

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 78 (1987)

Heft: 3

Artikel: Mikrowellenfilter in Hohlleiter- und Koaxialtechnik : Kundenspezifische Berechnung und Realisierung

Autor: Brugger, A. / Kerley, D.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-903813>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 15.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Mikrowellenfilter in Hohlleiter- und Koaxialtechnik: Kundenspezifische Berechnung und Realisierung

A. Brugger und D. Kerley

Mikrowellenfilter mit Chebyshev-Dämpfungsverlauf und deren Anwendungen werden kurz erläutert und die Merkmale kundenspezifischer Produkte, insbesondere des Standardsortiments, beschrieben. Als Beispiel einer Spezialentwicklung wird ein dämpfungsarmes 12-GHz-Kanalfilter vorgestellt.

Les filtres hyperfréquences suivant le modèle de Chebyshev et leurs applications sont brièvement présentés. Les aspects caractéristiques de tels produits à la demande sont décrits, en particulier ceux de l'assortiment standard. Un filtre à très faibles pertes dans la bande des 12 GHz est montré comme exemple de réalisations particulières.

Adresse der Autoren

A. Brugger und D. Kerley, Bereich HF- und Mikrowellentechnik, Huber + Suhner AG, 9100 Herisau.

1. Einleitung

Der Vertrieb und die Herstellung von Mikrowellenfiltern verlangen andere Methoden, als sie beispielsweise bei breitbandigen Mikrowellenkomponenten (z.B. Dämpfungsgliedern) üblich sind. Bei Huber + Suhner werden die Mikrowellenfilter in zwei Kategorien eingeteilt, in das sogenannte Standardsortiment und in Speziallösungen:

Ins *Standardsortiment* fallen alle Filter, welche von der Anfrage bis zur Bestellung und Auslieferung einen hohen Grad an rechnergesteuerten Abläufen und rechnererstellten Dokumentationen erlauben.

Ins *Spezialitätensortiment* fallen die Filter, welche in Hinsicht auf ihre technischen Daten oder ihren Aufbau spezielle Lösungen verlangen.

Im folgenden werden Beispiele beider Filterkategorien vorgestellt und besprochen, wobei jeweils zwei Ausführungsformen in Frage kommen, die Koaxial- und die Hohlleiterstrukturen.

2. Filterfunktion und Anwendungen

Die Funktionen eines Filters im Hochfrequenz- und Mikrowellenbereich lassen sich folgendermassen zusammenfassen:

- Unerwünschte Signale müssen *unterdrückt* oder gewünschte Frequenzen oder Frequenzbänder *sortiert* werden.
- Das Rauschspektrum muss zur Erhöhung der Übertragungsqualität oder Messgenauigkeit *eingegrenzt* werden.
- Übertragungskanäle müssen bei unterschiedlichen Frequenzen voneinander *getrennt* oder *zusammengeführt* werden.

Diese Funktionen entsprechen einem sehr breiten Spektrum von Anwendungen, zum Beispiel:

1. in der HF- und Mikrowellenübertragungstechnik:
 - Mess- und Prüfinstrumente,
 - drahtgebundene Systeme,
 - Funkanlagen,
 - Satellitenkommunikation.
2. in der Wehrtechnik:
 - Radar,
 - Landungs- und Navigationssysteme,
 - Lenkwaffensysteme,
 - Raketen.

3. Spezifische Anforderungen

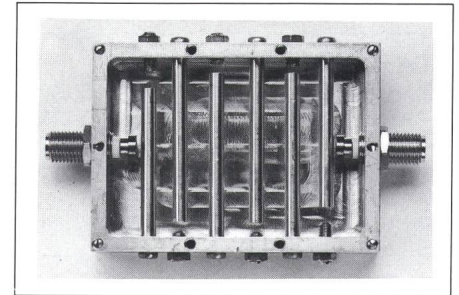
Im Gegensatz zu breitbandigen Komponenten, deren Anforderungen sich weitgehend auf MIL-Normen stützen, werden die Spezifikationen bei Mikrowellenfiltern vom Anwender selber definiert. Massgebend sind seine Systemanforderungen, firmeninterne, nationale und internationale Normen sowie Termin- und Preisvorstellungen.

