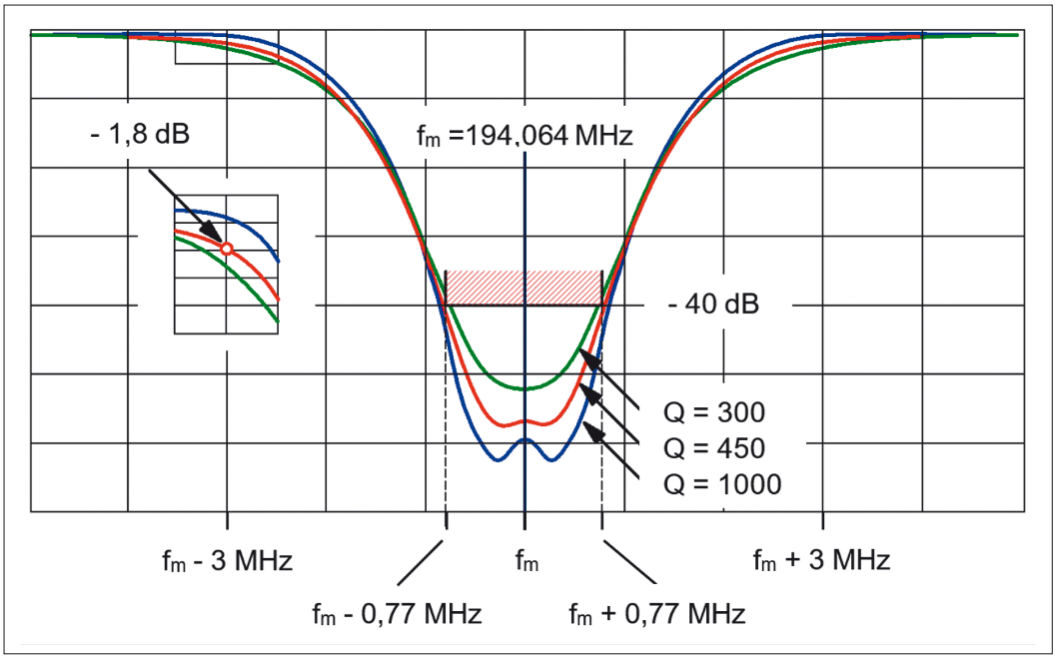
In vier Schritten zum Erfolg

Steilflankige Hochfrequenzfilter entwickeln



Dieser Fachbeitrag will mit der Filterproblematik weniger vertrauten Entwicklungsingenieuren das Wissen vermitteln, um selbst Filter zu kreieren.

Wer heutzutage HF-Hardware entwickelt, muss sich spezialisieren; man arbeitet vorwiegend auf einem eng begrenzten Gebiet. Ein solches Spezialgebiet ist die Filtertechnik. Für Entwickler, die auf anderen Gebieten zuhause sind, empfiehlt es sich, Filter als fertige Komponenten zu kaufen oder extern entwickeln zu lassen. Manchmal ist das nicht möglich; dann stellt sich die Frage nach einer Eigenentwicklung.

Wann ist eine Eigenentwicklung möglich?

Die Vielfalt an HF- und Mikrowellen-Filtern ist enorm, wie allein ein Blick auf die Abmessungen unterschiedlicher Ausführungsformen zeigt: Sie variieren von Strukturen im nm-Bereich bis zu Exemplaren in Schaltschrank-Größe. Ähnlich umfangreich ist die Menge an Technologien, Herstellungsverfahren und Anwendungen. Innerhalb dieser Vielfalt existieren ausgedehnte Bereiche, die für Eigenentwicklungen nicht infrage kommen. Beispiel: Filter für mobile Endgeräte [1]. Diese werden in Milliarden Stückzahlen produziert; Design und Produktion erfordern hochspezielles Knowhow, komplexe Fabrikationsprozesse und extreme Investitionskosten. Solche Filter entwickeln zu wollen, wäre aussichtslos. Gleiches gilt für viele andere Filterarten.

Eine erfolgreiche Eigenentwicklung gelingt, wenn der Entwickler über ein Set passgenauer Instrumente verfügt, bestehend aus Software, Messtechnik, Produktionsmitteln, Kenntnissen und Erfahrungen. Wie dieses Set im Detail beschaffen sein muss, hängt von der Art des zu entwickelnden Filters ab.

