

Bernd Neubig, DK 1 AG

Optimale ZF-Selektion für Kohärent-Telegrafie (CCW)

Dieser Artikel soll einen weiteren Beitrag zu dem in Heft 2 und 3/1981 der UKW-BERICHTE aufgegriffenen Thema Kohärent-CW leisten.

Die Kohärent-Telegrafie erlaubt eine einzigartige Reduzierung sowohl der Sendeleistung als auch der Empfangsbandbreite. Die Hauptselektion im Empfänger (Bandbreite kleiner als 10 Hz) ist mit vertretbarem Aufwand nur auf der NF-Ebene (Digitalfilter) möglich. Wie hinlänglich bekannt, ist diese extrem schmale NF-Bandbreite ohne ausreichende Vorselektion in den HF- und ZF-Stufen nur begrenzt nutzbar, da die unerwünschten Signale alle Stufen bis zum NF-Filter durchlaufen und durch Zustopfen, Intermodulation und Herunterregeln der AGC den Empfang des erwünschten Signals erschweren können.

In diesem Artikel soll zunächst dargestellt werden, wodurch die minimale Bandbreite eines ZF-Quarzfilters für Telegrafie, insbesondere CCW, bestimmt wird. Anschließend werden verschiedene Filtercharakteristiken bezüglich ihrer Eignung verglichen. Im 2. Teil wird dann ein praktisch erprobter Vorschlag für den Selbstbau vorgestellt werden.

1. BEGRENZUNG DER MINDESTBANDBREITE DURCH QUARZEIGENSCHAFTEN

Zwei wesentliche Quarzparameter bestimmen die kleinstmögliche Relativbandbreite eines Quarzfilters: die Quarzgüte und der Temperaturgang der Quarzfrequenz.

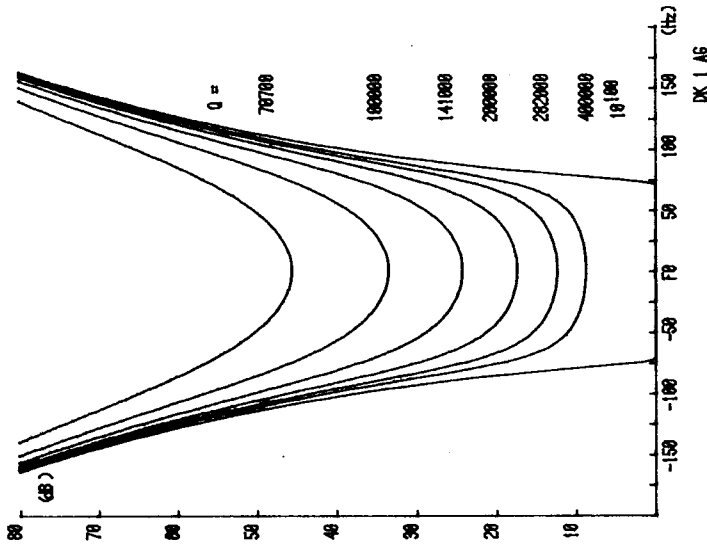
Eine ungenügend hohe Quarzgüte verursacht eine starke Verrundung der Durchlaßkurve und Verflachung der Flanken sowie ein Ansteigen der Grunddämpfung des Filters (Bild 1).

Als Faustregel gilt, daß die Quarzgüte Q_q mindestens das 5 bis 10fache des Kehrwerts der Relativ-Bandbreite b_3/f_0 beträgt:

$$Q_q \cong 5 \dots 10 \times \frac{f_0}{b_3}$$

Bei einer Mittenfrequenz von 9 MHz haben gute Filterquarze Güten von ca. 120 000 bis 150 000, das entspricht einer Mindestbandbreite von 300 bis 600 Hz. Mit speziellem Quarzdesign (z.B. Obertonquarzen) kann man die Güte auf 500 000 und mehr steigern, womit noch schmalere Filter möglich sind.