Das Ziel von *Huber + Suhner* ist, kleinere Stückzahlen kundenspezifischer Filter innert 4 Wochen ausliefern zu können (Standardsortiment). Um das zu erreichen, muss bereits während der Entwicklungsphase eines neuen Standardsortiments ein hoher Aufwand für die Rationalisierung getrieben werden. Da den verschiedenen Filteranwendungen sehr unterschiedliche Spezifikationen zugrunde liegen, müssen diese durch eine Vielfalt von Lösungen berücksichtigt werden.

Bei den folgenden Ausführungen stehen Chebyshev-Filterapproximationen im Frequenzbereich von 300 MHz bis 40 GHz im Vordergrund. Mi-

5. Vom Ersatzschaltbild zur Mikrowellenschaltung

Die Figur 2 zeigt die koaxiale Ausführung eines Chebyshev-Filters, das mittels gekoppelten, $\lambda/4$ -langen TEM-Leitungsstücken realisiert wurde. Diese sind, wie in Figur 2 gezeigt, in der sog. interdigitalen Form angeordnet.



Figur 2 Koaxiales Chebyshev-Filter
Interdigitalform

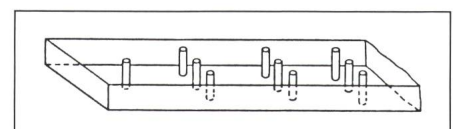
Vom (mathematischen) Tiefpassprototypen (Fig. 1a) ausgehend, werden aus den entsprechenden g -Werten die Kopplungskoeffizienten

$$k_{i,i+1} = \frac{\omega}{\sqrt{g_i g_{i+1}}} \quad i = 1, \dots, n$$

bestimmt, und aus diesen die Resonatorabstände berechnet.

Dann werden die Ein- und Ausgangskopplungen ermittelt und mit Hilfe von kapazitiven Proben realisiert.

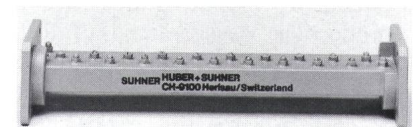
In ähnlicher Weise wird die Hohlleiterstruktur der Figur 3 berechnet,



