Frequenz von 1kHz.

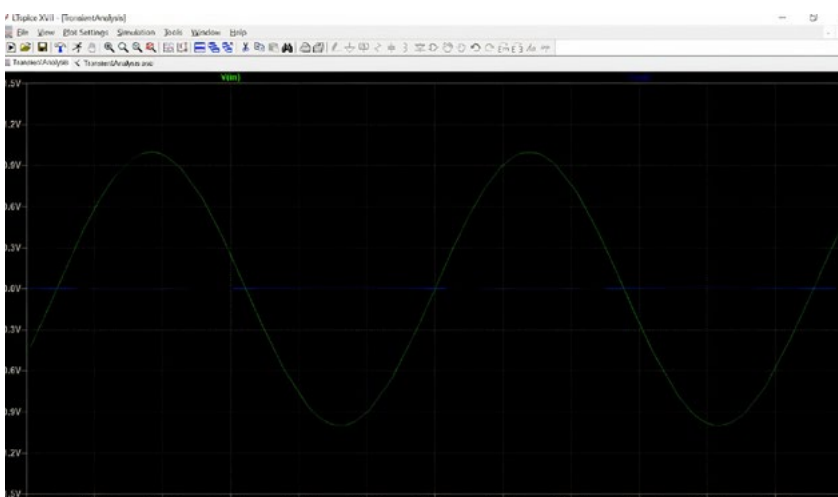
**Abbildung 6** zeigt, dass das Signal den Filter ungedämpft durchläuft, da das Eingangssignal (grüne Kurve) und das

Ausgangssignal (blaue Kurve) kaum voneinander zu unterscheiden sind. Dieses Verhalten ist zu erwarten, da 1 kHz innerhalb des Durchlassbereichs des Filters liegt.



**Abbildung 11** 1-kHz Zeitbereichssignal durchläuft den Filter ungedämpft

Wenn man dieselbe Simulation für ein Eingangssignal mit einer Frequenz von 30 kHz (**Abbildung 7**) erneut durchführt, liegt das Ausgangssignal bei fast 0 V – auch dies entspricht dem erwarteten Verhalten, da diese Frequenz außerhalb des Durchlassbereichs (Sperrbereichs) liegt.



**Abbildung 12** Der Filter unterdrückt ein 30-kHz-Zeitbereichssignal

Der Prüfstand-Schaltplan für die Datei „ACAnalysis.asc“, die aus dem [Analog Filter Wizard](#) heruntergeladen wurde, ist in **Abbildung 13** dargestellt.

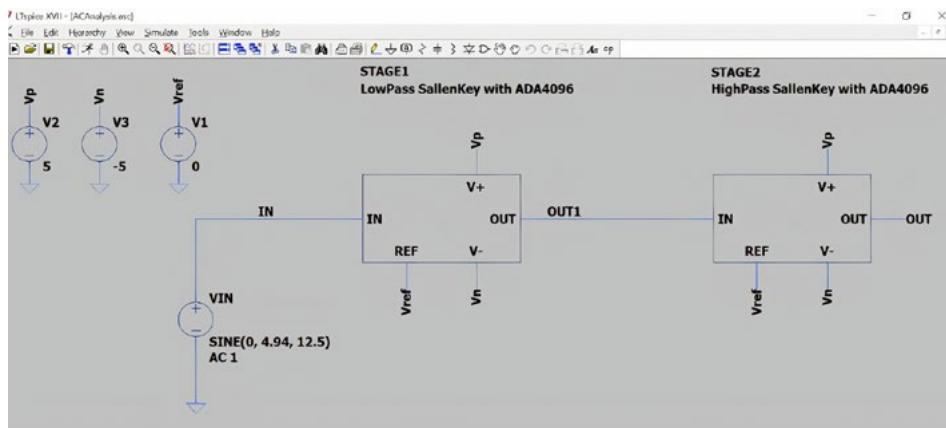


Abbildung 13 LTSpice -AC-Analyse-Prüfstand

Abbildung 14 zeigt die Frequenzkurve des durch die AC-Analyse erzeugten Filters, der genau jenem entspricht, der bei der Spezifikation der Filterleistung im [Analog Filter Wizard](#) (Abbildung 3) angezeigt wird.

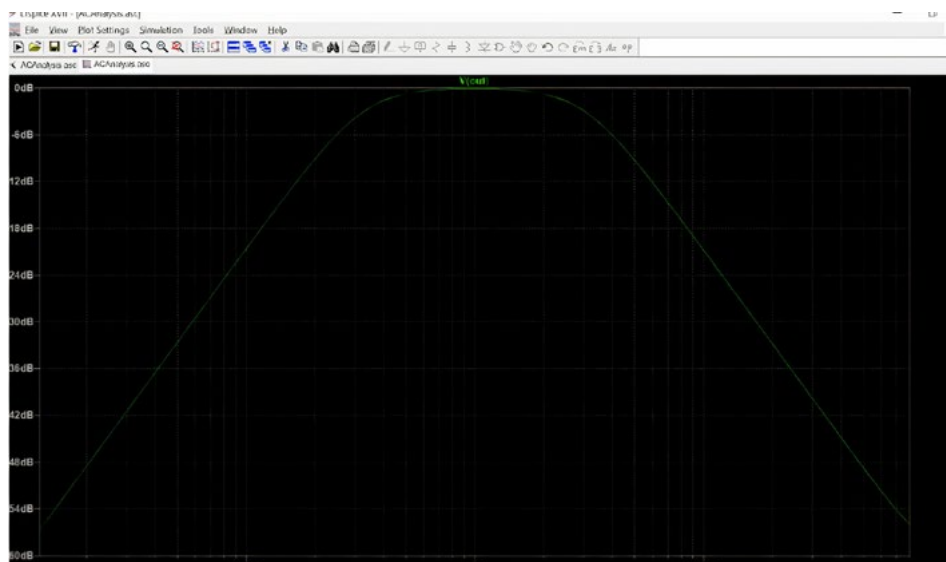


Abbildung 14 BPF-Filterfrequenzkurve



## Fazit

Mit diesem E-Book möchten wir das Bewusstsein für den Mangel und Bedarf an Elektronikingenieuren mit Kenntnissen im Bereich des analogen Designs stärken. Wir haben uns mit den Grundlagen des analogen Filterdesigns und den Tools beschäftigt, die Elektronikingenieure für ihre Arbeit verwenden. Das analoge Schaltkreisdesign ist kein Designprinzip, das auf der subjektiven Wahrnehmung des einzelnen Ingenieurs beruht, sondern hat sich zu einer hochstrukturierten Methodologie entwickelt.

Dies wird durch die Verfügbarkeit fortschrittlicher Hardware- und Software-Tools, mit denen sich Aufgaben automatisieren lassen, die früher zeitaufwendige manuelle Berechnungen erforderten, erheblich vereinfacht. Es bleibt zu hoffen, dass alle angehenden Ingenieure, die dieses E-Book lesen, das Design analoger Schaltkreise in einem anderen Licht betrachten und es als eine hochgeschätzte Kompetenz und eine lohnende Karriereoption sehen.

---