

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 59 (1968)  
**Heft:** 12

**Artikel:** Die Brücke als Filterelement  
**Autor:** Herzog, W.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-916050>

### **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:** 23.02.2026

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

gen in irgend einer Art und Weise daran beteiligt sind. Die Radiowellen respektieren eben keine Landesgrenze. Die UIT wurde speziell für übernationale Koordinationsarbeiten im Jahre 1865 gegründet. Sie behandelt das Gesamtproblem in Einklang mit allen seinen Aspekten. Das Organ der UIT, das den Katalog aller Radiodienste führt, nennt sich «International Frequency Registration Board». Es beschäftigt sich mit der Registrierung sämtlicher Stationen, sei es für Nachrichtensatelliten oder für erdgebundene Dienste. Vor der Erstellung einer Bodenstation kontrolliert dieses Komitee mittels der Koordinationsdistanz, ob eine Koordination notwendig ist und ob diese bejahendenfalls auch richtig durchgeführt wurde.

Die technischen Normen, welche von der Konferenz 1963 angenommen wurden, basieren auf Informationen, die ein anderes Organ der UIT, das CCIR (Comité Consultatif International de Radiocommunications), ausgearbeitet hat. Dieses Komitee hat den Auftrag, alle anhängigen Fragen technischer und betrieblicher Natur zu studieren und entsprechende Empfehlungen auszuarbeiten. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass das CCIR nicht nur ein kleines Sekretariat des UIT-Hauptsitzes in Genf ist, sondern sich aus Studien- und Planungsgruppen sowie aus Delegierten der einzelnen Verwaltungen zusammensetzt, die auch die Delegierten zu den Vollversammlungen stellen. Das CCIR besteht also, wie die UIT auch, aus dem Zusammenwirken aller Verwaltungen. Die gesamte Struktur des Hauptsitzes untersteht einem Generalsekretär, der für alle administrativen und finanziellen Aspekte verantwortlich ist.

Man sieht daraus, dass die UIT und ihre Organe bereits qualifiziert sind, dem neuen Gebiet der Nachrichtensatelliten lebenswichtige Unterstützung zu gewähren und gleichzeitig zu überwachen, dass die neue Technik das Wachstum anderer Arten von Nachrichtenübermittlung nicht behindert. Diese lebenswichtige Unterstützung wird bereits gewährt. Als Beispiel sei der Fall der HF-Nachrichtenverbindungen erwähnt; nach dem zweiten Weltkrieg war das Radiospektrum bereits überbelastet, und es herrschten chaotische Zustände. Seither gelang es durch die Koordination und die Empfehlungen der UIT, die nationale und internationale Benutzung der Frequenzen sicherzustellen, obwohl die Auslastung des Spektrums sich vervielfacht hatte. Im neuen Gebiet der Nachrichtensatelliten ist eine internationale Zusammenarbeit von ausschlaggebender Bedeutung, soll in den gemeinsam benutzten Bändern keine Interferenz auftreten. Ähnlich dem alten Beispiel einer Kette, die so stark wie ihr schwächstes Glied ist, spielt die vom Menschen hervorgerufene störende Interferenz diese Rolle bei allen Radioverbindungen. Wird nichts dagegen unternommen, so ist die Folge eine Desorganisation auf internationaler Ebene; zum Glück bemühen sich bereits sämtliche Verwaltungen durch die UIT, das Problem auf die einzig erfolgversprechende Weise zu lösen — auf die der internationalen Zusammenarbeit.

#### Adresse des Autors:

A. W. Boyle, Dipl. Ingenieur, Union Internationale des Télécommunications, Place des Nations, 2, rue de Varembe, 1200 Genève.

## Die Brücke als Filterelement <sup>1)</sup>

Von W. Herzog, Mainz

621.372.543.21

*Untersucht wird eine mit einer Reaktanz abgeschlossene, symmetrische Brücke mit zwei verschiedenen Elementen. Es werden einige Ersatzbilder angegeben. Ein Brückenersatzbild für einen Schwingkristall lässt sich leicht realisieren. Für die symmetrische Brücke mit drei Elementen wird ein Ersatzbild gefunden. Die Verwendung für Filterzwecke wird erörtert und als Beispiel ein Bandfilter berechnet, das eine weitgehende Anpassung der Kristallserienkapazitäten gestattet. Die Brücke mit drei verschiedenen Elementen erlaubt nur sehr breite Bandfilter.*

*L'essai se rapporte à un pont symétrique à deux éléments différents, fermé par une réactance. On indique quelques schémas équivalents. Un schéma équivalent du pont à l'aide d'un cristal oscillant peut être réalisé facilement. On trouve un schéma équivalent pour un pont symétrique avec trois éléments, puis on indique son application comme filtre. Un filtre de bande est mentionné à titre d'exemple, permettant une très large adaptation aux capacités en série des cristaux. Le pont à trois éléments différents ne permet d'exécuter que des filtres à large bande.*

### 1. Problemstellung

Im allgemeinen werden Filterschaltungen aus Ketten von  $\Pi$ - und T-Gliedern und aus Brücken aufgebaut. Die einzelnen Zweige bestehen aus Parallel- und Serienschaltungen von Spulen ohne und mit Gegenkopplung, Kondensatoren und gegebenenfalls von Schwingkristallen. Bei den Brücken kann man die Elemente in den Zweigen häufen, um bessere Eigenschaften zu erzielen, jedoch auch Ketten aus Brücken sind sehr geeignet. Sie lassen sich besser einstellen und bei Kristallen werden die Nebenresonanzen eines Kristalls in einer Brücke durch die übrigen Brücken gedämpft [1]<sup>2)</sup>. In dem vorliegenden Aufsatz sei als neues Element eine ausgangsseitig mit einer Reaktanz abgeschlossene Brücke betrachtet. Mit solchen Elementen werden Filter aufgebaut. Die Untersuchung wird auf symmetrische Brücken beschränkt. Die betrachteten Elemente können in Brücken sowie in  $\Pi$ - und T-Schaltungen Anwendung finden.

### 2. Symmetrische Brücken aus zwei verschiedenen Elementen

Fig. 1 zeigt eine Brücke mit den beiden Elementen  $X_1$  und  $X_2$  sowie dem Abschluss  $X$ . Die Darstellung sei auf Reaktanzen beschränkt. Für die Anordnung in Fig. 1 ergibt sich als resultierender Widerstand  $\bar{X}$ .

$$\bar{X} = \frac{2 X_1 X_2 + (X_1 + X_2) X}{X_1 + X_2 + 2 X} \quad (1)$$

Bei der Benutzung des Brückenelementes ist es zweckmässig, die Zweige  $X_1$  und  $X_2$  mit möglichst wenig Elementen auszu-

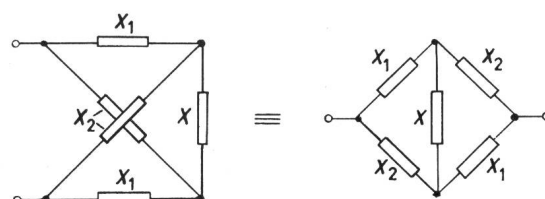


Fig. 1

Mit Reaktanz abgeschlossene Brücke

<sup>1)</sup> Mitteilung des Instituts für Elektrotechnik der Universität Mainz.