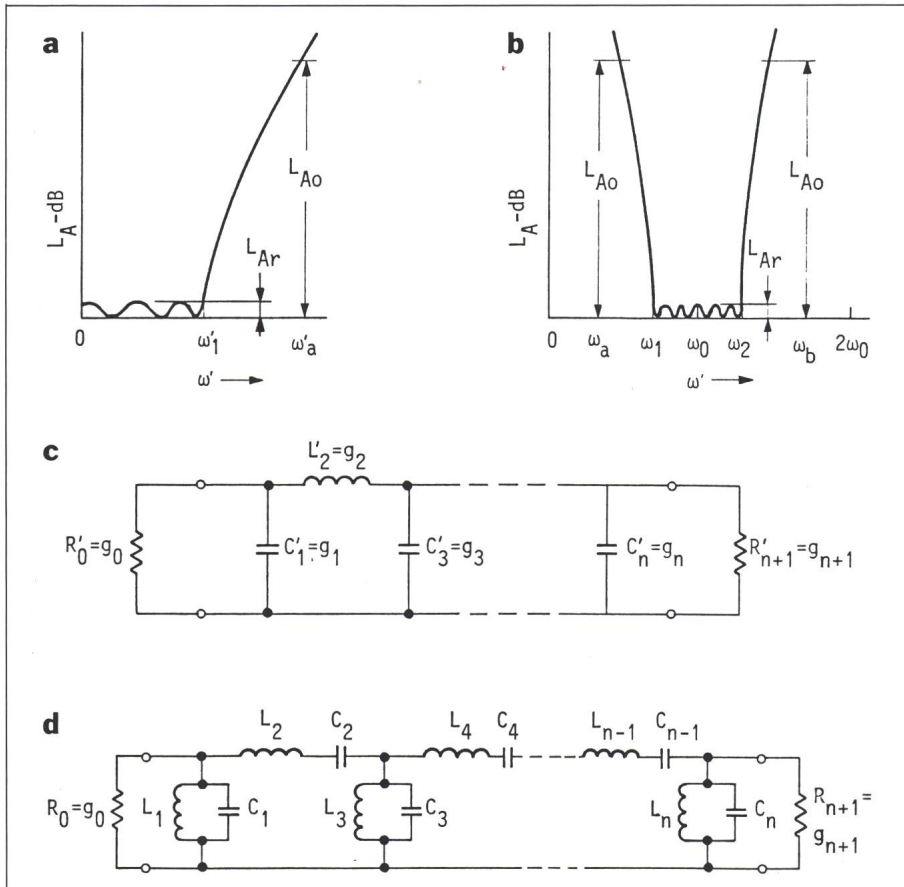
Figur 3 Hohlleiter-Chebyshev-Filter

wobei die Resonatorabmessungen ungefähr der halben Hohlleiterwellenlänge entsprechen. Die (induktive) Kopplung wird mit Hilfe einer Anordnung von zylindrischen Stäben realisiert. Ihre Position und Anzahl ergibt sich wiederum aus den Kopplungskoeffizienten $k_{i,i+1}$.

Ein Beispiel eines Hohlleiterfilters, das aus 10 Kreisen besteht, zeigt die Figur 4.



Figur 4 Beispiel eines Hohlleiterfilters
Mittenfrequenz 12 GHz
Bandbreite 300 MHz



Figur 1 Chebyshev-Filter

- L_A Dämpfung
- L_{Ar} Rippel im Durchlassbereich
- L_{Ao} Sperrdämpfung
- a Frequenzgang eines Chebyshev-Tiefpasses
- b Frequenzgang eines Chebyshev-Bandpasses
- c Ersatzschaltbild eines Chebyshev-Tiefpasses
- d Ersatzschaltbild eines Chebyshev-Bandpasses

krowellenfilter sind, im Gegensatz zu NF-Filtern, die aus konzentrierten Bauelementen bestehen, aus Leitungselementen gleicher Länge aufgebaut.

4. Berechnung von Chebyshev-Filtern

Es gibt zahlreiche Modelle, welche die Dämpfung als Funktion der Frequenz beschreiben. Im Bereich der Mikrowellenfilter ist das Chebyshev-Modell am weitesten verbreitet. Ausgangspunkt für die Berechnung ist der Tiefpassprototyp (Fig. 1a), aus dem man mit Hilfe einer Variablentransformation (1) auch Bandpassfilter (Fig. 1b) gewinnen kann.

$$\frac{\omega'}{\omega_1'} = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \quad (1a)$$

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\sqrt{\omega_1 \omega_2}} \quad (1b)$$

Der theoretische Dämpfungsverlauf eines Chebyshev-Tiefpassfilters lautet:

$$\text{für } \omega' < \omega_1' \quad (2)$$

$$L_A(\omega') = 10 \log \left[1 + (10^{0,1 L_{Ar}-1}) \cos^2 \left[n \cos^{-1} \left(\frac{\omega_1'}{\omega_1} \right) \right] \right]$$

$$\text{und für } \omega' > \omega_1' \quad (3)$$

$$L_A(\omega') = 10 \log \left[1 + (10^{0,1 L_{Ar}-1}) \cosh^2 \left[n \cosh^{-1} \left(\frac{\omega'}{\omega_1'} \right) \right] \right]$$

wobei L_{Ar} den Rippel im Durchlassbereich und n die Anzahl Kreise bezeichnet.

In der Figur 1c ist das Ersatzschaltbild des Chebyshev-Tiefpasses, in Figur 1d ein aus 1c transformierter Bandpass dargestellt. Die Werte der Schaltelemente können aus den in der Literatur [1] angegebenen g -Werten (normierter Chebyshev-Tiefpass) bestimmt werden.

6. Vorgehen bei Anfragen und Bestellungen

6.1 Standardsortiment

Die Grenzen des Standardsortiments, das unter anderem die vorstehend erwähnten Filterarten umfasst, sind in Tabelle I angegeben.

