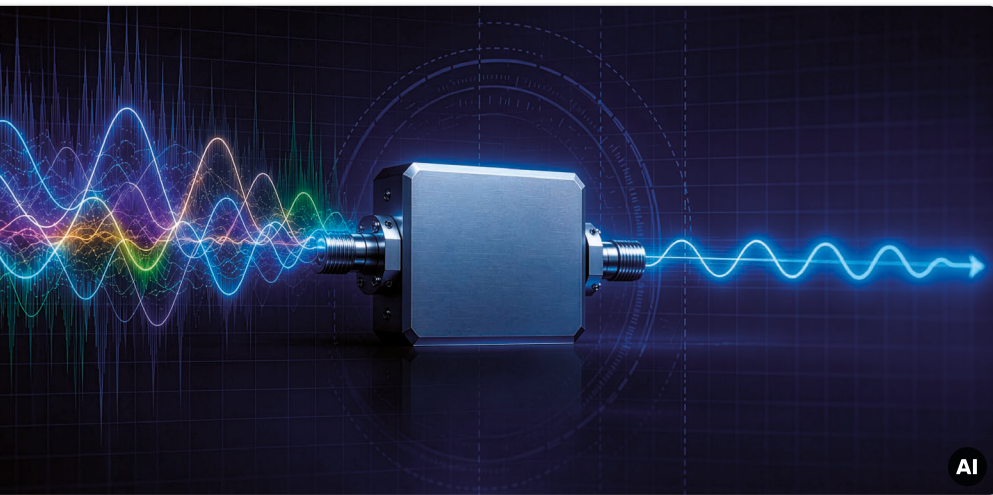


HF-Filter richtig spezifizieren

Warum bei der Auswahl von HF-Filtern Frequenzbereich und Bandbreite nicht genügen, wird hier erklärt.



Ein HF-Filter scheint auf den ersten Blick schnell beschrieben: Frequenzbereich, Bandbreite, Bauform, Datenblattkurve. Für eine erste Vorauswahl reicht das oft aus.

Für eine belastbare Spezifikation im realen HF-System ist es jedoch zu wenig.

Warum?

Weil ein Filter nicht isoliert arbeitet. Es sitzt zwischen Quelle und Last, sieht ein konkretes Impedanzumfeld, beeinflusst das Nutzsignal, unterdrückt unerwünschte Frequenzanteile und reagiert auf Layout, Temperatur, Signalpegel und Messbedingungen. Was in der Datenblattkurve überzeugend aussieht, kann sich auf der Leiterplatte anders verhalten, wenn die Randbedingungen nicht zur späteren Anwendung passen.

Der Beitrag betrachtet vor allem passive HF-Signalfilter in definierten Impedanzumgebungen. EMV- und Entstörfilter sind davon abzugrenzen: Dort können Common-Mode- und Differential-Mode-Anregung, Betriebsstrom, Bias-Bedingungen oder normativ festgelegte Abschlussimpedanzen eine andere Mess- und Bewertungslage schaffen.

Der Frequenzbereich ist nur der Anfang

Bei Bandpass- und Bandsperrfiltern bilden Mittenfrequenz und Bandbreite häufig den Ausgangspunkt. Bei Tief- und Hochpässen stehen Grenzfrequenzen, Passbandkante, Stopbandkante und Übergangsbereich im Vordergrund. Bei Notchfiltern zählen Kerbfrequenz, Kerbtiefe und Sperrbandbreite. Bei Diplexern oder Multiplexern kommen mehrere Frequenzzweige hinzu.

Darum ist es präziser, nicht nur nach „der Bandbreite“ zu fragen, sondern nach Nutzfrequenzbereich, Passbandgrenzen und erforderlichen Sperrbereichen. Eine 1- oder 3-dB-Bandbreite sollte einschließlich ihres Bezugswerts angegeben werden, beispielsweise relativ zum Passbandmaximum, das in der Dämpfungsdarstellung der minimalen Einfügedämpfung entspricht.

Auch der Sperrbereich braucht klare Grenzen. Meist gibt es konkrete Störer, Nebarkanäle, Oberwellen oder EMV-relevante Frequenzfenster. Die Spezifikation sollte deshalb festlegen, in welchem Bereich welche Dämpfung gefordert ist und bis zu welcher oberen Frequenz die Betrachtung gilt. Außerhalb des zunächst betrachteten Fensters können parasitäre Resonanzen oder erneute Durchlassbereiche auftreten.