Filter mit hoher Flankensteilheit

Eine besondere Herausforderung stellt die Entwicklung von Filtern dar, deren Parameter nahe an physikalischen Grenzen liegen. Filter mit hoher Flankensteilheit (Anhaltswert S <1,1, s. Bild 1) fallen in diese Kategorie. Im Folgenden wird die Entwicklung solcher Filter am Beispiel einer Bandsperre mit S = 1,011 beschrieben. Die dargelegten Erkenntnisse und Anregungen können auch beim Entwickeln anderer steilflankiger Filter von Nutzen sein.

Von der Spezifikation zur Herstellung

Zum Filter-Design gibt es unzählige Veröffentlichungen. Die Mehrzahl betrifft spezielle Teilaspekte. In breiterem Umfang

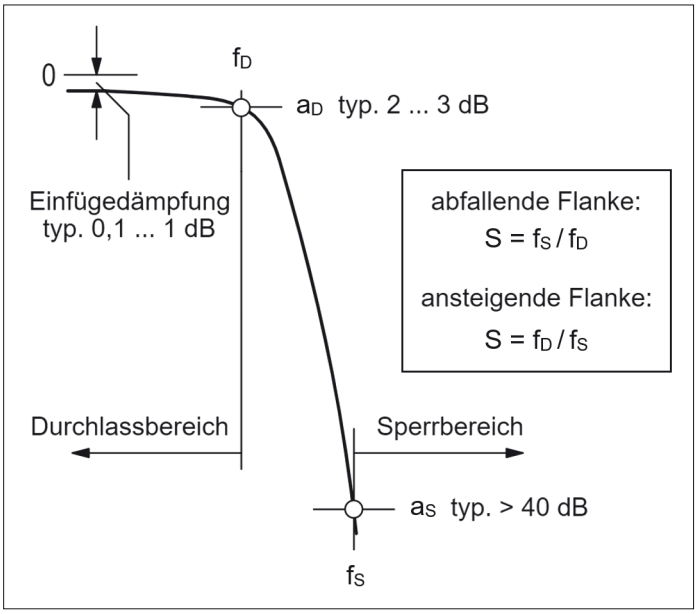


Bild 1: Definition der Flankensteilheit S (f_D … Durchlassgrenzfrequenz, a_D … Dämpfung bei der Durchlassgrenzfrequenz, f_S … Sperrgrenzfrequenz, a_S … Sperrdämpfung)

Autor:
Kurt Graefe

Graefe Hochfrequenztechnik
www.graefe-hochfrequenz.de

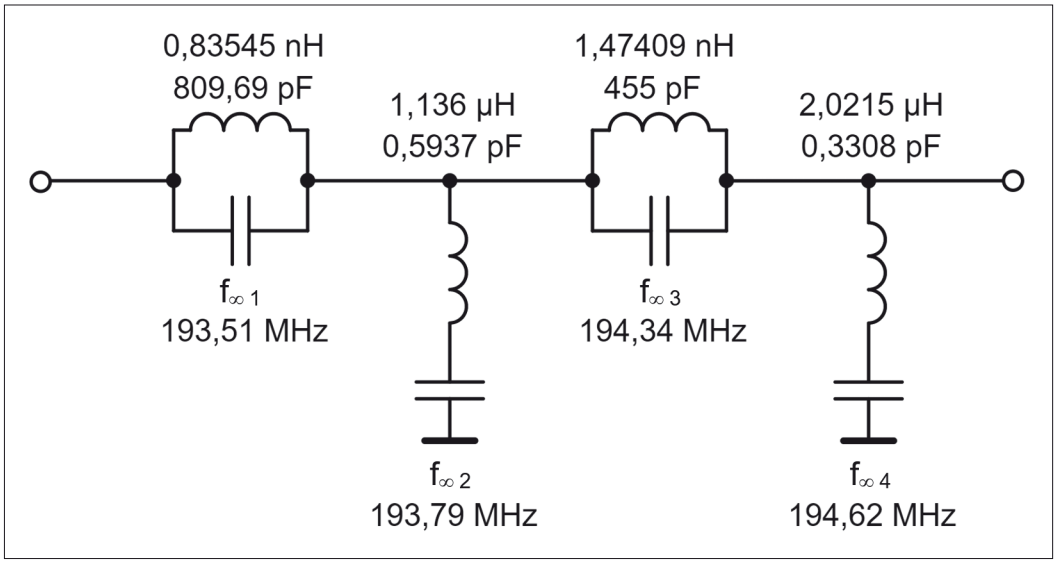


Bild 2: DAB-Sperre, Synthese-Ergebnis

wird das Thema beispielsweise in [2], [3] und [4] behandelt sowie in zwei Klassikern, die hier erwähnt werden müssen: Zverev [5] und Matthaei, Young & Jones [6].