Filterparameter	Koaxiale Interdigital-Filter	Hohlleiter-Filter
Frequenzbereich [GHz]	0,3...10	3...40
Anzahl Kreise	2...16	3...18
Relative Bandbreite [%]	1...25	0,2...20
Anpassung RL [dB]	< 23	< 26

Tabelle I Grenzen des Standardsortiments

Um einen Überblick über die verwendeten Hilfsmittel zu geben, wird im folgenden der vereinfachte Ablauf einer Filterentwicklung von der Anfrage bis zur Auslieferung beschrieben:

1. Ausgehend von einer vollständigen Filterspezifikation wird mit Rechnerhilfe ein theoretischer Filterverlauf berechnet und damit die benötigte Anzahl Kreise bestimmt. Der Ausdruck liefert die wichtigsten Daten, wie Einfügungsdämpfung und Dämpfung im Sperrbereich.
2. Nach der Wahl einer Technik (Hohlleiter oder Koaxialstruktur) wird die vollständige Filterdimensionierung durchgeführt sowie eine Offerte erstellt. Dokumentation und Offerte werden auf dem gleichen Rechner bearbeitet. Bei diesem Schritt kann bereits eine Optimierung (elektrische Eigenschaften, Dimensionen) sowie eine Analyse des Filterverlaufes mit reellen Güteangaben vorgenommen werden.
3. Nach der Bestellung werden mit Hilfe geeigneter Software die Herstellungsunterlagen erstellt, darunter die Werkstattzeichnung für die auftragspezifischen Teile (Gehäuse oder Hohlleiterlötteil).
4. Nach der Herstellung der Einzelteile werden die Filter entsprechend der Spezifikation zusammengebaut (geschraubt, gelötet), abgestimmt und geprüft. Jedes Filter wird mit modernen Messgeräten auf Reflexions- und Transmissionseigenschaften geprüft, auf Kundenwunsch werden die Messresultate protokolliert.

Folgende Randbedingungen müssen für eine rationelle Entwicklung

von Standardfiltern erfüllt sein:

- Die Berechnungsgrundlagen müssen auf einen ausgedehnten Frequenz- und Bandbreitebereich anwendbar sein.
- Eine leistungsfähige Synthese- und Analysesoftware muss vorhanden sein.
- Es müssen weitgehend Standardteile verwendet werden können.
- Die Dokumentation (Zeichnungen, Fabrikationsunterlagen, Prüfunterlagen) muss rationell zu erstellen sein.

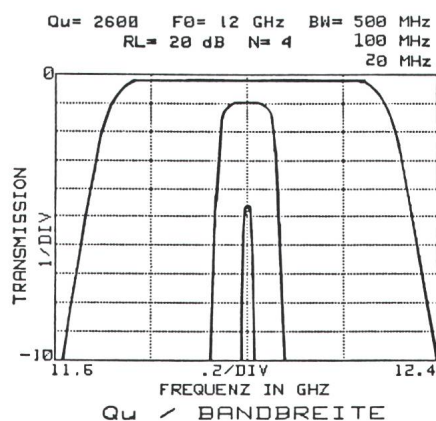
6.2 Spezialfilter

6.2.1 Beispiel: Dämpfungsarme Kanalfilter

Wie bereits erwähnt, genügen die vorstehend aufgeführten Filter nicht jeder Anwenderanforderung. Nun ist man aber in der Lage, die Filterkenntnisse auch für Speziallösungen einzusetzen. Ein Beispiel dafür ist die Entwicklung eines besonders dämpfungsarmen Filters.

Moderne Telekommunikationssysteme verlangen ständig grössere Übertragungskapazitäten und nutzen deshalb vermehrt auch höhere Frequenzen. Dadurch wächst die Nachfrage nach schmalbandigen Filtern mit niedriger Durchgangsdämpfung (z.B. nach Kanalfiltern). Die Figur 5 zeigt die Dämpfungszunahme eines Hohlleiter-Bandpassfilters in Abhängigkeit von der Bandbreite bei konstanter Mittenfrequenz und Güte.

Die Güte eines Filters (unloaded Q) bildet ein indirektes Mass für die Dämpfung; sie ist abhängig vom Ausbreitungsmodus sowie von den verwendeten Materialien und Oberflächen (elektrische Leitfähigkeit).



Figur 5 Dämpfungszunahme durch Verkleinerung der Bandbreite

Bei konstanter Mittenfrequenz und Güte nimmt Filterdämpfung (Transmission Loss) mit kleinerer Bandbreite zu.