<sup>2)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

statten um zu sparen, während die Reaktanz  $X$  komplizierter gewählt werden kann. Die Verwendung beim Filteraufbau setzt voraus, dass man möglichst leicht erkennen kann, welche Frequenzabhängigkeit die Grösse  $\bar{X}$  besitzt. Da weder die Anordnung in Fig. 1 noch die Formel (1) ein solches Erkennen gestattet, müssen Ersatzbilder gesucht werden. Bei einem

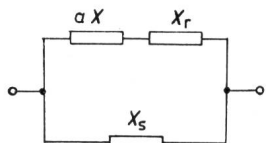


Fig. 2  
Ersatzschaltbild der Brücke in Fig. 1

Ersatzbild soll die Grösse  $X$  als wesentliche Grösse möglichst isoliert werden.

Betrachtet sei die Anordnung in Fig. 2. Dieselbe soll der Brücke in Fig. 1 äquivalent sein, also den Wert  $\bar{X}$  besitzen. Aus Fig. 2 folgt:

$$\bar{X} = \frac{(aX + X_r)X_s}{X_r + X_s + aX} = \frac{\frac{2}{a}X_rX_s + 2X_sX}{\frac{2}{a}(X_r + X_s) + 2X} \quad (2)$$

Der Vergleich der Formeln (1) und (2) ergibt

$$\begin{aligned} \frac{X_rX_s}{a} &= X_1X_2 \\ 2X_s &= X_1 + X_2 \\ \frac{2}{a}(X_r + X_s) &= X_1 + X_2 \end{aligned} \quad (3)$$

mit den Lösungen

$$\begin{aligned} a &= \left( \frac{X_1 + X_2}{X_1 - X_2} \right)^2 \\ X_r &= \frac{2X_1X_2(X_1 + X_2)}{(X_1 - X_2)^2} = \frac{2X_1X_2}{X_1 + X_2} a \\ X_s &= \frac{X_1 + X_2}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

Sollte das Ersatzbild hergestellt werden, so würde die Differenz  $X_1 - X_2$  unter Umständen eine Nichtherstellbarkeit bedingen. Für die Herstellung der Brücke, die als allgemeinere

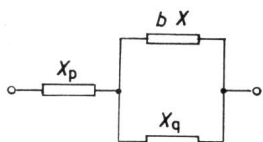


Fig. 3  
Ersatzschaltbild der Brücke in Fig. 1

Schaltung aufzufassen ist, gibt es keine Einschränkung. Das Ersatzbild in Fig. 2 entspricht dem Wunsch, dass  $X$  nur einmal auftritt, und ist übersichtlich.

Ein zweites Ersatzbild in der Form von Fig. 3 ist ebenfalls möglich. Fig. 3 liefert die Grösse  $\bar{X}$ :

$$\begin{aligned} \bar{X} &= X_p + \frac{bX X_q}{bX + X_q} = \frac{X_p X_q + b(X_p + X_q)X}{X_q + bX} = \\ &= \frac{\frac{2}{b}X_pX_q + 2(X_p + X_q)X}{\frac{2}{b}X_q + 2X} \end{aligned} \quad (5)$$

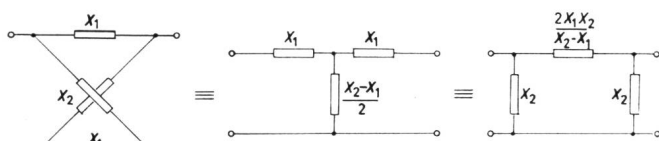


Fig. 4  
Brücke mit T- und Π-Ersatzschaltbildern

Vergleicht man die Formeln (1) und (5), so folgt

$$\begin{aligned} \frac{X_pX_q}{b} &= X_1X_2 \\ 2(X_p + X_q) &= X_1 + X_2 \\ \frac{2X_q}{b} &= X_1 + X_2 \end{aligned} \quad (6)$$

und hieraus

$$\begin{aligned} b &= \left( \frac{X_1 - X_2}{X_1 + X_2} \right)^2 \\ X_p &= \frac{2X_1X_2}{X_1 + X_2} \\ X_q &= b \frac{X_1 + X_2}{2} = \frac{(X_1 - X_2)^2}{2(X_1 + X_2)} \end{aligned} \quad (7)$$

Auch dieses Ersatzbild hat die für  $X$  gewünschte Eigenschaft. Aus Fig. 1 lassen sich durch Stern-Dreieck- und Dreieck-Stern-Transformationen weitere Ersatzbilder gewinnen, bei denen die Grösse  $X$  nicht isoliert ist.

Die Umwandlung der Brücke in Π- und T-Schaltungen [2], wie sie Fig. 4 zeigt, ergibt mit der Reaktanz  $X$  die weiteren Ersatzbilder von Fig. 5a und b. Dieselben enthalten ein Ele-

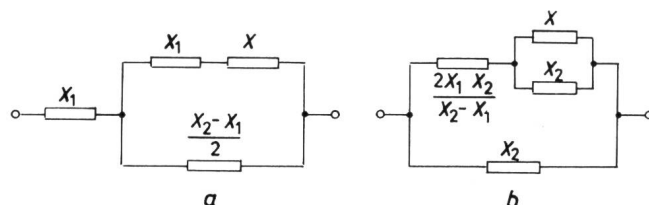


Fig. 5  
Ersatzschaltbilder der Brücke in Fig. 1 aus den Ersatzschaltbildern der Brücke in Fig. 4

ment mehr als die Ersatzbilder Fig. 2 und 3, sind jedoch auch brauchbar. Die Vorteile äquivalenter Schaltungen liegen in der grösseren Anschaulichkeit beim Zusammenschalten und in der Gewinnung herstellbarer Arten.

Zum Beispiel ist die Nachbildung eines Schwingkristalls durch Spule und Kondensatoren, abgesehen von den Verlusten, nach Fig. 6a nicht möglich, weil die Kapazität  $C_k$  die Grössenordnung von  $10^{-2}$  pF besitzt. Die Elemente des Ersatzbildes in Fig. 6b sind herstellbar, in ihren Werten aber nicht günstig. Das Brückenelement bietet ein weiteres Ersatzbild, das sich brauchbar aufbauen lässt. Im folgenden Abschnitt sei das Ersatzbild eines Schwingkristalls behandelt.

### 3. Ersatzbild eines Schwingkristalles

Gegeben sei ein Schwingkristall mit den Werten nach Fig. 6a

$$L_k = 0,63 \text{ H}; \quad C_k = 0,9 \cdot 10^{-2} \text{ pF}; \quad C_p = 6 \text{ pF} \quad (8)$$

Für die Umrechnung in das Ersatzbild Fig. 6b gelten die Formeln

$$\begin{aligned} L' &= L_k \frac{1}{\left(1 + \frac{C_p}{C_k}\right)^2} \\ C' &= C_p \left(1 + \frac{C_p}{C_k}\right) \\ C_1' &= C_k + C_p \end{aligned} \quad (9)$$

und mit den Werten von Gl. (8)

$$L' = 1,413 \cdot 10^{-6} \text{ H}; \quad C' = 4006 \text{ pF}; \quad C_1' = 6,009 \text{ pF} \quad (10)$$

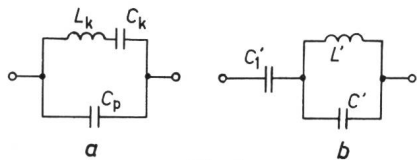


Fig. 6  
Ersatzschaltbilder eines Schwingkristalls

Die Werte von Gl. (10) sind herstellbar, jedoch ist  $C'$  ziemlich gross, um verlustfrei aufgebaut werden zu können, während  $L'$  klein ist. Fig. 2 ermöglicht ein neues Ersatzbild, das in

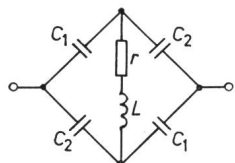


Fig. 7  
Brückenersatzschaltbild eines Schwingkristalls mit Verlusten

Fig. 7 wiedergegeben wird, wobei auch die Verlustwiderstände berücksichtigt werden. Zum Vergleich ist das um den Widerstand  $R_k$  erweiterte Ersatzbild von Fig. 6a in Fig. 8 wiedergegeben. Der zu dem Beispiel Gl. (8) gehörende Wert ist  $R_k = 800 \Omega$ .