Der Entwicklungsprozess lässt sich in vier Schritte unterteilen:

- Spezifikation
- Synthese
- Umwandlung
- Herstellung

Schritt 1: Spezifikation

Je strenger die Anforderungen an Flankensteilheit, Sperrdämpfung und Anpassung, desto höher ist der Entwicklungs- und Fertigungsaufwand. Deshalb empfiehlt es sich, die Spezifikationen nur so streng wie unbedingt notwendig festzulegen.

Vor Entwurfsbeginn müssen folgende Grundanforderungen bekannt sein:

- Ein- und Ausgangsimpedanz
- Sperrbereich(e)
- Durchlassbereich(e)
- Betriebsdämpfung |S21|
- Eingangsanpassung |S11|

Für manche Anwendungen kommen noch Phasengang/Gruppenlaufzeit hinzu. Es folgen dann die fallspezifischen Anforderungen, festgelegt im Pflichtenheft. Diese Anforderungen betreffen elektrische Eigenschaften (Leistung, Linearität…), mechanische Eigenschaften (Volumen, Gewicht, Robustheit, HF-Anschlüsse…), Umgebungsbedingungen (Betriebstemperatur, Luftfeuchtigkeit…), technische Dokumentation, Kosten, Termine und mehr [7].

Beispiel: Es soll eine Bandsperre für Messzwecke entworfen und hergestellt werden, die den DAB+ Kanal K 7 D (f_m = 194,064 MHz) unterdrückt. Folgende Grundanforderungen sind vorgegeben:

- Ein- und Ausgangsimpedanz: 50 Ohm
- Sperrbereich: (f_m) ± 0,77 MHz
- Sperrdämpfung: >40 dB (typ. >42 dB)
- unterer Durchlassbereich: 0 … (f_m - 3 MHz)
- oberer Durchlassbereich: (f_m + 3 MHz) … >750 MHz

Einfügedämpfung: <1 dB (<2 dB an den Durchlassecken)

Eingangsanpassung: >14 dB

Schritt 2: Synthese

Jede Filterentwicklung beginnt mit der Synthese. Hierbei entwirft der Entwickler eine Schaltung, welche die Anforderungen erfüllt. Ein besonders praxistaugliches Syntheseverfahren besteht darin, Filter durch Frequenztransformationen aus Referenz-Tiefpässen abzuleiten. Deren Parameter werden entweder berechnet oder Filtertabellen entnommen. Dieses Verfahren führt schnell zu passablen Lösungen [8].

Heute benutzt der Entwickler bevorzugt Software-Programme, mit denen er Filter direkt entwerfen, simulieren und optimieren kann (direct sythesis).

Anmerkung: Neben den klassischen Entwurfsmethoden entstehen mehr und mehr neue, die auf moderne Filtervarianten zugeschnitten sind. Ein Beispiel ist die Synthese mithilfe der Kopplungsmatrix [9].

Steile Filterflanken lassen sich nur erzeugen, wenn mindestens einer der Zweige einen Resonator enthält. Das gilt ausnahmslos für alle Filtertypen (Tiefpass, Hochpass, Bandpass, Bandsperre).

Im vorliegenden Beispiel besteht das Synthese-Ergebnis aus vier Resonatoren in Form von LC-Kreisen, s. Bild 2. Jeder erzeugt einen Dämpfungspol, d.h., die Dämpfung bei $f_{\infty 1}$, $f_{\infty 2}$, $f_{\infty 3}$ und $f_{\infty 4}$ ist theoretisch unendlich hoch.