Hohlleiter	TE-Modus	Resonatorvolumen [mm ³]	Q unbelastet
Rechteckig (WR 75)	101	2,9×10 ³	2600
	102	6,0×10 ³	3150
Rund	111	5,3×10 ³	4000
	113	50 ×10 ³	7200
	011	18,5×10 ³	8000

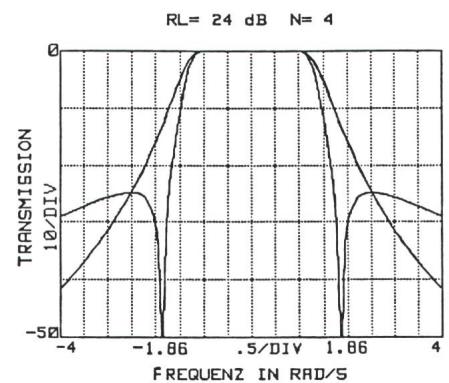
Tabelle II Erreichbare Güten (Q) für 12-GHz-Messing-Resonatoren

Die Tabelle II zeigt die erreichbaren Q-Werte bei Verwendung verschiedener Hohlleiter-Resonatoren aus Messing. Daraus ist ersichtlich, dass der TE₀₁₁-Modus eine erhebliche Güteerhöhung mit noch vertretbaren Dimensionen bringt. So weist z.B. ein vierkreisiges Filter in Standard-Hohlleitertechnik (TE₁₀₁) bei 12 GHz Mittenfrequenz und einer Bandbreite von 10 MHz eine Mittenbanddämpfung von 9 dB auf, verglichen mit 3 dB für die TE₀₁₁-Ausführung, vorausgesetzt, dass beide aus Messing realisiert werden.

6.2.2 Berechnung

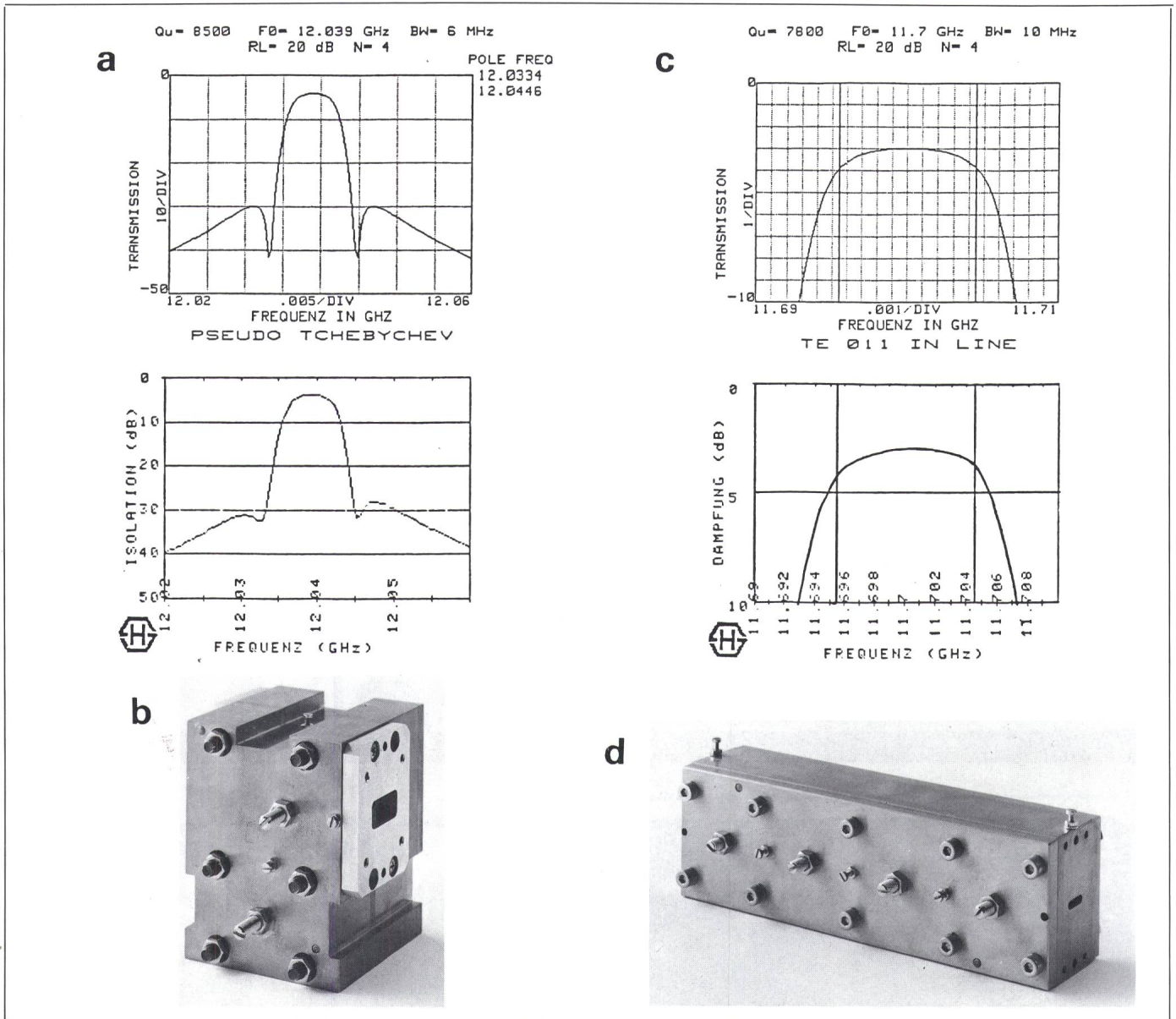
Ein geforderter Filterverlauf wird realisiert, indem wie bei den Standardtypen die Werte der Kopplungen zwischen Resonatoren für eine Chebyshev-Approximation aus [1] ermittelt werden. Bei einem komplexeren Pseudo-Chebyshev- oder Cauer-Verlauf findet man solche Tabellen z.B. in [2], wobei in den meisten Fällen eine Optimierung mittels Rechnerprogrammen vorgenommen werden muss (z.B. das käufliche S-FILSYN oder selber erstellte Programme).