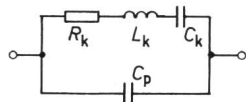


Fig. 8  
Ersatzschaltbild eines Schwingkristalls mit Verlusten

Die Umrechnung lässt sich nach den Formeln (4) durchführen. Für  $X$  ist zu setzen

$$X = \omega L + \frac{r}{j} \quad (11)$$

Es folgt:

$$\begin{aligned} a &= \left( \frac{C_2 + C_1}{C_2 - C_1} \right)^2 \\ R_k &= \left( \frac{C_2 + C_1}{C_2 - C_1} \right)^2 r \\ L_k &= \left( \frac{C_2 + C_1}{C_2 - C_1} \right)^2 L \\ C_k &= \frac{(C_2 - C_1)^2}{2(C_2 + C_1)} \\ C_p &= \frac{2 C_1 C_2}{C_1 + C_2} \end{aligned} \quad (12)$$

Aus den Formeln (12) ergeben sich mit der aus den Gln. (12) leicht zu ersehenden Beziehung:

$$C_k + C_p = \frac{C_2 + C_1}{2} \quad (13)$$

die Grössen des Ersatzbildes in Fig. 7 zu:

$$\begin{aligned} C_2 &= C_k + C_p + \sqrt{C_k(C_k + C_p)} \\ C_1 &= C_k + C_p - \sqrt{C_k(C_k + C_p)} \\ a &= \left( \frac{C_k + C_p}{\sqrt{C_k(C_k + C_p)}} \right)^2 = 1 + \frac{C_p}{C_k} \\ r &= \frac{R_k}{a} \\ L &= \frac{L_k}{a} \end{aligned} \quad (14)$$

Mit den Zahlenwerten in der Gl. (8) und  $R_k = 800 \Omega$  erhält man:

$$\begin{aligned} a &= 667,667; & C_2 &= 6,24 \text{ pF}; & C_1 &= 5,78 \text{ pF}; \\ L &= 0,944 \text{ mH}; & r &= 1,2 \Omega \end{aligned} \quad (15)$$

Bei einer Spule von der Güte 1000, die in weiten Bereichen erzielbar ist, muss mit einem tatsächlichen Wert von  $r = 12 \Omega$  gerechnet werden. Der Spulenwert liegt bei der Resonanzfrequenz von rund 2 MHz etwas hoch, die Kondensatoren sind

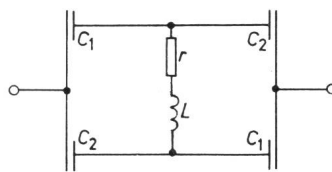


Fig. 9  
Brückenersatzschaltbild eines Schwingkristalls mit Differentialkondensatoren

günstig. Es lassen sich Differentialkondensatoren verwenden, so dass das endgültige Ersatzbild Fig. 9 zeigt.

Für die Resonanzfrequenz  $f_k$  ( $\omega_k = 2 \pi f_k$ ) gilt:

$$\omega_k^2 = \frac{1}{L_k C_k} = \frac{2}{L(C_2 + C_1)} \quad (16)$$

so dass es nicht ganz einfach ist  $\omega_k$  und  $L_k$  gleichzeitig richtig einzustellen. Man wird  $f_k$  genau einstellen. Erreicht man bei  $L_k$  etwa den gleichen Fehler wie bei der Messung von  $L_k$ , so ist das Ersatzbild in dieser Hinsicht gleichwertig.

#### 4. Symmetrische Brücken aus drei verschiedenen Elementen

Bekanntlich ist die in Fig. 10 gezeigte Brücke mit drei verschiedenen Elementen ein symmetrischer Vierpol. Die ihr ent-

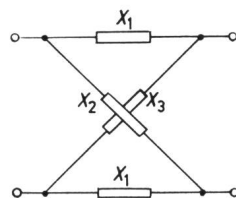


Fig. 10  
Symmetrische Brücke mit drei verschiedenen Elementen

sprechende Brücke mit symmetrischem Aufbau findet sich in Fig. 11. Für die Zweige  $X_a$  gilt:

$$X_a = \frac{2 X_2 X_3 + (X_2 + X_3) X_1}{X_2 + X_3 + 2 X_1} \quad (17)$$

Da die Formel (17) mit Formel (1) übereinstimmt, lässt sich als Ersatzbild für Fig. 10 die Anordnung in Fig. 12 wieder-

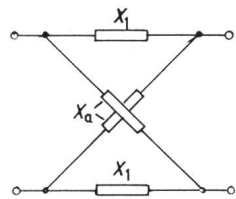


Fig. 11  
Ersatzschaltbild der Brücke in Fig. 10

geben. Wählt man als Zweig  $X_1$  ebenfalls eine Brücke, so entsteht nach Fig. 12 im Zweig  $X_a$  eine in sich geschachtelte Brücke [3]. Ergänzt man die Brücke in Fig. 10 bzw. 12 durch

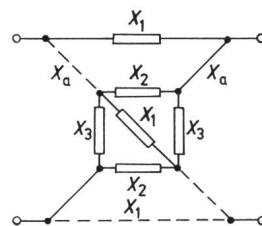


Fig. 12  
Ersatzschaltbild der Brücke in Fig. 10  
(Die gestrichelten Linien vertreten die Zweige  $X_a$  und  $X_1$ .)

eine Reaktanz  $X$  nach Fig. 1, so erhält man den Zweipol von Fig. 13. Derselbe soll im folgenden auf seine Eignung als Zweig einer Filterschaltung — einer Brücke — untersucht werden.

Aus Fig. 13 lässt sich für den Widerstand  $\bar{X}$  der Anordnung entnehmen:

$$\bar{X} = \frac{X_1 X_2 (X_1 + X_3) + X_1 X_3 (X_1 + X_2) + (X_1 + X_2) (X_1 + X_3) X}{(X_1 + X_2) (X_1 + X_3) + (2 X_1 + X_2 + X_3) X} \quad (18)$$

Umgeformt ergibt sich mit Formel (17):

$$\bar{X} = \frac{2 X_1 X_a + (X_1 + X_a) X}{X_1 + X_a + 2 X} \quad (19)$$

Für Gl. (19) gelten die Ersatzbilder Fig. 2...5. Sind die Grössen  $X_1$ ,  $X_2$  und  $X_3$  untereinander proportional, so besteht



Fig. 13  
Symmetrische Brücke mit drei verschiedenen Elementen mit Reaktanzabschluss

nur ein geringer Unterschied gegenüber einer Brücke mit zwei verschiedenen Elementen.