Um eine vorgegebene Steilheit S (bei Einhaltung aller übrigen Spezifikationen) zu erreichen, ist es zwingend notwendig, dass die Leerlaufgüte Q der eingesetzten Resonatoren einen Minimalwert nicht unterschreitet, sonst ist das Filter mit den vorgegebenen Spezifikationen nicht zu verwirkli-

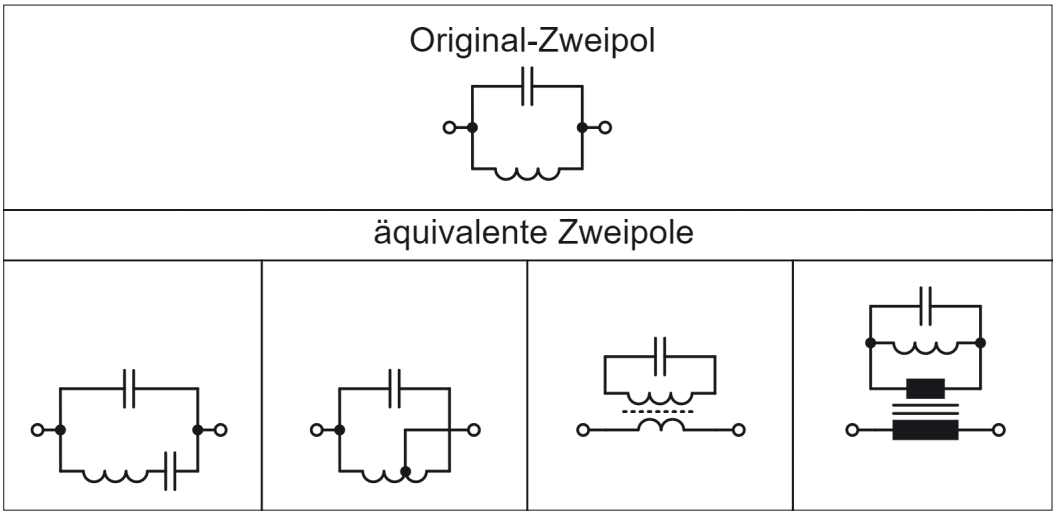


Bild 3: Beispiele für äquivalente Zweipole

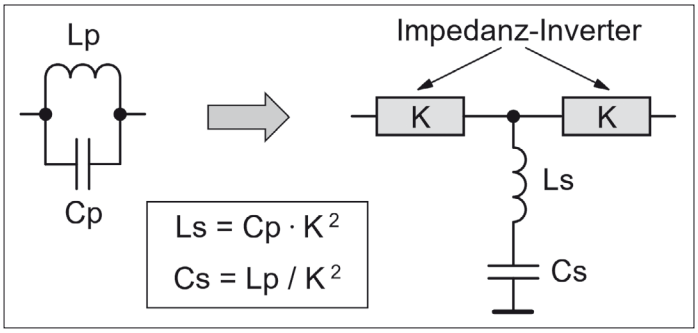


Bild 4: Impedanz-Inverter. K heißt charakteristische Impedanz oder Inverter-Impedanz

chen. Das wird hier ausdrücklich erwähnt, weil gelegentlich zu lesen ist, zu niedrige Güten könnten durch andere Maßnahmen kompensiert werden, etwa durch Hinzufügen weiterer Resonatoren. Das funktioniert (leider) nicht.

Das Aufmacherbild zeigt die simulierten Durchlasskurven der DAB-Sperre für Q = 300, 450 und 1000. Es ist zu erkennen, dass die Resonatorgüte mindestens 450 betragen muss.

Für den Bereich um 200 MHz eignen sich LC-, Helix- und Koaxial-Resonatoren. Andere Ausführungen, wie BAW/SAW-Resonatoren, Quarze, MEMs oder planare Strukturen, sind hier aus unterschiedlichen Gründen nicht brauchbar.

Koaxial- oder Helix-Resonatoren wären optimal. Sie zeigen aber periodisch wiederkehrende Resonanzen bei ungeradzahligen Vielfachen ihrer Grundfrequenz, die unterhalb 750 MHz unerlaubte Dämpfungseinbrüche erzeugen würden. Für die Realisierung bleiben daher nur LC-Resonatoren übrig.

Die Resonatorgüte wird im Wesentlichen von den Spulen bestimmt. Gütewerte herkömmlicher Spulen im Bereich um 200 MHz liegen üblicherweise bei <100. Spulen mit Güten >500 herzustellen, wie sie hier gebraucht werden, erfordert einigen Aufwand, ist aber möglich (s. Schritt 4).