Die gewünschte Filterfunktion gewinnt man, indem man z.B. von einem



Figur 6 Berechnete Chebyshev- und Pseudo-Chebyshev-Verläufe

Anzahl Kreise 4
Anpassung (RL) 24 dB



Figur 7 Beispiele realisierter Spezialfilter

- a Pseudo-Chebyshev-Filter
Mittenfrequenz 12,039 GHz
Bandbreite 6 MHz
Anpassung (RL) 20 dB
- b Photo zu a
- c Chebyshev-Approximation
Mittenfrequenz 11,7 GHz
Bandbreite 10 MHz
Anpassung (RL) 20 dB
- d Photo zu c

Chebyshev-Polynom ausgeht und die Lage und Anzahl der Pole so lange verändert, bis der Filter-Dämpfungsverlauf den gegebenen Spezifikationen entspricht [3].

Die Figur 6 zeigt den Dämpfungsverlauf eines vierkreisigen Pseudo-Chebyshev- und eines Chebyshev-Filters. Die höhere Steilheit des Pseudo-Chebyshev-Verlaufes wird durch die entsprechende Einfügung von Übertragungspolen erreicht.

6.2.3 Realisierung

Beide Filter, Pseudo-Chebyshev und Chebyshev-Approximation, wurden realisiert. Die Figur 7b zeigt eine

sogenannte gefaltete Ausführung eines Pseudo-Chebyshev-Filters mit negativer Rückkopplung. Den berechneten und gemessenen Dämpfungsverlauf zeigt die Figur 7a. Die sogenannte gerade Ausführung einer Chebyshev-Approximation und deren Verläufe sind in den Figuren 7d und 7c dargestellt.