Was die Filterkurve wirklich zeigt

Jedes reale Filter beeinflusst auch das Nutzsignal. Die Einfügedämpfung ist keine einfache Aussage über einen „verlorenen Anteil“, sondern eine Dämpfungsgröße unter definierten Quellen-, Last- und Referenzbedingungen. Sie umfasst dissipative Verluste und die Anpassung des Filters. Die am Messgerät sichtbare Übertragungsdämpfung kann zusätzlich Verluste von Fixture, Übergängen oder Leiterbahnen enthalten, wenn diese nicht herauskalibriert oder de-embedded wurden.

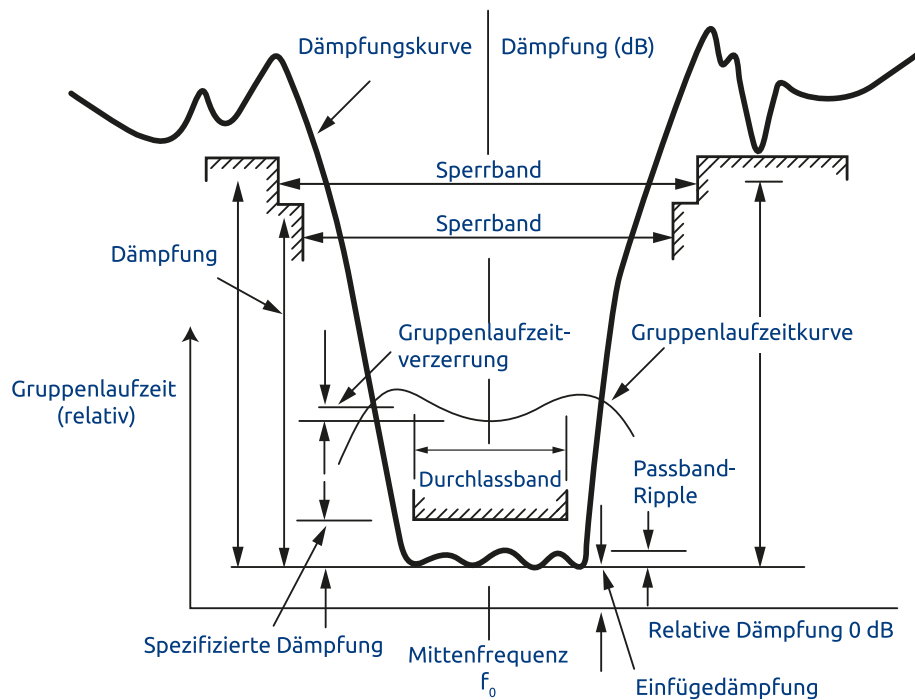
Für das System ist die Einfügedämpfung Teil des Pegelbudgets. In Empfängerpfaden verringert zusätzliche Dämpfung die Signalreserve und kann insbesondere vor der ersten Verstärkerstufe die Systemrauschzahl und damit die Empfindlichkeit verschlechtern. In Senderpfaden kostet sie Leistung. Dabei wird nicht die gesamte fehlende Ausgangsleistung zwangsläufig im Filter in Wärme umgesetzt: Reflektierte Leistung kann die vorgeschaltete Stufe belasten.

Neben dem Dämpfungswert zählt der Verlauf im Durchlassbereich. Passband-Ripple kann relevant werden, wenn Amplitudenlinearität, Modulationsqualität oder reproduzierbare Messwerte gefordert sind. Im Sperrbereich geht es darum, unerwünschte Frequenzanteile ausreichend zu unterdrücken. Entscheidend ist, ob der Stopbandwert als Übertragungsdämpfung aus S_{21} oder relativ zu einem definierten Passbandwert angegeben wird.

Der Anwendungsbezug ist wichtiger als eine pauschal hohe Dämpfung. Ein Funkempfänger, ein Senderpfad, ein EMV-nahes Design oder ein Messsystem stellen unterschiedliche Fragen an Sperrbereich und Flanken. Eine steilere Flanke kann hilfreich sein, ist aber nicht automatisch die beste Lösung. Filtertechnologie, Bauform, Verluste, Anpassung, Leistung und Kostenrahmen gehören immer zum Gesamtbild.