Bild 1:
Filterkurven in Abhängigkeit
von der Güte Q der
verwendeten Quarze



Der Temperaturgang üblicher Filterquarze beträgt beispielsweise im Temperaturbereich von 0°C bis 50°C ± 5 bis ± 10 ppm; bei 9 MHz sind das ± 45 bis ± 90 Hz, um die die Quarze unter Umständen auch gegeneinander »weglaufen« (1). Für sehr schmale Quarzfilter muß der Temperaturgang der Quarze deshalb bis an die physikalische Grenze getrieben werden, diese liegt in unserem Beispiel bei $\pm 1,0$ bis $1,5$ ppm (9 bis 15 Hz). Für noch höhere Anforderungen werden solche Filter sogar in einzelnen Thermostaten gesetzt.

Eine Alternative wäre die Wahl einer weiteren, niederfrequenten Zwischenfrequenz unter 1 MHz. Quarze in diesem Bereich haben zwar eine etwas niedrigere Güte, dafür ist für eine bestimmte Bandbreite die Relativbandbreite kleiner und damit die Anforderungen an die Quarze geringer. Allerdings sind gute Quarze

in diesem Frequenzbereich nicht gerade billig und außerdem um einiges größer. Der Hauptnachteil ist aber die weitere Umsetzung, wodurch die vorangehenden Stufen wiederum dem vollen Signalspektrum des breiten Vorfilters ausgesetzt sind.

2. BEGRENZUNG DER MINDESTBANDBREITE DURCH DAS IMPULSVERHALTEN

Jedem Telegrafisten ist bekannt, daß schmalbandige Filter im allgemeinen bei höheren Telegrafiergeschwindigkeiten »klingeln«, das heißt das sendeseitig »saubere« CW-Signal wird verformt: ansteigende und abfallende Flanke werden flacher, es tritt Überschwängen auf.

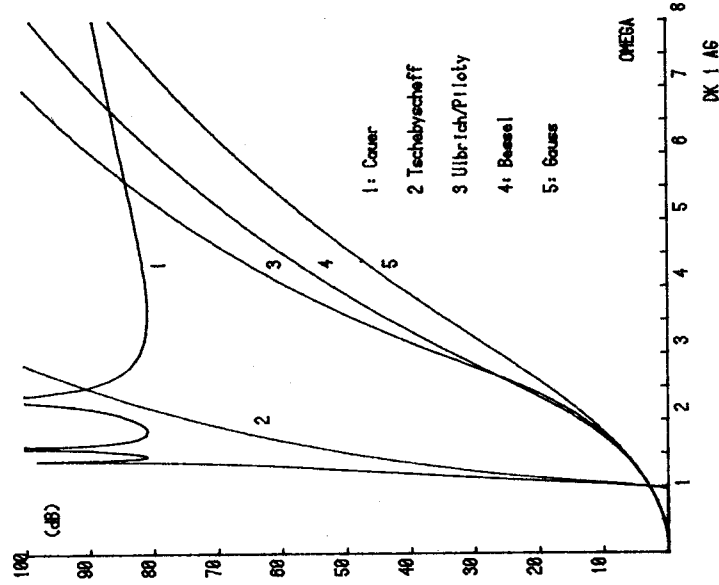


Bild 2:
Vergleich der Dämpfungskurven von 5 gebräuchlichsten Filtercharakteristiken

Das Frequenzspektrum eines periodisch getragenen HF-Trägers besitzt neben der Trägerfrequenz noch eine Vielzahl von Linien im Abstand von Vielfachen der Tasterfrequenz. Bei Telegrafzeichen wird aus den Linien ein fast-kontinuierliches Spektrum. Ist nun die sogenannte Gruppenlaufzeit, das heißt die Laufzeit, die die Hüllkurve des CW-Signals vom Filtereingang zum Ausgang benötigt, nicht für alle Spektralanteile gleich, dann kommen diese Anteile zu unterschiedlichen Zeiten am Ausgang an. Dort wieder zusammengesetzt, ergeben sie eine verzerrte Signalform.