7. Schlussbemerkung

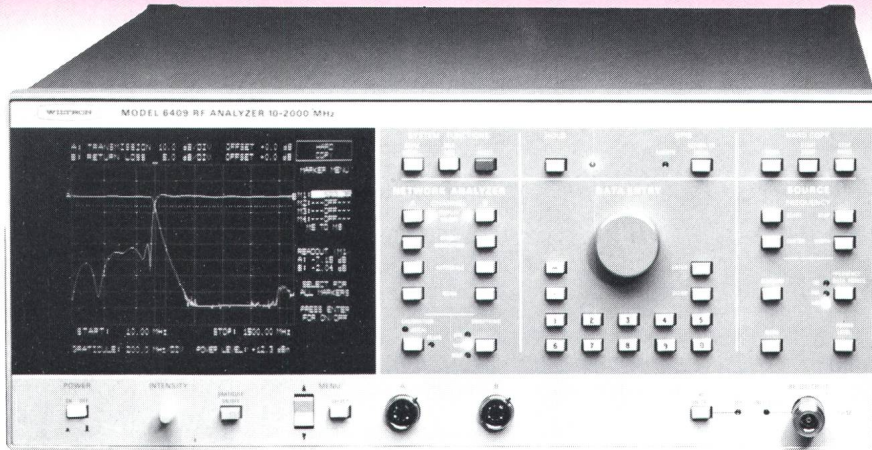
In diesem Beitrag wurde gezeigt, wie flexibel man auf Kundenwünsche reagieren kann. Begriffe wie Qualitätssicherung und Anwenderinformation kamen kaum zur Sprache, obwohl ihnen grosse Bedeutung zukommt.

Diese Aspekte werden normalerweise bereits in der Definitionsphase zusammen mit dem Anwender festgelegt. Es ist die Aufgabe des Filterherstellers, die notwendigen Informationen zusammenzutragen, um möglichst optimale Lösungen zu finden.

Literatur

- [1] G.L. Mathei, L. Young and E.M.T. Jones: Microwave filters impedance-matching networks and coupling structures. New York, McGraw-Hill, 1986.
- [2] R. Saal: Der Entwurf von Filtern mit Hilfe des Kataloges normierter Tiefpässe. Frequenz 15(1961)4, S. 111...121.
- [3] A.E. Atia, A.E. Williams and R.W. Newcomb: Narrow-band multiple-coupled cavity synthesis. IEEE Trans. CAS 21(1974)9, p. 649...655.

HF+MICROWAVE



Netzwerk-Analyzer 1-2000 MHz von WILTRON

Merkmale:

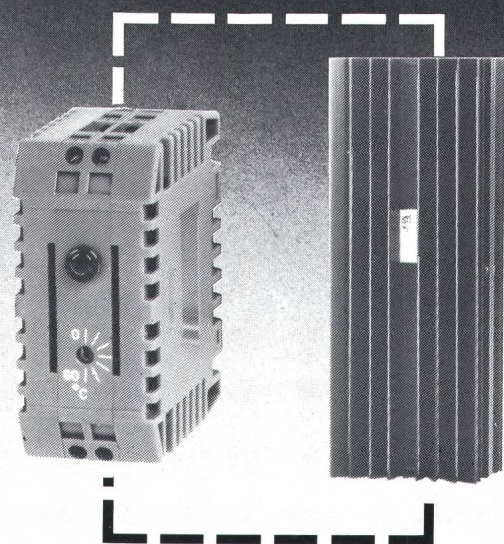
- 50/75 Ohm
- 76 dB Dynamikbereich
- IEEE-488 Schnittstelle
- Centronics Matrixdrucker-Anschluss
- Kompaktes Gerät
- 16 kg Gewicht

Postfach 45, Bülhstrasse 1, CH-8125 Zollikerberg, Telefon 01/391 59 01, Fax 01/391 56 33, Tx 816906

AMOTEC

Amotec Electronic AG

Die Kombination zur Verhinderung von Kondenswasser



Speziell geeignet für optimales Klima in Schaltschränken, Kabinen oder Stationen.

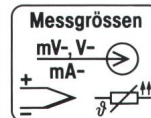
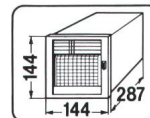
Der Feuchtesensor im HYGROTHERM erfasst den Taupunkt. Kombiniert mit einem Heizgerät verhindert er somit die Bildung von Kondenswasser. Mit dem ebenfalls eingebauten Temperaturregler kann gleichzeitig die gewünschte Lufttemperatur erreicht werden.