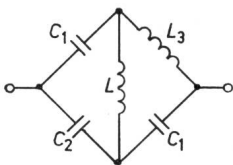


Fig. 14  
Brücke entsprechend Fig. 13

Es sind also diese Grössen verschieden zu wählen. Für ein einfaches Beispiel sei der in Fig. 14 gezeigte Brückenzweigpol mit den Werten:

$$\begin{aligned} X_1 &= -\frac{1}{\omega C_1}; & X_2 &= -\frac{1}{\omega C_2} \\ X_3 &= \omega L_3; & X &= \omega L \end{aligned} \quad (20)$$

untersucht. Es interessieren seine Frequenzabhängigkeit und die Resonanzfrequenzen. Die Verluste werden vernachlässigt. Formel (18) liefert für die Grössen (20) nach einiger Umformung:

$$\begin{aligned} \bar{X} &= -\frac{C_1 + C_2}{\omega C_1 C_2} \\ \omega^4 - \left( \frac{1}{L_3 C_1} + \frac{2 C_1 + C_2}{L C_1 (C_1 + C_2)} \right) \omega^2 + \frac{1}{L L_3 C_1 (C_1 + C_2)} \\ &= \frac{\omega^4 - \left( \frac{C_1 + 2 C_2}{L_3 C_1 C_2} + \frac{C_1 + C_2}{L C_1 C_2} \right) \omega^2 + \frac{C_1 + C_2}{L L_3 C_1^2 C_2}}{\omega^4 - \left( \frac{C_1 + 2 C_2}{L_3 C_1 C_2} + \frac{C_1 + C_2}{L C_1 C_2} \right) \omega^2 + \frac{C_1 + C_2}{L L_3 C_1^2 C_2}} \end{aligned} \quad (21)$$

Für die Serienresonanzkreisfrequenzen  $\omega_{1s}$ ,  $\omega_{3s}$  und die Parallelresonanzkreisfrequenzen  $\omega_{1p}$ ,  $\omega_{3p}$  entnimmt man Gl. (21):

$$\begin{aligned} \omega_{1s}^2 + \omega_{3s}^2 &= \frac{1}{L_3 C_1} + \frac{2 C_1 + C_2}{L C_1 (C_1 + C_2)} \\ \omega_{1s}^2 \omega_{3s}^2 &= \frac{1}{L L_3 C_1 (C_1 + C_2)} \\ \omega_{1p}^2 + \omega_{3p}^2 &= \frac{C_1 + 2 C_2}{L_3 C_1 C_2} + \frac{C_1 + C_2}{L C_1 C_2} \\ \omega_{1p}^2 \omega_{3p}^2 &= \frac{C_1 + C_2}{L L_3 C_1^2 C_2} \end{aligned} \quad (22)$$

Mit den Gln. (22) und der Abkürzung:

$$C_1' = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (23)$$

ändert sich Gl. (21) in:

$$\bar{X} = -\frac{1}{\omega C_1'} \cdot \frac{(\omega^2 - \omega_{1s}^2)(\omega^2 - \omega_{3s}^2)}{(\omega^2 - \omega_{1p}^2)(\omega^2 - \omega_{3p}^2)} \quad (24)$$

Gilt:

$$\omega_{1s} < \omega_{1p} < \omega_{3s} < \omega_{3p} \quad (25)$$

so ist  $\bar{X}$  eine Reaktanz.

Zur Vereinfachung sei ein Spezialfall untersucht. Da die Gln. (22) bei Verschiedenheit gleichartiger Elemente keine wesentlichen Abweichungen erwarten lassen, sei gesetzt:

$$L_3 = L; \quad C_2 = C_1 = C; \quad \frac{1}{LC} = \omega_0^2 \quad (26)$$

Aus den Gln. (20) und (22) folgt:

$$\begin{aligned} \omega_{1s}^2 + \omega_{3s}^2 &= \frac{5}{2} \omega_0^2 \\ \omega_{1s}^2 \omega_{3s}^2 &= \frac{1}{2} \omega_0^2 \\ \omega_{1p}^2 + \omega_{3p}^2 &= 5 \omega_0^2 \\ \omega_{1p}^2 \omega_{3p}^2 &= 2 \omega_0^2 \end{aligned} \quad (27)$$

mit den Lösungen:

$$\begin{aligned} \omega_{3s} &= \frac{1}{2\sqrt{2}} \left[ \sqrt{5 + 2\sqrt{2}} + \sqrt{5 - 2\sqrt{2}} \right] \omega_0 \\ \omega_{1s} &= \frac{1}{2\sqrt{2}} \left[ \sqrt{5 + 2\sqrt{2}} - \sqrt{5 - 2\sqrt{2}} \right] \omega_0 \\ \omega_{3p} &= \frac{1}{2} \left[ \sqrt{5 + 2\sqrt{2}} + \sqrt{5 - 2\sqrt{2}} \right] \omega_0 = \sqrt{2} \omega_{3s} \\ \omega_{1p} &= \frac{1}{2} \left[ \sqrt{5 + 2\sqrt{2}} - \sqrt{5 - 2\sqrt{2}} \right] \omega_0 = \sqrt{2} \omega_{1s} \end{aligned} \quad (28)$$

Die Zahlen ergeben:

$$\begin{aligned} \omega_{3s} &= 1,5102 \omega_0 & \omega_{1s} &= 0,4682 \omega_0 \\ \omega_{3p} &= 2,1358 \omega_0 & \omega_{1p} &= 0,6622 \omega_0 \end{aligned} \quad (29)$$

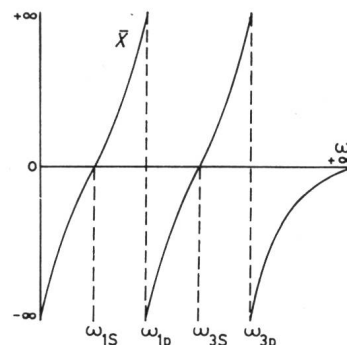


Fig. 15  
Reaktanzverlauf der Brücke in Fig. 14 in Abhängigkeit von der Frequenz

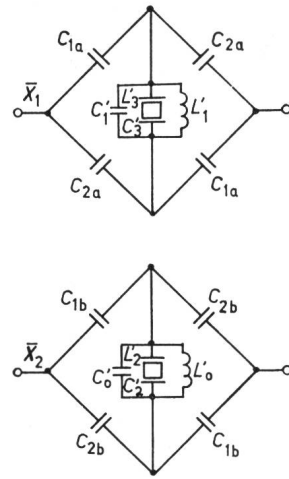
Damit ist das Brückenelement  $X$  eine Reaktanz. Ihre Frequenzabhängigkeit ist in Fig. 15 skizziert. Man sieht, dass sich nur sehr breite Bandfilter mit dem Element  $\bar{X}$  als

Brückenzweige erzielen lassen, wie schon früher festgestellt wurde [4].

## 5. Ein Kristallbrückenfilter mit Brücken aus zwei verschiedenen Elementen

Ein Brückenzweig nach Fig. 1 bietet viele Möglichkeiten zur Filtergewinnung. Ein relativ einfaches Beispiel sei hier gebracht. Zweckmässig sind die Zweige  $X_1$  und  $X_2$  einfach, und somit empfehlen sich Kapazitäten. Mit einer Induktivität  $X$  wird der Brückenzweig zu dem in Fig. 7 gezeigten Element (ohne  $r$ ), mit dem Ersatzbild in Fig. 6a. Die Anordnung ändert sich nur in ihren Werten, wenn statt der Induktivität  $\bar{X}$  ein Serienkreis oder gar die Anordnung in Fig. 6a selbst geschaltet wird. Hierbei entsteht ein Ersatzbild nach Fig. 6a. Nachteilig ist hier der grössere Aufwand, während grössere Freiheiten in den Daten der Elemente entstehen. Es empfiehlt sich daher das Element  $X$  durch eine Parallelinduktivität um eine Resonanz-

Fig. 16  
Brückenzweige eines Bandfilters



stelle zu erweitern. Zwei solcher Brückenelemente stellen die Brückenzweige  $\bar{X}_1$  und  $\bar{X}_2$  eines Brückenbandfilters dar, die Fig. 16 wiedergibt. Je Brückenzweig ist ein Schwingquarz möglich.