Bei den gebräuchlichsten Filtern ist die Gruppenlaufzeit in der Mitte des Durchlaßbereichs am kleinsten und steigt zum Rande des Durchlaßbereichs hin auf das Vielfache an (siehe Abschnitt 3). Je schmaler das Filter ist, desto stärker wirken sich diese Gruppenlaufzeitverzerrungen aus, da sie die Spektralkompo-

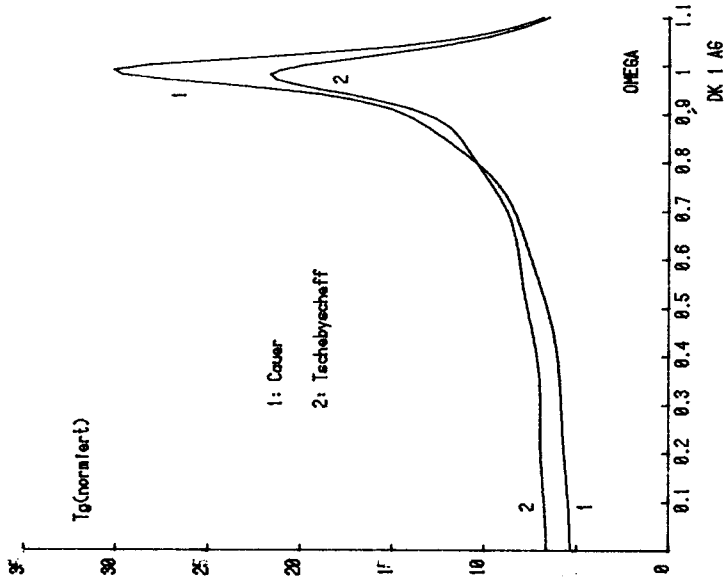
nenten niedriger Ordnung, welche die Signalform am stärksten prägen, verzerren.

3. IMPULSVERHALTEN UND SELEKTIVITÄT VERSCHIEDENER FILTER-TYPEN

Ein ideales Telegraffilter wäre ein Filter mit einer möglichst konstanten Gruppenlaufzeit im gesamten Durchlaßbereich (2) und einem möglichst schmalen und steilflankigen Dämpfungsverlauf.

Doch leider sind beide Forderungen nicht miteinander zu vereinbaren: ein Filter mit gutem Impulsverhalten hat eine schlechte Selektion, ein steiles Filter ein schlechtes Impulsverhalten; beide Eigenschaften sind mathematisch miteinander verknüpft und jede praktische Lösung ist ein Kompromiß zwischen beiden Forderungen.

Bild 3a:
Gruppenlaufzeit von
Cauer- und Tschebyscheff-
Filter



Anhand verschiedener gebräuchlicher Filtercharakteristiken sei dies im folgenden diskutiert. Bei den Zahlenbeispielen wird ein 8 poliges Filter mit 150 Hz Bandbreite angenommen. Die zugehörigen Dämpfungskurven zeigt **Bild 2**, die **Bilder 3a und 3b** zeigen die Gruppenlaufzeit im Durchlaßbereich und **Bild 4** die Sprungantwort dieser Filter.

Alle Kurven sind in einer normierten Form dargestellt. Bei der Frequenzachse entspricht $\Omega = 0$ der Mittenfrequenz, $\Omega = \pm 1$ den 3-dB-Punkten des Filters, die Achse ist also in Vielfachen der halben 3-dB-Bandbreite skaliert.

Die Gruppenlaufzeit τ_g ist ebenfalls normiert als T_g angegeben; man erhält die Gruppenlaufzeit τ_g (in sec) für ein bestimmtes Filter der 3-dB-Bandbreite b_3 (in Hz) aus der Formel:

$$\tau_g = \frac{T_g}{\pi \cdot b_3}$$

Die Sprungantwort ist die Form des Ausgangssignals (das heißt die demodulierte Hüllkurve), die sich ergibt, wenn am Eingang der Träger f_0 mit der Amplitude »1« plötzlich (»ideal rechteckig«) eingeschaltet wird.

Die Zeitachse ist ebenfalls in normierten Einheiten T angegeben und kann durch

$$T = \frac{T}{\pi \cdot b_3}$$

in Sekunden umgerechnet werden.

Die **Tabelle 1** zeigt eine Zusammenstellung der wichtigsten Daten. Die ersten vier Zeilen geben die Sperrbandbreite in Ω -Einheiten an (shape-Faktor). Die darauffolgenden Zeilen enthalten die wichtigsten Daten über die (normierte) Gruppenlaufzeit: den Wert in Filtermitte T_{go} , den Maximalwert, den Wert bei den 3-dB-Punkten und den Punkt, bei dem die GLZ um 10 % gegenüber T_{go} abgefallen ist.