ELTAVO Walter Bisang AG

Elektro- und Industrieprodukte
CH-8222 Beringen/Schaffhausen
Telefon 053 7 26 66, Telex 89 60 85 elta

Neuer 6-Kanal-Punktplotter POINTAX 7P2

Mit Mikroprozessor

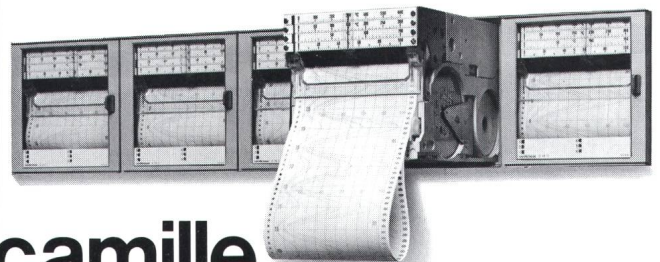


- 1 bis 6 Messkanäle
- 1 bis 6 verschiedene Messgrößen und -bereiche
- AC/DC-Hilfsenergie durch Allstrom-Netzteil
- Preis-Leistungsgerecht
- Einfache Handhabung

INTERKAMA86



Besuchen Sie uns!
Halle: 7
Stand: 7 B 17
Düsseldorf,
6.-11. 10. 1986

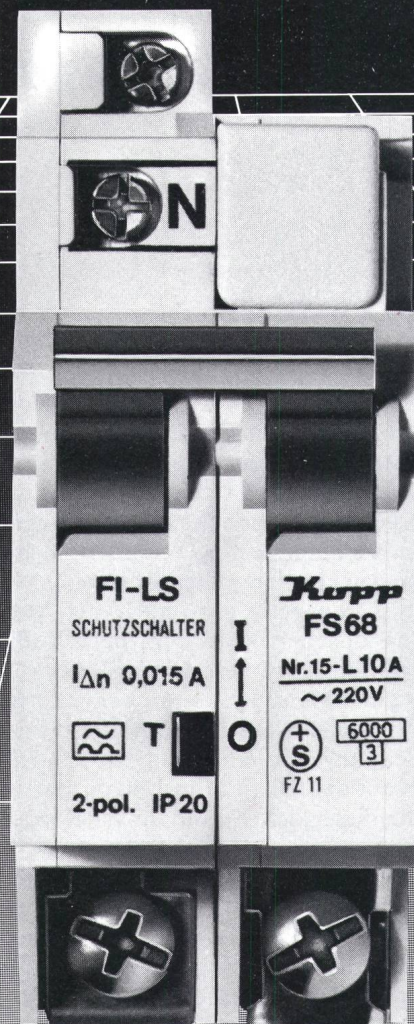


camille bauer

Camille Bauer AG
CH-5610 Wohlen
Telefon 057 21 21 11



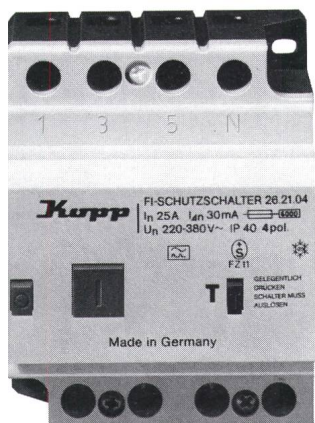
Kopp FI/LS. Der Champion im Platz sparen!



FI/LS Kombination L 10 A, 1 PN, 15 mA,
35 mm Einbaubreite inkl. Leitungsschutzschalter.
Eingangsklemme für Leiter 1–16 mm²
auch gleichzeitig für Sammelschiene.

35 mm

SEV 3



Weitere Kopp FI-Schutzschalter:

- FI-Schutzschalter, 4-polig, 25 A
3 PN, 15 mA
- FI-Schutzschalter, 4-polig, 25 A
3 PN, 30 mA
- FI-Schutzschalter, 4-polig, 40 A
3 PN, 30 mA

Kopp

Praktiker ziehen sie vor.

Das interessiert mich

- Prospekt/Preisliste FI-Schutzschalter
 Ihr Anruf Ihr Besuch

Name: _____

Strasse, Nr.: _____

PLZ, Ort: _____



Einsenden an:
Julius Fischer AG, Postfach
8021 Zürich, Tel. 01 42 31 13