Für den Brückenzweig  $\bar{X}_1$  gelten mit den Bezeichnungen von Fig. 16 die Formeln:

$$X_{1a} = -\frac{1}{\omega C_{1a}}; \quad X_{2a} = -\frac{1}{\omega C_{2a}} \quad (30)$$

$$X_1 = -\frac{1}{\omega C_1'} \cdot \frac{\omega^2 (\omega^2 - \omega_{3s}^2)}{(\omega^2 - \omega_{1p}^2) (\omega^2 - \omega_{3p}^2)}$$

mit den Abkürzungen:

$$\begin{aligned} \omega_{3s}^2 &= \frac{1}{L_3' C_3'} \\ \omega_{3p}^2 + \omega_{1p}^2 &= \frac{1}{L_3' C_3'} + \frac{1}{L_1' C_1'} + \frac{1}{L_3' C_1'} \\ \omega_{3p}^2 \omega_{1p}^2 &= \frac{1}{L_3' C_3'} \cdot \frac{1}{L_1' C_1'} \end{aligned} \quad (31)$$

Aus den Resonanzfrequenzen Gln. (31) ergeben sich die Schaltelemente bezogen auf  $C_1'$  zu:

$$\begin{aligned} L_1' &= \frac{1}{C_1'} \cdot \frac{\omega_{3s}^2}{\omega_{3p}^2 \omega_{1p}^2} \\ L_3' &= \frac{1}{C_1'} \cdot \frac{\omega_{3s}^2}{(\omega_{3p}^2 - \omega_{3s}^2) (\omega_{3p}^2 - \omega_{1p}^2)} \\ C_3' &= C_1' \cdot \frac{(\omega_{3p}^2 - \omega_{3s}^2) (\omega_{3s}^2 - \omega_{1p}^2)}{\omega_{3s}^4} \end{aligned} \quad (32)$$

Hierzu gilt Gl. (1):

$$\bar{X}_1 = \frac{2 X_{1a} X_{2a} + (X_{1a} + X_{2a}) X_1}{X_{1a} + X_{2a} + 2 X_1} \quad (33)$$

Die entsprechenden Formeln für den Brückenzweig  $\bar{X}_2$  lauten:

$$\begin{aligned} X_{1b} &= -\frac{1}{\omega C_{1b}} \\ X_{2b} &= -\frac{1}{\omega C_{2b}} \\ X_2 &= -\frac{1}{\omega C_0'} \cdot \frac{\omega^2 (\omega^2 - \omega_{2s}^2)}{(\omega^2 - \omega_{0p}^2) (\omega^2 - \omega_{2p}^2)} \\ \omega_{2s}^2 &= \frac{1}{L_2' C_2'} \\ \omega_{2p}^2 + \omega_{0p}^2 &= \frac{1}{L_2' C_2'} + \frac{1}{L_0' C_0'} + \frac{1}{L_2' C_0'} \\ \omega_{2p}^2 \omega_{0p}^2 &= \frac{1}{L_2' C_2'} \cdot \frac{1}{L_0' C_0'} \end{aligned} \quad (34)$$

$$\omega_{2p}^2 + \omega_{0p}^2 = \frac{1}{L_2' C_2'} + \frac{1}{L_0' C_0'} + \frac{1}{L_2' C_0'} \quad (35)$$

$$\omega_{2p}^2 \omega_{0p}^2 = \frac{1}{L_2' C_2'} \cdot \frac{1}{L_0' C_0'}$$

$$\begin{aligned} L_0' &= \frac{1}{C_0'} \cdot \frac{\omega_{2s}^2}{\omega_{2p}^2 \omega_{0p}^2} \\ L_2' &= \frac{1}{C_0'} \cdot \frac{\omega_{2s}^2}{(\omega_{2p}^2 - \omega_{2s}^2) (\omega_{2s}^2 - \omega_{0p}^2)} \\ C_2' &= C_0' \cdot \frac{(\omega_{2p}^2 - \omega_{2s}^2) (\omega_{2s}^2 - \omega_{0p}^2)}{\omega_{2s}^4} \end{aligned} \quad (36)$$

$$\bar{X}_2 = \frac{2 X_{1b} X_{2b} + (X_{1b} + X_{2b}) X_2}{X_{1b} + X_{2b} + 2 X_2} \quad (37)$$

Aus den Formeln (30) und (33) bzw. (34) und (37) erhält man:

$$\begin{aligned} \bar{X}_1 &= -\frac{1}{\omega C_1} \cdot \frac{(\omega^2 - \omega_{3s}^2) (\omega^2 - \omega_{5s}^2)}{(\omega^2 - \omega_{3p}^2) (\omega^2 - \omega_{5p}^2)} \\ \bar{X}_2 &= -\frac{1}{\omega C_0} \cdot \frac{(\omega^2 - \omega_{2s}^2) (\omega^2 - \omega_{4s}^2)}{(\omega^2 - \omega_{2p}^2) (\omega^2 - \omega_{4p}^2)} \end{aligned} \quad (38)$$

mit den Abkürzungen:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{(C_{1a} + C_{2a}) C_1' + 2 C_{1a} C_{2a}}{2 C_1' + C_{1a} + C_{2a}} \\ \omega_{3s}^2 + \omega_{5s}^2 &= \frac{2 C_1' (\omega_{1p}^2 + \omega_{3p}^2) + (C_{1a} + C_{2a}) \omega_{3s}^2}{2 C_1' + C_{1a} + C_{2a}} \\ \omega_{3s}^2 \omega_{5s}^2 &= \frac{2 C_1' \omega_{1p}^2 \omega_{3p}^2}{2 C_1' + C_{1a} + C_{2a}} \\ \omega_{3p}^2 + \omega_{5p}^2 &= \frac{(C_{1a} + C_{2a}) C_1' (\omega_{1p}^2 + \omega_{3p}^2) + 2 C_{1a} C_{2a} \omega_{3s}^2}{(C_{1a} + C_{2a}) C_1' + 2 C_{1a} C_{2a}} \\ \omega_{3p}^2 \omega_{5p}^2 &= \frac{(C_{1a} + C_{2a}) C_1' \omega_{1p}^2 \omega_{3p}^2}{(C_{1a} + C_{2a}) C_1' + 2 C_{1a} C_{2a}} \\ C_0 &= \frac{(C_{1b} + C_{2b}) C_0' + 2 C_{1b} C_{2b}}{2 C_0' + C_{1b} + C_{2b}} \\ \omega_{2s}^2 + \omega_{4s}^2 &= \frac{2 C_0' (\omega_{0p}^2 + \omega_{2p}^2) + (C_{1b} + C_{2b}) \omega_{2s}^2}{2 C_0' + C_{1b} + C_{2b}} \\ \omega_{2s}^2 \omega_{4s}^2 &= \frac{2 C_0' \omega_{0p}^2 \omega_{2p}^2}{2 C_0' + C_{1b} + C_{2b}} \\ \omega_{2p}^2 + \omega_{4p}^2 &= \frac{(C_{1b} + C_{2b}) C_0' (\omega_{0p}^2 + \omega_{2p}^2) + 2 C_{1b} C_{2b} \omega_{2s}^2}{(C_{1b} + C_{2b}) C_0' + 2 C_{1b} C_{2b}} \\ \omega_{2p}^2 \omega_{4p}^2 &= \frac{(C_{1b} + C_{2b}) C_0' \omega_{0p}^2 \omega_{2p}^2}{(C_{1b} + C_{2b}) C_0' + 2 C_{1b} C_{2b}} \end{aligned} \quad (39)$$