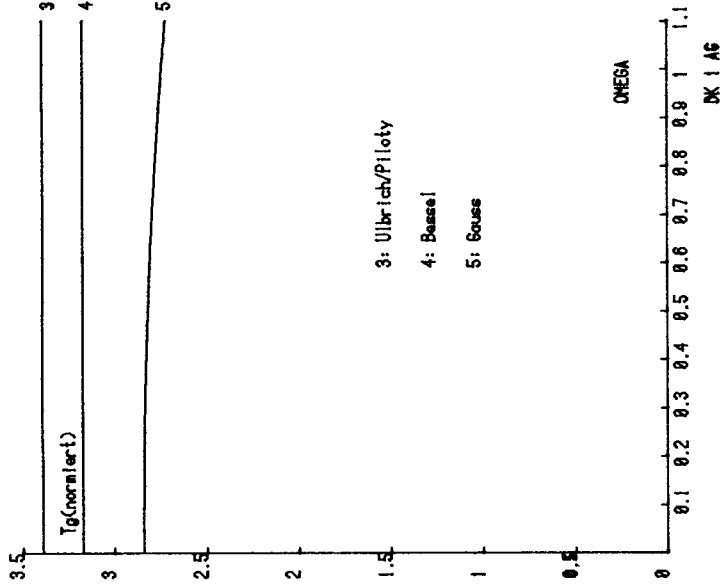
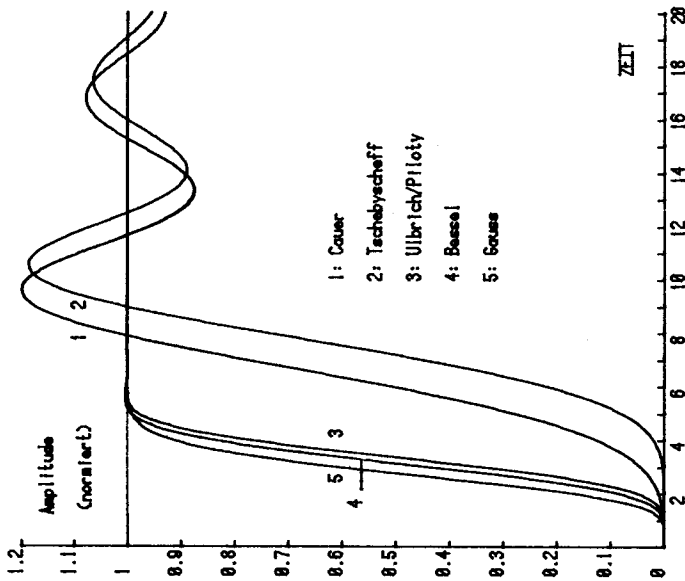


Bild 3b:
Gruppenlaufzeit von
Ulbrich/Piloty-,
Bessel- und Gauss-
Filter

Tabelle 1: Selektion, Gruppenlaufzeit und Impulsverhalten verschiedener Filtercharakteristiken

Filtertyp	Cauer C 0815b-45°	Tschebyscheff C 0815b-T	Gauß 8 Pol	Bessel 8 Pol	Ulbrich/Piloty d = 0,01 / 8 Pol
Eigenschaften					
Selektion:					
Ω (20 dB)	1,085	1,136	2,60	2,35	2,40
Ω (40 dB)	1,201	1,362	3,90	3,34	3,17
Ω (60 dB)	1,314	1,700	5,38	4,53	4,07
Ω (80 dB)	1,380	1,884	7,28	6,08	5,30
Gruppenlaufzeit:					
T_{go} ($\Omega = 0$)	5,359	6,630	2,842	3,174	3,389
T_{max}	30,117	21,600	—	—	—
$T_{g,3dB}$ ($\Omega = 1$)	28,185	19,737	2,741	3,174	3,394
für 10 % Abfall	—	—	1,63	2,07	2,51
Sprungantwort:					
Überschwingen	19,82 %	18,49 %	0	0,45 %	0,44 %
T (50 %)	5,9	7,1	2,67	3,04	3,26
T (90 %)	7,4	8,5	3,83	4,16	4,36

Bild 4:
Vergleich der Sprung-
Antworten der
erwähnten 5 Filtertypen



Die untersten Zeilen beschreiben die Sprungantwort: das Überspringen in % und die (normierten) Zeiten, nach denen 50 % und 90 % der Endamplitude »1« erreicht sind.