Schritt 3: Umwandlung

Unabhängig davon, mit welcher Methode man zum Synthese-Ergebnis gelangt, muss es in den meisten Fällen umgewandelt werden. Das ist notwendig, weil das Ergebnis fast immer unrealisierbare Bauelemente-Werte enthält. Darüber hinaus werden Umwandlungen auch dann eingesetzt, wenn spezielle Anforderungen zu erfüllen sind, beispielsweise minimale Spulenanzahl, Verwendung gleicher Bauteile oder Realisierbarkeit in planaren Technologien.

Für die Umwandlungen benutz man Schaltungstransformationen. Zu den gebräuchlichsten zählen Stern-Dreieck-Umwandlung, Norton-Transformationen, Einfügen von Invertern, Richards-Transformation, Kuroda-Identitäten und Äquivalenz-Transformationen.

Bei Äquivalenz-Transformationen wird ein Zweig des Synthese-Ergebnisses durch einen anderen („äquivalenten") Zweig ersetzt. Dieser zeigt näherungsweise das gleiche Verhalten wie das Original, enthält aber realisierbare Bauelementewerte.

Eine große Zahl an Schaltungstransformationen findet man u.a. in [10]. Die meisten professionellen Design-Programme erlauben die Anwendung von Transformationen ohne zusätzliche Rechenarbeit.

Das Synthese-Ergebnis (Bild 2) liefert Induktivitätswerte <2 nH und >1 µH, die nicht realisierbar sind. Deshalb müssen sowohl die Längszweige als auch die Querzweige umgewandelt werden.

Eine Lösung für die Längszweige könnte darin bestehen, Parallelkreise durch äquivalente Zweipole zu ersetzen. Bild 3 zeigt verschiedene Möglichkeiten. Für den vorliegenden Fall kann keine geeignete Äquivalenz-Transformation gefunden werden. Deshalb wird eine andere Transformationsmethode angewendet: Die Längszweige werden durch Querzweige ersetzt, die beidseitig mit einem Impedanz-Inverter beschaltet sind (Bild 4). Es eignen sich passive Vierpole unterschiedlicher Art [2, 6]. Hier werden Lambda/4 lange Koaxialleitungen eingesetzt. Bild 5 zeigt die umgewandelte Struktur. K ist gleich dem Wellenwiderstand Z_W der Leitung, hier 50 Ohm.

Das Transformationsverhalten von Invertern ist nur näherungsweise ideal. Die modifizierte Schaltung verhält sich deshalb etwas anders als die Originalschaltung. Eine Simulation zeigt, dass diese Abweichung im vorliegenden Fall akzeptabel ist.

Die Querzweige sind nicht zu realisieren, weil die Eigenresonanzfrequenzen der Spulen zu niedrig liegen. Deshalb werden die Serienresonanzkreise durch äquivalente Zweipole ersetzt, wobei der Wert von L vorgegeben wird.

Die Güte von Luftspulen steigt mit deren Induktivität. Deshalb ist es sinnvoll, L möglichst hoch zu wählen. Das stößt jedoch an Grenzen: Je größer L, desto kleiner die Cs. Diese dürfen aber nicht zu klein werden. Ein Mindestwert von ungefähr 1 pF ist noch akzeptabel, mit L = 200 nH ist das gewährleistet. Die Umrechnung der Zweige erfordert etwas Rechenaufwand, das Ergebnis ist in Bild 6 dargestellt. Damit wurde eine fertigungsreife Schaltung gefunden.

Schritt 4: Herstellung

Die Spulen müssen Leerlaufgüten >500 haben, wenn die Kondensatorgüten über 1500 liegen, was hier der Fall ist. Derartig hohe Spulengüten werden mit optimierten Zylinderluftspulen erreicht. Sie bestehen aus dickem, versilbertem Draht; Windungszahl, Steigung, Formfaktor und Volumen werden so bestimmt, dass Q maximal wird. Zusätzlich wird der Formfaktor im Hinblick auf niedrige Temperaturabhängigkeit von L optimiert. Wickelkörper, Platinen,