Autor:
Hendrik Nielsen
Technical Sales Specialist FCP
WDI AG
hnielsen@wdi.ag
www.wdi.ag



Die Technologie folgt der Anwendung

HF-Signalfilter können sehr unterschiedlich aufgebaut sein: etwa als LC-, SAW-, Quarz-, Keramik-/LTCC- oder Cavity-Filter. Spezielle EMI- und Entstörfilter bilden eine verwandte, hier jedoch nicht vertieft behandelte Produktgruppe. Hinzu kommen Funktionsblöcke wie Baluns, Diplexer oder Multiplexer, wenn Signale nicht nur gefiltert, sondern auch angepasst, getrennt oder zusammengeführt werden müssen.

Die Technologie allein entscheidet jedoch nicht. Ein Filtertyp kann für eine Anwendung sehr gut passen und für eine andere ungeeignet sein. Entscheidend sind Frequenzbereich, Bandbreitendefinition, Sperrbereich, Einfügedämpfung, Ripple, Anpassung, Bauform, Temperaturverhalten, Leistung, Layout und Messumgebung. Deshalb sollte die Technologieauswahl aus der Anwendung abgeleitet werden, nicht aus einem pauschalen Ranking.

Die typische Kurve ist keine Seriengarantie

Eine Datenblattkurve ist wichtig, aber sie ist nicht automatisch eine Seriengarantie.

Schematische Dämpfungs- und Gruppenlaufzeitkurve eines Bandpassfilters. Die Darstellung zeigt, warum neben Mittenfrequenz und Durchlassband auch Einfügedämpfung, Passband-Ripple, geforderte Sperrdämpfung und Gruppenlaufzeitverzerrung in die Spezifikation einbezogen werden sollten.

Wenn Quelle und Last mitbestimmen

HF-Filter werden häufig in definierten Impedanzumgebungen spezifiziert und gemessen. In vielen HF-Systemen ist 50 Ohm ein typischer Bezug. Weicht das reale Umfeld davon ab, kann sich auch die beobachtete Filterwirkung verändern.

Return Loss und VSWR sind bei gleichem Port, gleicher Frequenz und gleicher Referenzimpedanz zwei Darstellungen derselben Reflexionssituation. Ein hoher positiver Return-Loss-Wert beziehungsweise ein stark negativer S11-Wert in dB und ein VSWR nahe 1 kennzeichnen eine gute Anpassung. Eine schlechte Anpassung kann die Filterkurve beeinflussen, Welligkeiten erzeugen oder Wechselwirkungen mit benachbarten Stufen verstärken.

Bei einem klassischen Zweitorfilter sind S21 und S11 besonders anschaulich, für eine vollständige Bewertung müssen jedoch grundsätzlich alle vier Zweitorparameter betrachtet werden. S21 beschreibt die Vorwärtsübertragung, S11 die Anpassung am Eingang, S22 die Anpassung am Ausgang und S12 die Rückwärtsübertragung. Für ein lineares reziprokes Zweitor gilt bei gleicher Referenzimpedanz an beiden Ports $S_{21} = S_{12}$. Eine identische Eingangs- und Ausgangsanpassung folgt daraus nicht; S11 und S22 können unterschiedlich sein.

Doch die einfache Zweitorbetrachtung hat Grenzen. Bei differentiellen Filtern, Baluns, Diplexern und Multiplexern müssen zusätzliche Ports, Mixed-Mode-S-Parameter, Isolation, Amplitudenbalance, Phasenbalance oder Mode Conversion betrachtet werden.

Nicht nur Amplitude, auch Phase, Laufzeit und Leistung

Nicht jede Anwendung wird allein durch die Amplitudenkennlinie ausreichend beschrieben. Bei breitbandig modulierten, gepulsten oder zeitkritischen Signalen können Phase, Gruppenlaufzeit und Gruppenlaufzeit-Ripple im Nutzband relevant werden. Zwei Filter können eine ähnliche S21-Amplitudenkurve zeigen und ein Signal trotzdem unterschiedlich beeinflussen, wenn dessen Spektralkomponenten unterschiedlich verzögert werden.