3.1. Tschebyscheff-Filter

Dies ist die am häufigsten verwendete Filtercharakteristik. Auch die marktüblichen Telegraf-Filter sind von diesem Typ. Tschebyscheff-Filter haben eine sehr gute Selektion mit steilen Flanken, indem im »flat-top« des Durchlaßbereichs eine geringe (theoretische!) Welligkeit zugelassen wird, in unserem Beispiel 0,0988 dB ($\leq 15\%$ Reflexion). Die tatsächliche, durch Bauelemente- und Abgleichtoleranzen verursachte Welligkeit ist im allgemeinen viel größer.

Im Sperrbereich steigt die Dämpfung monoton an. Im angegebenen Fall beträgt der Shapefaktor (60 dB : 3 dB) = 1,70 (60-dB-Bandbreite

3.2. Cauer-Filter

Um die Flankensteilheit noch weiter zu erhöhen, werden bei Cauer-Filtern (»elliptischen Filtern«) noch zusätzliche Dämpfungspole im Sperrbereich erzeugt. In dem Beispiel wurde die erste Polstelle auf $\Omega = 1,403$ gelegt, die Welligkeit im Durchlaßbereich wurde wie beim Tschebyscheff-Filter gewählt (Filter-Terminologie: C 0815b-45° siehe [5]). Der dadurch erzielte Shape-Faktor beträgt 1,31, das heißt die 60-dB-Bandbreite beträgt nur 328 Hz!

Die Gruppenlaufzeit verläuft ähnlich wie beim Tschebyscheff-Filter, jedoch mit noch stärkerer Überhöhung von 11,3 ms (Bandmitte) auf 63,8 ms am Rand. Das Impulsverhalten ist noch schlechter: zwar erscheint der Impuls etwas schneller (90 % nach 15,7 ms), die Überschwinger sind mit 19,8 % aber stärker und klingen langsamer ab. Die verbesserte Selektion geht auf Kosten des Impulsverhaltens.

3.3. Gauß-Filter

Bei diesem Filtertyp ist die Dämpfungskurve an die bekannte Gaußsche Verteilungskurve (»Glockenkurve«) angenähert – je höher die Polzahl, desto besser. Gauß-Filter haben ein ideales Impulsverhalten mit sehr schneller Sprungantwort (90 % nach 8,13 ms) und ohne Überschwinger. Allerdings ist die Selektion sehr schlecht: 60 dB werden erst bei der 5,38fachen Bandbreite (1345 Hz) erreicht! Die Gruppenlaufzeit sinkt am 3-dB-Punkt nur unwesentlich ab (6).

3.4. Bessel-Filter

Bei Bessel-Filtern (auch Thomson-Filter) ist die Gruppenlaufzeit auf einen maximal flachen Verlauf optimiert (7). In unserem Beispiel beträgt sie 6,73 ms im gesamten Durchlaßbereich. Sie fällt erst bei der 2,07fachen Band-

breite um 10 % ab. Das Impulsverhalten hat nur ein sehr geringes Überspringen von 0,45 %, das sofort wieder abklingt, der Anstieg ist geringfügig langsamer (90 % nach 8,83 ms) als beim Gauß-Filter.

Dafür ist die Selektion besser: Der Shape-Faktor 60 dB : 3 dB ist 4,53 entsprechend einer 60-dB-Breite von 1130 Hz.

3.5. Ulbrich/Piloty-Filter

Dieses auch »Äquiripple-Phasenlinear-Filter« genannte Filter ist eine Erweiterung der Bessel-Filter, indem für die Gruppenlaufzeit (GLZ) eine geringe Welligkeit zugelassen wird (wie bei den Tschebyscheff-Filtern für die Dämpfung). Dadurch ist die GLZ über einen noch weiteren Bereich konstant und die Selektion ist ebenfalls besser (8). In unserem Beispiel (normierte Welligkeit 0,01) beträgt der 60 dB : 3 dB-Shape-Faktor 4,07 (1018 Hz), die Gruppenlaufzeit beträgt 7,20 ms und fällt erst bei der 2,5fachen Bandbreite um 10 % ab.