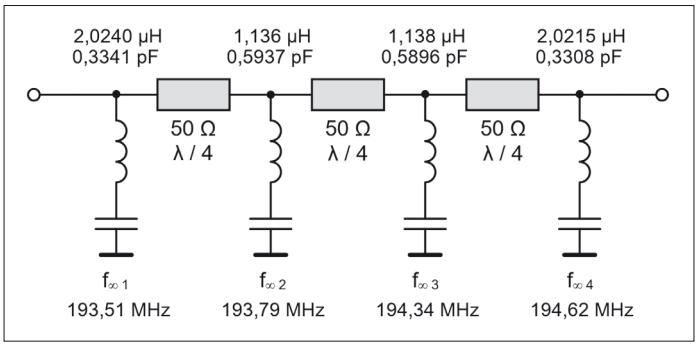


Bild 5: Schaltung nach Umwandlung mit Impedanz-Invertern

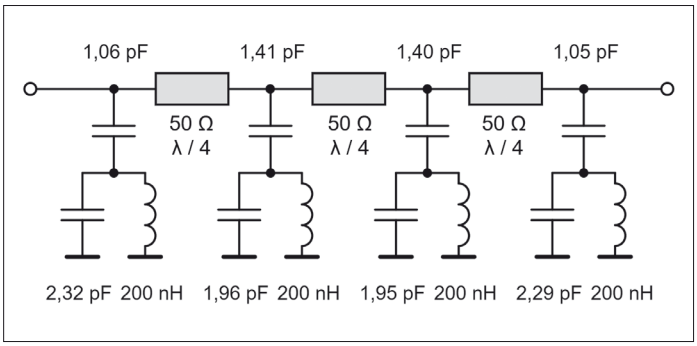


Bild 6: Fertigungsreife Schaltung

Stützpunkte oder Kernmaterialien (Übertrager, Abstimmkerne) werden nicht verwendet, weil das die Güte verringern würde. Aus demselben Grund sind die Spulen genügend weit entfernt von metallischen Flächen (Gehäuse, Abschirmungen) angeordnet.

Als Kondensatoren kommen verlustarme Ausführungen mit niedrigem TK zum Einsatz. Die unteren Cs sind zwecks Feinabgleich abstimmbar. Für die oberen Cs haben sich handgefertigte Exemplare mit Teflon-Dielektrikum bewährt.

Sonstige Empfehlungen:

- Filter mechanisch stabil aufbauen
- Verkopplungen und parasitäre Kapazitäten minimieren
- Bauteile verspannungsfrei montieren
- Filter im Wärmeschrank voraltern
- ausreichend abschirmen, um das Eindringen externer Störsignale zu minimieren.

Die Güte von Resonatoren wächst mit deren Volumen. Deshalb ist eine Miniaturisierung nur bedingt möglich. Das Filter hat die Maße 380 x190 x120 mm und wiegt 1,7 kg. Bild 7 zeigt die Verläufe von |S21| und |S11|. Es ist zu erkennen ist, dass alle Anforderungen erfüllt werden.