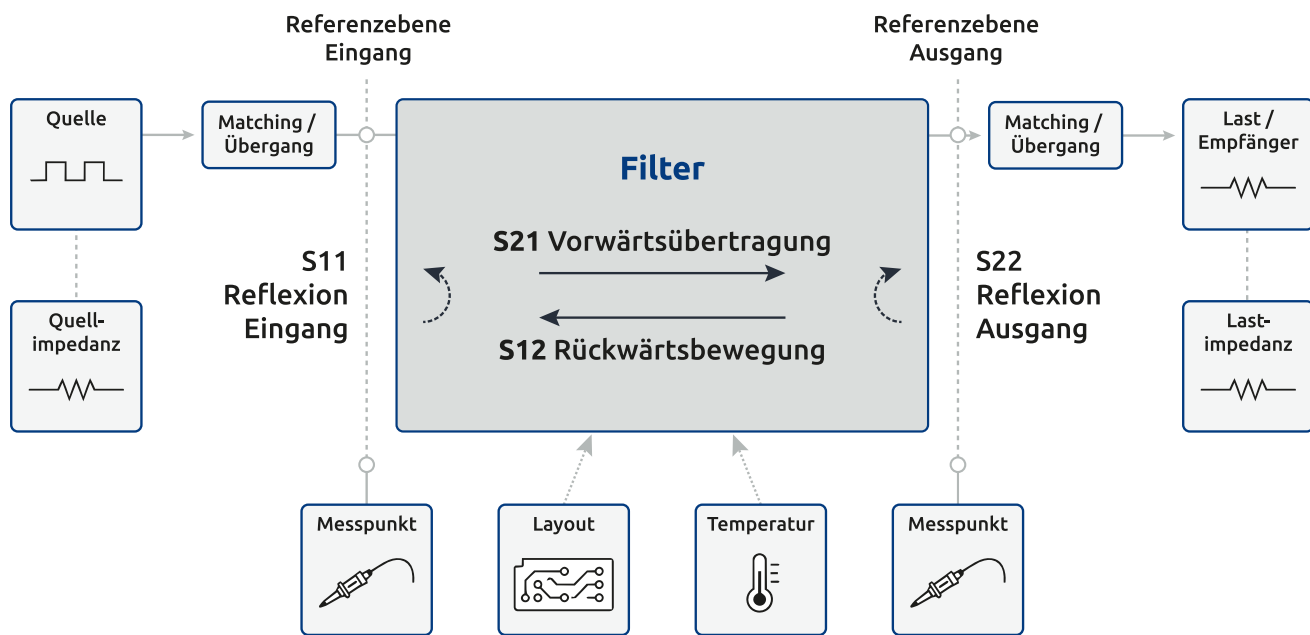
Auch Leistungsgrenzen sind mehr als ein Maximalwert. Besonders in Senderpfaden muss geklärt werden, ob die Angabe für Dauerstrichbetrieb, gepulste Signale oder bestimmte thermische Bedingungen gilt. Bei Pulsbetrieb gehören Spitzenleistung, Pulsbreite und Tastverhältnis zusammen. Relevant können auch zulässiges Last-VSWR, reflektierte Leistung, thermische Anbindung und Leistungsderating über Temperatur sein. Linearitäts- oder Intermodulationsgrößen sollten nur dann gefordert werden, wenn der Hersteller sie spezifiziert oder die Anwendung sie verlangt.

Datenblatt vs. Messung

Eine Filterkurve im Datenblatt gilt nur für die angegebenen Messbedingungen. Vor dem Vergleich mit der eigenen Platinenmessung sollte deshalb geklärt werden, was tatsächlich gemessen wurde. Prüfpunkte:

- Wo liegt die Referenzebene der Messung?
- Bis wohin wurde kalibriert?
- Wurden Fixture oder Anschlussstrukturen de-embedded?
- Entsprechen Quell- und Lastimpedanz dem Datenblatt?
- Sind Leiterbahnen, Pads, Vias oder Steckverbinder Teil des gemessenen Signalfads?
- Gelten Kurven und Werte nur bei 25 °C oder über den spezifizierten Temperaturbereich?
- Wurden Signalpegel, Leistung und Lastbedingungen passend zur Anwendung bewertet?

Merksatz: Erst wenn Referenzebene, Messaufbau, Impedanzumgebung und Betriebsbedingungen vergleichbar sind, lässt sich eine Datenblattkurve sinnvoll mit der Boardmessung vergleichen.