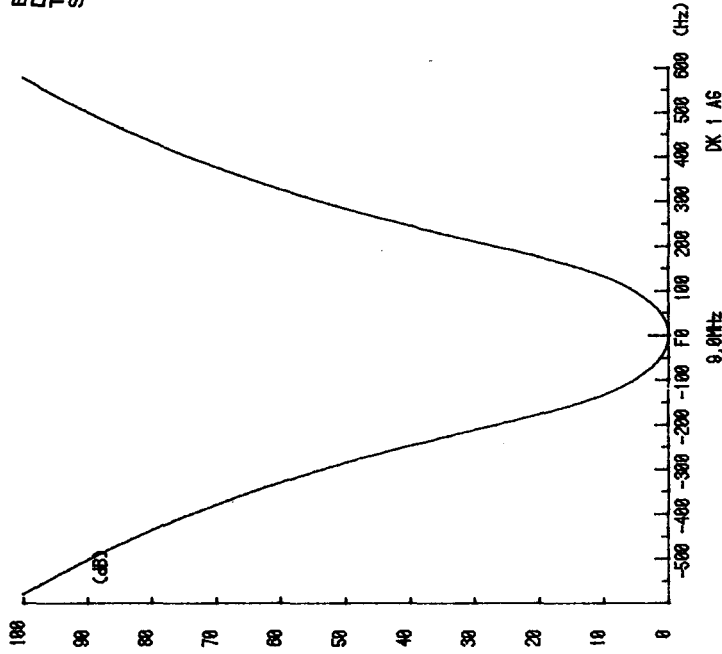
Das Impulsverhalten ist dem der Bessel-Filter sehr ähnlich: Überschwinger 0,44 %, 90 % der Amplitude sind nach 9,25 ms erreicht.

Neben diesen Filtercharakteristiken gibt es noch beliebig viele andere Kompromisse, die zu beschreiben den Rahmen dieses Beitrags sprengen würde. Zusammenfassend kann man sagen, daß die Ursache des »Klingelns« meist nicht eine zu schmale Bandbreite ist, sondern eine nicht optimale Filtercharakteristik.

4. EIGENBAU-VORSCHLAG FÜR EIN CCW-QUARZFILTER

Leider sind Quarzfilter mit gutem Impulsverhalten nicht beziehungsweise nur sehr teuer als Sonderfertigung auf dem Markt zu erhalten. Daher soll hier ein praktisch erprobter Vorschlag gemacht werden, bei dem der Abgleich mit Amateurmitteln möglich ist.

Bild 5a:
Dämpfungsverlauf des in
Teil 2 beschriebenen
Selbstbau-Filters



Die bisher diskutierten 8-Pol-Filter scheiden aus diesem Gesichtspunkt aus. Die Grenzen für den Selbstbau liegen bei einem 4-Pol-Filter. Um dennoch ausreichende Selektion zu erhalten, sollen zwei 4-Pol-Filter des Ulbrich/Piloty-Typs – durch eine zwischengeschaltete größtsignalfesteste Verstärkerstufe entkoppelt – hintereinandergeschaltet werden. Die Verstärkerstufe hat zwei Aufgaben: zum einen soll sie beiden Filtern einen sauberen ohmschen Abschluß anbieten – was nicht der Fall wäre, wenn man sie direkt hintereinander schaltet; zum anderen kann sie die ca. 12 dB Gesamtdämpfung beider Filter ausgleichen.

Mit dieser Anordnung erreicht man fast die gleiche Selektion und ein nur leicht verschlechtertes Impulsverhalten eines 8 poligen Einzelfilters.

Der vorliegende Vorschlag beschreibt ein Filter bei 9 MHz mit einer Bandbreite von 150 Hz bei - 3 dB (über beide Filter gemessen). Für Umrechnungen auf andere Mittenfrequenzen

ist die Kenntnis der dort realisierbaren Quarz-Ersatzdaten (insbesondere dynamische Kapazität C_1 bzw. Induktivität L_1) notwendig (9).

Bild 5 zeigt die theoretische Selektionskurve und die zugehörige Gruppenlaufzeit. Den praktischen Aufbau und die Messung wird F. Krug, DJ 3 RV, durchführen, sobald die speziellen Quarze eintreffen. Eine Baubeschreibung wird dann folgen.