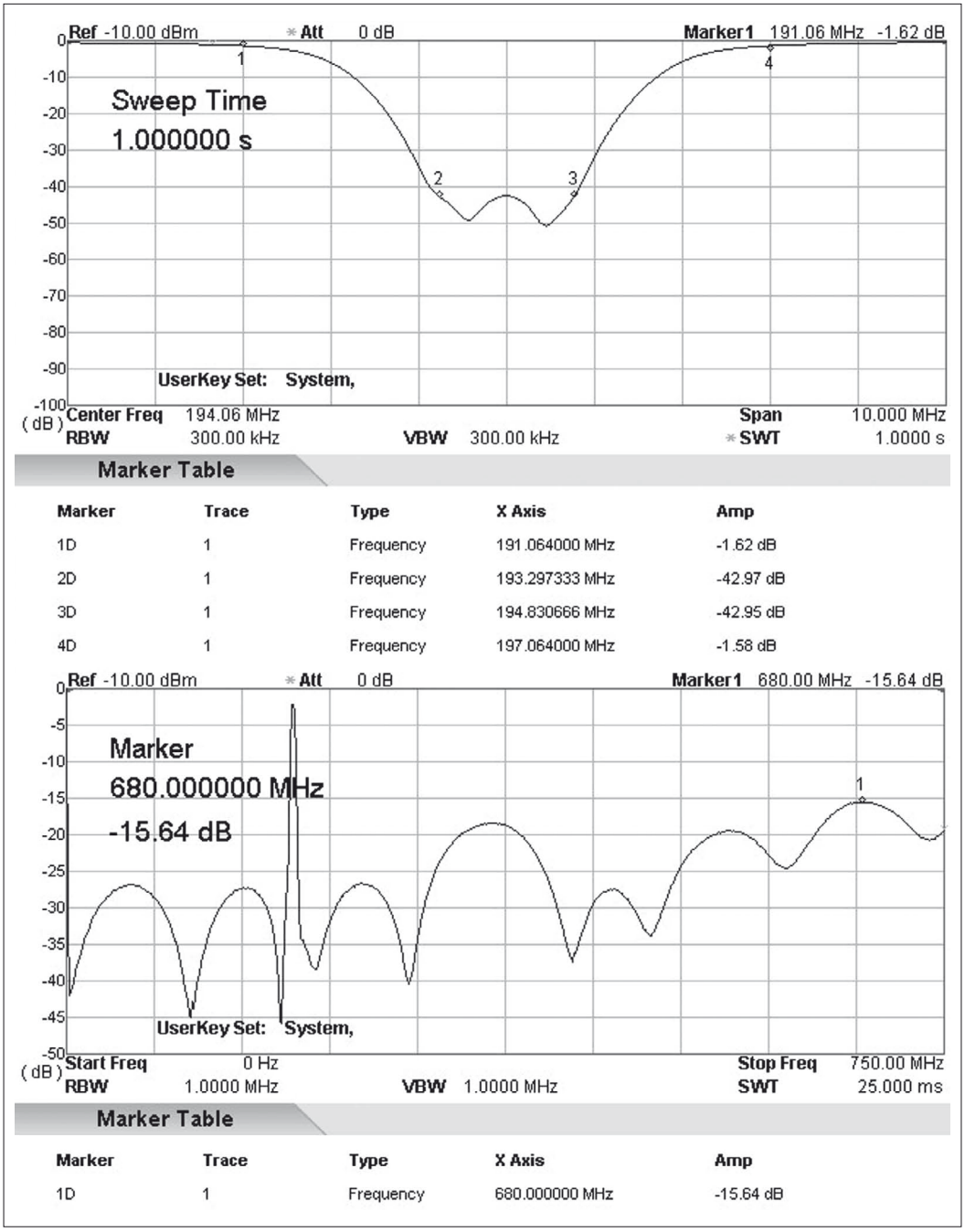


Bild 7: Gemessene Betriebsdämpfung |S21| und Anpassung |S11|

Zusammenfassung

Die Entwicklung von HF-Filtern ist auch dem Nichtspezialisten unter bestimmten Voraussetzungen möglich. Filter mit steilen Flanken stellen dabei eine besondere Herausforderung dar. Am Beispiel einer Bandsperre werden einige Erkenntnisse und Anregungen vorgestellt, die bei der Entwicklung steilflankiger Filter nützlich sein können.

Referenzen

[1] Filter Technologies for 5G Communication Systems, hf-praxis 3/2020

[2] R. J. Cameron, Ch. M. Kudsia, R. R. Mansour: Microwave filters for communication systems. Second Edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley Sons, 2018

[3] Ian C. Hunter: Theory and Design of Microwave Filters. London: The Institution of Engineering and Technology, 2001

[4] Unbehauen, Rolf: Synthese elektrischer Netzwerke. München, Wien: Oldenbourg Verlag, 1984

[5] Anatol I. Zverev: Handbook of filter synthesis. New York: John Wiley Sons, 1967

[6] G. Matthaei, L. Young, and E. M. T. Jones: Microwave Filters, Impedance Matching Networks and Coupling Structures. Norwood, MA: Artech House, 1980

[7] Engeln, Werner: Methoden der Produktentwicklung. München: Oldenbourg Industrieverlag, 2006

[8] Saal, Rudolf; Entenmann, Walter: Handbuch zum Filterentwurf. 2. Aufl. Heidelberg: Hüthig, 1988

[9] G. Macchiarella and S. Tamiazzo: Cooking Microwave Filters: Is Synthesis Still Helpful in Micro-wave Filter Design. In: IEEE Microwave Magazine, vol. 21, no. 3, March 2020

[10] Randall W. Rhea: HF Filter Design and Computer Simulation. Atlanta: Nobel Publishing, 1994 ◄