HF-Filter als Zweitor im Systemkontext: Quelle, Last, Matching, Referenzebenen, Layout, Temperatur und Messpunkt beeinflussen die Bewertung der S-Parameter

Datenblätter können typische Kurven einzelner Muster, typische Werte, garantierte Minimal- oder Maximalwerte, Werte bei Raumtemperatur, Werte über den spezifizierten Temperaturbereich, simulierte Werte oder produktionsgeprüfte Parameter enthalten.

Eine Touchstone-Datei kann für Simulation und Vorauswahl hilfreich sein, ist aber nicht automatisch eine Worst-Case-Beschreibung über Fertigungslose, Temperatur und Toleranzen. Deshalb sollte geklärt werden, welche Werte garantiert sind, unter welchen Bedingungen sie gelten und welche Parameter serienmäßig geprüft werden.

Auch die Datenblattkurve selbst ist nicht automatisch identisch mit der Boardmessung.

Sie entsteht unter definierten Bedingungen: Messaufbau, Referenzebene, Kalibrierung, Test-Fixture, Impedanzumgebung und oft auch Temperatur- oder Pegelbedingungen. Auf der Leiterplatte kommen Leiterbahnen, Masseführung, Übergänge, Pads, Vias und benachbarte Bauteile hinzu.

Vor einem Vergleich mit der Datenblattkurve muss geklärt werden, was die Boardmessung umfasst. Wurde bis zu den Bauteilanschlüssen de-embedded? Oder sind Leiterbahnen, Übergänge und Anschlussstrukturen bewusst Teil des gemessenen Signalpfads?

Spezifikation ist Systemarbeit

Ein HF-Filter ist kein isoliertes Frequenzfenster. Er ist Teil eines Signalpfads. Deshalb beginnt die Auswahl zwar oft mit

Frequenzbereich und Bandbreite, endet dort aber nicht. Durchlassverhalten, Sperrverhalten, Anpassung, S-Parameter, Leistungsbedingungen, Messaufbau und Leiterplattenumgebung bestimmen mit, ob die Komponente im System wirklich passt.

Für Entwickler bedeutet das: Das Datenblatt muss im Kontext der Zielschaltung gelesen werden. Für den technischen Einkauf bedeutet es: Eine präzise Anfrage braucht mehr als Frequenz und Bauform. Je klarer die Randbedingungen beschrieben sind, desto besser lassen sich Filter, Alternativen und Rückfragen bewerten.

In der Auswahlpraxis hilft deshalb weniger die schnelle Teilenummer als die saubere Klärung der Randbedingungen: Welche Parameter sind kritisch? Welche Angaben fehlen? Welche Werte sind typisch, welche garantiert? Welche Daten müssen aus dem Datenblatt, aus S-Parametern oder aus einer Musterprüfung im Zielsystem bewertet werden?

So wird aus einer parametrischen Suche eine belastbare Spezifikation. Und genau das entscheidet darüber, ob ein HF-Filter nicht nur auf dem Papier passt, sondern auch im realen Design funktioniert. ◀

Was vor der Musterbestellung zu klären ist

Frequenz und Bauform reichen für eine belastbare Filteranfrage meist nicht aus. Vor der Musterbestellung sollten diese Punkte geklärt sein:

- Filter- oder Mehrportfunktion und Portzahl
- Nutzfrequenzbereich, Passbandgrenzen und Bandbreitendefinition
- kritische Störfrequenzen, Sperrfenster und Referenzpegel
- zulässige Einfügedämpfung und Passband-Ripple
- Quell- und Lastimpedanz sowie Return Loss oder SWR an den relevanten Ports
- S-Parameter-Daten vorzugsweise als Touchstone-Dateien passend zur Portzahl, einschließlich Referenzimpedanz, Portzuordnung sowie Mess- oder Simulationsbedingungen
- Phase, Gruppenlaufzeit und Gruppenlaufzeit-Ripple, falls relevant
- CW-Leistung, bei Pulsbetrieb zusätzlich Spitzenleistung, Pulsbreite und Tastverhältnis
- zulässiges Last-SWR und gegebenenfalls thermische Randbedingungen
- Temperaturbereich und garantierte Filterkennwerte über den Temperaturbereich
- Bauform, Layout-Vorgaben und messtechnische Referenzebenen
- typische oder garantierte Werte sowie Musterprüfung im Zielsystem