Mit den Zweigen  $\bar{X}_1$  und  $\bar{X}_2$  gibt es viele Möglichkeiten zur Auswahl eines Bandfilters. Dieselben lassen sich [5] bei zusammenfallenden Resonanzstellen entnehmen. Auch nicht zusammenfallende Resonanzstellen können vorteilhaft sein. Das Beispiel sei auf die Anordnung in [5] beschränkt, deren Blind-

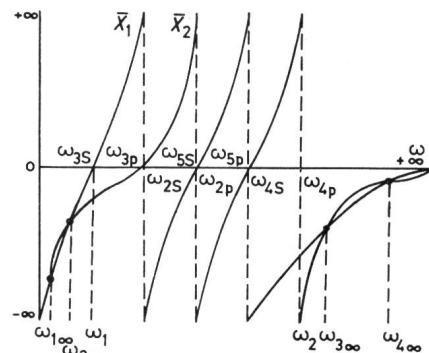
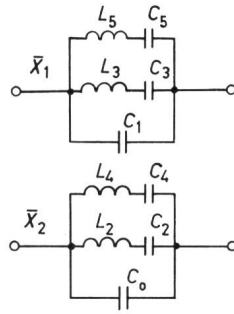


Fig. 17  
Reaktanzverlauf der Brückenzweige in Fig. 16

Fig. 18  
Brückenzweige einer normalen Brücke mit gleichem Reaktanzverlauf wie die Brücke in Fig. 16



widerstandsverlauf in Fig. 17 wieder gegeben ist. Die vier Polstellen können beliebig verteilt werden, sie können alle in einem der beiden Sperrbereiche liegen.

Der Reaktanzverlauf Fig. 17 entspricht den in Fig. 18 gezeigten Brückenzweigen einer normalen Brückenschaltung.

Fig. 17 entnimmt man die Beziehungen:

$$\begin{aligned} \omega_{3s} = \omega_1 \quad \omega_{3p} = \omega_{2s} \quad \omega_{2p} = \omega_{5s} \\ \omega_{5p} = \omega_{4s} \quad \omega_{4p} = \omega_2 \end{aligned} \quad (41)$$

Damit bleiben neben den Grenzfrequenzen  $\omega_1$  und  $\omega_2$  nur die Serienresonanzfrequenzen  $\omega_{2s}$ ,  $\omega_{4s}$  und  $\omega_{5s}$  übrig. Entsprechend vereinfachen sich die Gln. (39) und (40).

Mit den Gln. (39) und (40) stehen 10 Gleichungen für die 12 unbekannten Elemente der Fig. 16 zur Verfügung. In jedem Brückenzweig steht also ein Freiheitsgrad offen, der z. B. zur Anpassung von Kristallinduktivitäten dienen kann.

Zur Berechnung des Filters seien folgende Abkürzungen eingeführt:

$$\begin{aligned} \frac{2 C_{1a} C_{2a}}{C_{1a} + C_{2a}} = C_a; \quad \frac{2 C_{1'}}{C_{1a} + C_{2a}} = a; \quad \frac{C_a}{C_1} = x \\ \omega_{3s}^2 + \omega_{5s}^2 = r; \quad \omega_{3s}^2 \omega_{5s}^2 = s \end{aligned} \quad (42)$$

$$\begin{aligned} \frac{2 C_{1b} C_{2b}}{C_{1b} + C_{2b}} = C_b; \quad \frac{2 C_0'}{C_{1b} + C_{2b}} = b; \quad \frac{C_b}{C_0} = y \\ \omega_{2s}^2 + \omega_{4s}^2 = p; \quad \omega_{2s}^2 \omega_{4s}^2 = q \\ \omega_{2p}^2 + \omega_{4p}^2 = \omega_{5s}^2 + \omega_2^2 = t; \quad \omega_{2p}^2 \omega_{4p}^2 = \omega_{5s}^2 \omega_2^2 = u \end{aligned} \quad (43)$$

Damit ändern sich die Gln. (39) unter Berücksichtigung der Beziehungen (41) in:

$$\begin{aligned} C_1 = \frac{C_{1'} + C_a}{a + 1} \\ r = \frac{a(\omega_{1p}^2 + \omega_{3p}^2) + \omega_{3s}^2}{a + 1} \\ s = \frac{a \omega_{1p}^2 \omega_{3p}^2}{a + 1} \\ p = \frac{C_{1'}(\omega_{1p}^2 + \omega_{3p}^2) + C_a \omega_{3s}^2}{C_{1'} + C_a} \\ q = \frac{C_{1'} \omega_{1p}^2 \omega_{3p}^2}{C_{1'} + C_a} \end{aligned} \quad (44)$$

Durch die naheliegende Eliminierung der Frequenzen  $\omega_{1p}$  und  $\omega_{3p}$  erhält man:

$$\omega_{3s}^2 = \frac{r - p \frac{s}{q}}{1 - \frac{s}{q}}; \quad a = \frac{s}{q} \cdot \frac{1 - x}{1 - \frac{s}{q}}; \quad C_{1'} = \frac{1 - x}{1 - \frac{s}{q}} C_1 \quad (45)$$

und schliesslich:

$$\begin{aligned} \omega_{1p}^2 + \omega_{3p}^2 = \frac{r(a + 1) - \omega_{3s}^2}{a} = \frac{p - r x}{1 - x} \\ \omega_{1p}^2 \omega_{3p}^2 = \frac{s(a + 1)}{a} = \frac{q - s x}{1 - x} \end{aligned} \quad (46)$$

Die entsprechenden Gleichungen für den Brückenzweig  $\bar{X}_2$  sind:

$$\begin{aligned} C_0 = \frac{C_0' + C_b}{b + 1}; \quad p = \frac{b(\omega_{0p}^2 + \omega_{2p}^2) + \omega_{2s}^2}{b + 1}; \\ q = \frac{b \omega_{0p}^2 \omega_{2p}^2}{b + 1}; \\ t = \frac{C_0'(\omega_{0p}^2 + \omega_{2p}^2) + C_b \omega_{2s}^2}{C_0' + C_b}; \quad u = \frac{C_0' \omega_{0p}^2 \omega_{2p}^2}{C_0' + C_b} \end{aligned} \quad (47)$$

Eliminierung der Frequenzen  $\omega_{0p}$  und  $\omega_{2p}$  ergibt:

$$\omega_{2s}^2 = \frac{p - t \frac{q}{u}}{1 - \frac{q}{u}}; \quad b = \frac{q}{u} \cdot \frac{1 - y}{1 - \frac{q}{u}}; \quad C_0' = \frac{1 - y}{1 - \frac{q}{u}} C_0 \quad (48)$$

$$\begin{aligned} \omega_{0p}^2 + \omega_{2p}^2 = \frac{p(b + 1) - \omega_{2s}^2}{b} = \frac{t - p y}{1 - y}; \\ \omega_{0p}^2 \omega_{2p}^2 = \frac{q(b + 1)}{b} = \frac{u - q y}{1 - y} \end{aligned} \quad (49)$$

Aus den Gl. (42) und (45) entnimmt man:

$$C_{1a} + C_{2a} = \frac{2 C_{1'}}{a} = \frac{2 C_1}{s}; \quad C_{1a} C_{2a} = \frac{x C_1^2}{s} \quad (50)$$

mit den Lösungen:

$$C_{1a} = \frac{C_1}{s} \left( 1 + \sqrt{1 - x \frac{s}{q}} \right); \quad C_{2a} = \frac{C_1}{s} \left( 1 - \sqrt{1 - x \frac{s}{q}} \right) \quad (51)$$

und entsprechend aus den Gln. (43) und (47):

$$C_{1b} = \frac{C_0}{q} \left( 1 + \sqrt{1 - y \frac{q}{u}} \right); \quad C_{2b} = \frac{C_0}{q} \left( 1 - \sqrt{1 - y \frac{q}{u}} \right) \quad (52)$$

Nach Ermittlung der Umrechnungsformeln benötigt man die direkte Berechnung des Filters aus den Grenzfrequenzen  $f_2$  und  $f_1$ , den Polstellen und dem Abschlusswiderstand  $R_0$ . Dieselbe kann nach [5] erfolgen. Ohne Vernachlässigung lässt sich die Berechnung nach [6] durchführen, welcher Weg vorgezogen wird.