LITERATUR UND FUSSNOTEN

- (1) Neubig, B., DK 1 AG:
Entwurf von Quarzoszillatoren
UKW-BERICHTE 19 (1979),
Heft 1, S.45-61 und Heft 2, S.110-124

- (2) Genauer betrachtet, genügt es für ein ideales Impulsverhalten nicht, eine konstante Gruppenlaufzeit zu haben, es ist gleichzeitig auch eine runde Form der

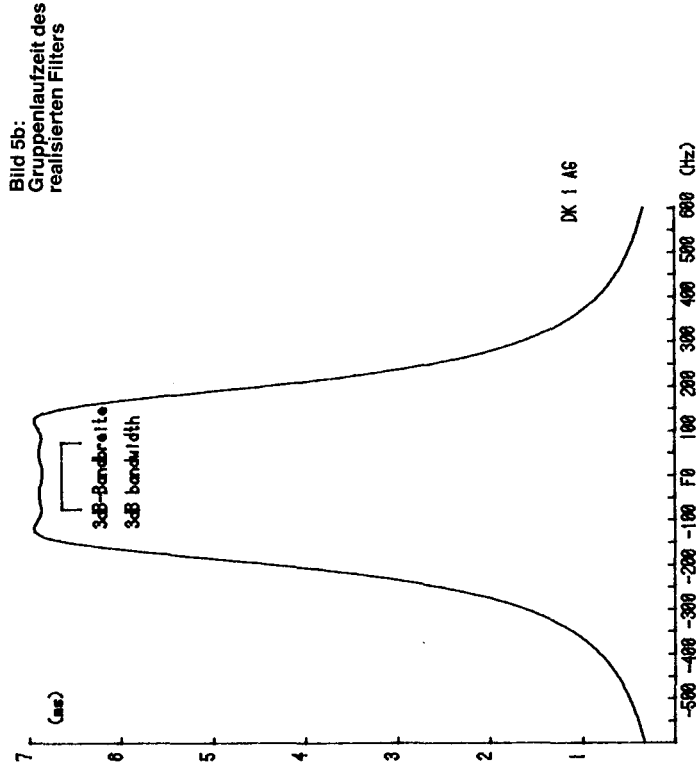


Bild 5b:
Gruppenlaufzeit des
realisierten Filters

Durchlaßkurve notwendig. Dies ist das sogenannte Gibbssche Phänomen: so hat das Gauß-Filter ein besseres Impulsverhalten als das Bessel-Filter, obwohl seine Gruppenlaufzeit nicht so konstant ist.

- (3) Belevitch, Vitold: Tchebyshev Filters and Amplifier Networks; Wireless Engineer (Apr. 1952), S.106-110
- (4) Burberg, D., DJ 2 YE: Geschwindigkeitsbestimmung bei elektronischen Tasten; CQ-DL Heft 8/1981, S.384
- (5) Saal, R.: Handbuch zum Filterentwurf, AEG-Telefunken 1979
- (6) Dishal, M.: Gaussian-Response Filter Design; Electrical Communication, Vol 36, Nr.1 (1959), S.3-26
- (7) Thomson, W.E.: Delay Networks Having Maximally-Flat Frequency Characteris-

tics; Proc.IEEE, Vol.96 (1949), pt.3, S.487-490.
Thomson, W.E.: Networks with Maximally-Flat Delay; Wireless Engineer, (Okt. 1952), S.256-263

- (8) Ulbrich, E., Piloty, H.: Über den Entwurf von Allpässen, Tiefpässen und Bandpässen mit einer im Tschebyscheffschen Sinne approximierten konstanten Gruppenlaufzeit; Archiv El. Übertragung, Band 14 (1960) H.10, S.451-467

- (9) Ein von U.L.Rohde, DJ 2 LR, veröffentlichtes Computerprogramm (QST, Mai 1981, S.16-23: Crystal Filter Design with Small Computers) enthält leider eine größere Anzahl von Fehlern, weshalb von dessen Anwendung abgeraten wird. Die Berechnung des beschriebenen Filters erfolgte außerdem mit etwas anderen Methoden.

Auf Anfrage ist der Autor (DK 1 AG) bereit, Hilfestellung zu leisten.