Für die gegebenen Grenzfrequenzen  $f_1$  und  $f_2$  ( $\omega_i = 2 \pi f_i$ ) wird eingeführt:

$$\begin{aligned} f_2^2 = f_0^2 \left( 1 + \frac{2 \delta}{f_0} \right); \quad f_1^2 = f_0^2 \left( 1 - \frac{2 \delta}{f_0} \right); \\ f_1^2 + f_2^2 = 2 f_0^2 \end{aligned} \quad (53)$$

Hierbei ist  $\delta$  näherungsweise der Abstand zwischen  $f_2$  und  $f_0$  sowie  $f_0$  und  $f_1$ . Für die Pole gilt:

$$f_{i\infty}^2 = f_0^2 \left( 1 + \frac{2 \delta}{f_0} q_i \right); \quad \frac{f_{i\infty}^2 - f_1^2}{f_{i\infty}^2 - f_2^2} = m_i^2 = \frac{q_i + 1}{q_i - 1} \quad (54)$$

Die Grössen  $q_i$  sind die auf  $\delta$  bezogenen ungefähren Abstände der Polstellen vom Filtermittelpunkt  $f_0$ . Es sind vier Pole möglich.

Entsprechend wird für die Nullstellen eingeführt:

$$f_{j\infty}^2 = f_0^2 \left( 1 + \frac{2 \delta}{f_0} r_j \right) \quad j = 2 \dots 5 \quad (55)$$



Gegeben sind die Werte  $f_{i\infty}$  und mit ihnen  $m_i$  und  $q_i$ . Es sei abgekürzt:

$$\begin{aligned} m_1 + m_2 + m_3 + m_4 &= A \\ m_1 m_2 + m_1 m_3 + m_1 m_4 + m_2 m_3 + m_2 m_4 + m_3 m_4 &= B \\ m_1 m_2 m_3 + m_1 m_2 m_4 + m_1 m_3 m_4 + m_2 m_3 m_4 &= C \\ m_1 m_2 m_3 m_4 &= D \end{aligned} \quad (56)$$

Für die Nullstellen gelten die Formeln:

$$\begin{aligned} r_3 &= -1; \quad r_5 = \frac{C-A}{C+A}; \\ r_3 + r_5 &= -\frac{2A}{C+A}; \quad r_3 r_5 = \frac{A-C}{C+A} \end{aligned} \quad (57)$$

$$\begin{aligned} r_2 &= \frac{D-1-\sqrt{B^2-4D}}{1+B+D}; \quad r_4 = \frac{D-1+\sqrt{B^2-4D}}{1+B+D}; \\ r_2 + r_4 &= \frac{2(D-1)}{1+B+D}; \quad r_2 r_4 = \frac{1-B+D}{1+B+D} \end{aligned} \quad (58)$$

Man kann die Grössen  $r, s, p, q$  und  $t, u$  aus den Formeln (42), (43), (55), (57) und (58) berechnen, aber auch leicht die Endformeln aufstellen:

$$\begin{aligned} \omega_{3s}^2 + \omega_{5s}^2 &= r = 2\omega_0^2 \left[ 1 + \frac{\delta}{f_0} (r_3 + r_5) \right] = 2\omega_0^2 \left( 1 - \frac{2\delta}{f_0} \cdot \frac{A}{C+A} \right) \\ \omega_{3s}^2 \omega_{5s}^2 &= s = \omega_0^4 \left[ 1 - \frac{2\delta}{f_0} \cdot \frac{2A}{C+A} + \left( \frac{2\delta}{f_0} \right)^2 \cdot \frac{A-C}{C+A} \right] \end{aligned} \quad (59)$$

$$\begin{aligned} \omega_{2s}^2 + \omega_{4s}^2 &= p = 2\omega_0^2 \left( 1 + \frac{2\delta}{f_0} \cdot \frac{D-1}{1+B+D} \right) \\ \omega_{2s}^2 \omega_{4s}^2 &= q = \omega_0^4 \left[ 1 + \frac{2\delta}{f_0} \cdot \frac{2(D-1)}{1+B+D} + \left( \frac{2\delta}{f_0} \right)^2 \cdot \frac{1-B+D}{1+B+D} \right] \end{aligned} \quad (60)$$

$$\begin{aligned} \omega_{2p}^2 + \omega_{4p}^2 &= \omega_{5s}^2 + \omega_{2s}^2 = t = 2\omega_0^2 \left( 1 + \frac{2\delta}{f_0} \cdot \frac{C}{C+A} \right) \\ \omega_{2p}^2 \omega_{4p}^2 &= \omega_{5s}^2 \omega_{2s}^2 = u = \omega_0^4 \left[ 1 + \frac{2\delta}{f_0} \cdot \frac{2C}{C+A} + \left( \frac{2\delta}{f_0} \right)^2 \cdot \frac{C-A}{C+A} \right] \end{aligned} \quad (61)$$

Das Filter sei mit dem Widerstand  $R_0$  abgeschlossen. Hierfür liefern die Gln. (38) bei der Frequenz  $f_0$ :

$$(-\bar{X}_1 \bar{X}_2)_{\omega=\omega_0} = \frac{1}{\omega_0^2 C_1 C_0} = R_0^2 \quad (62)$$

Ausserdem gilt:

$$\sqrt{\frac{C_0}{C_1}} = k = \frac{A+C}{1+B+D} \quad (63)$$

so dass für die Kapazitäten  $C_1$  und  $C_0$  folgt:

$$C_1 = \frac{1}{k \omega_0 R_0}; \quad C_0 = \frac{k}{\omega_0 R_0} \quad (64)$$

Die Grössen  $x$  und  $y$  sind in einem weiten Bereich wählbar und können zur Auswahl geeigneter Elementwerte dienen, beispielsweise zur Angleichung der Kristallserienkapazitäten  $C_3'$  und  $C_2'$ . Man entnimmt den Gln. (32) und (36):

$$C_3' = C_1' \frac{\omega_{3s}'^2 (\omega_{1p}'^2 + \omega_{3p}'^2) - \omega_{1p}'^2 \omega_{3p}'^2 - \omega_{3s}'^4}{\omega_{3s}'^4} \quad (65)$$

$$C_2' = C_0' \frac{\omega_{2s}'^2 (\omega_{0p}'^2 + \omega_{2p}'^2) - \omega_{0p}'^2 \omega_{2p}'^2 - \omega_{2s}'^4}{\omega_{2s}'^4}$$

in welcher Form die Beziehungen (46) und (48) einzusetzen sind. Für die Betriebsdämpfung  $a_B$  gilt die Formel [5]:

$$\begin{aligned} e^{a_B} &= \sqrt{1+K^2}; \\ K &= \frac{2k}{k^2-1} \cdot \frac{Z(Z-r_2)(Z-r_4)(Z-r_5)}{(Z-q_1)(Z-q_2)(Z-q_3)(Z-q_4)} \end{aligned} \quad (66)$$

Von Interesse sind noch die Formeln:

$$\begin{aligned} \frac{C_3}{C_1} &= \frac{2\delta}{f_0} \cdot \frac{(1+r_2)(1+r_4)}{1+r_5}; \quad \frac{C_5}{C_1} = \frac{2\delta}{f_0} \cdot \frac{(r_5-r_2)(r_4-r_5)}{1+r_5} \\ \frac{C_2}{C_0} &= \frac{2\delta}{f_0} \cdot \frac{(1-r_2)(r_5-r_2)}{r_4-r_2}; \quad \frac{C_4}{C_0} = \frac{2\delta}{f_0} \cdot \frac{(r_4-r_5)(1-r_4)}{r_4-r_2} \end{aligned} \quad (67)$$

die der gleichen Literaturstelle in [5] entnommen werden können.

Sie bestimmen die Herstellung des Filters mit zwei Kristallen je Brückenweig (Fig. 18). Zu beachten ist allerdings hierbei,

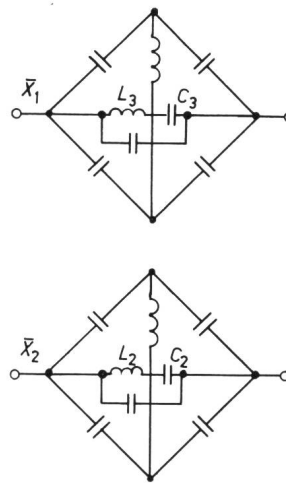


Fig. 19  
Der Anordnung Fig. 18 gleichwertige Schaltung bei der ein Kristall durch eine Brücke ersetzt wurde

dass ein direkter Vergleich nicht möglich ist, da die Anordnung in Fig. 16 Spulen enthält, deren Verlustwinkel die Bandbreite nach unten einschränkt. Man kann je einen Kristall in den Zweigen der Fig. 18 durch eine Anordnung gemäss Fig. 7 ersetzen, wie dies Fig. 19 zeigt. Jetzt unterliegen die gleichwertigen

Anordnungen 16 und 19 gleichen Einschränkungen durch die Spulenverluste.

Beispiel:

Für den Entwurf eines gewünschten Dämpfungsverlaufes kann man nach dem Aufsatz [6] vorgehen. Da hier nur der Rechnungsgang interessiert, seien die erforderlichen Werte vorgegeben. Es sei für ein Bandfilter mit stark unsymmetrischem Verlauf:

$$\begin{aligned} f_0 &= 1 \cdot 10^6 \text{ Hz} \quad \delta = 1 \cdot 10^4 \text{ Hz} \quad \frac{2\delta}{f_0} = 2 \cdot 10^{-2} \\ q_1 &= -2 \quad q_2 = 2 \quad q_3 = 3 \quad q_4 = 5 \quad R_0 = 1 \cdot 10^4 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_2 &= f_0 \sqrt{1 + \frac{2\delta}{f_0}} = 10^6 \sqrt{1,02} = 1,009\,950 \cdot 10^6; \\ f_1 &= 10^6 \sqrt{0,98} = 0,989\,949 \cdot 10^6 \end{aligned} \quad (68)$$

Nach den Gln. (54), (56), (57), (63) und (64) ist:

$$m_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577\,350; \quad m_2 = \sqrt{3} = 1,732\,051; \quad (69)$$

$$m_3 = \sqrt{2} = 1,414\,214; \quad m_4 = \frac{\sqrt{6}}{2} = 1,224\,745$$

$$\begin{aligned} A &= 4,948\,359; \quad B = 8,826\,464; \\ C &= 6,638\,958; \quad D = 1,732\,051 \end{aligned} \quad (70)$$

$$\begin{aligned} r_3 &= -1; \quad r_5 = 0,145\,901; \\ r_2 &= -0,665\,553; \quad r_4 = 0,792\,222 \end{aligned} \quad (71)$$



$$k = 1,002\,492; \quad \frac{2k}{k^2 - 1} = 401,8$$

$$C_1 = 15,876 \text{ pF} \quad (72)$$

$$C_0 = 15,955 \text{ pF}$$

Die Gln. (59) bis (61) liefern mit den Ergebnissen (70) bzw. (71):

$$r = 78,282\,466 \cdot 10^{12}; \quad s = 1531,831\,457 \cdot 10^{24}$$

$$p = 79,056\,848 \cdot 10^{12}; \quad q = 1562,165\,116 \cdot 10^{24} \quad (73)$$

$$z = 79,861\,602 \cdot 10^{12}; \quad u = 1594,355\,189 \cdot 10^{24}$$

Jetzt ist die Wahl der Grössen  $x$  und  $y$  zu treffen. Hierfür gibt es nun keine Anhaltspunkte. Schreibt man  $R_0$ ,  $C_3'$  und  $C_2'$  vor, um leicht herstellbare Kristalle zu erhalten, so kann man bei entsprechendem rechnerischen Vorgehen  $x$  und  $y$  bestimmen. Man kann natürlich auch  $x$  und  $y$  vorgeben und korrigieren.

Es sei:

$$x = 0,9; \quad y = 0,9 \quad (74)$$

Mit den Werten (72), (73) und (74) lassen sich die Grössen der Gln. (45) und (46) berechnen:

$$\omega_{3s}'^2 = 39,176\,639 \cdot 10^{12}; \quad a = 5,049\,937\,91;$$

$$C_1' = 81,760 \text{ pF} \quad (75)$$

$$\omega_{3s}' = 6,259\,124 \cdot 10^6$$

$$f_{3s}' = 0,996\,171 \cdot 10^6 \text{ Hz}$$

$$\omega_{1p}'^2 + \omega_{3p}'^2 = 86,026\,289 \cdot 10^{12}; \quad \omega_{1p}'^2 \omega_{3p}'^2 = 1835,168\,137 \cdot 10^{24} \quad (76)$$

und mit den gleichen Werten die Grössen der Gln. (48) und (49):

$$\omega_{2s}'^2 = 40,002\,605 \cdot 10^{12}; \quad b = 4,852\,940;$$

$$C_0' = 79,024 \text{ pF} \quad (77)$$

$$\omega_{2s}' = 6,324\,761 \cdot 10^6$$

$$f_{2s}' = 1,006\,617 \cdot 10^6$$

$$\omega_{0p}'^2 + \omega_{2p}'^2 = 87,104\,388 \cdot 10^{12}$$

$$\omega_{0p}'^2 \omega_{2p}'^2 = 1884,065\,875 \cdot 10^{24} \quad (78)$$

Schliesslich liefern die Gln. (51) und (52):

$$C_{1a} = 21,74 \text{ pF}; \quad C_{2a} = 10,64 \text{ pF} \quad (79)$$

$$C_{1b} = 21,88 \text{ pF}; \quad C_{2b} = 10,69 \text{ pF}$$

und mit den Werten (76) und (78) ermitteln sich die Kristallserienkapazitäten aus den Gln. (65) bzw. (32) und (39):

$$C_3' = 1,298 \cdot 10^{-2} \text{ pF}; \quad C_2' = 0,633 \cdot 10^{-2} \text{ pF} \quad (80)$$

sowie die Parallelinduktivitäten Gln. (32) und (36):

$$L_1' = 0,261 \text{ mH}; \quad L_0' = 0,269 \text{ mH} \quad (81)$$

Das Verhältnis der Kristallserienkapazitäten ist:

$$C_3' : C_2' = 2 \quad (82)$$

Die Kristalle lassen sich leicht durch Schwingquarze darstellen. Mit den Gln. (75), (77), (79) und (80) sind alle Elemente der Schaltung in Fig. 16 berechnet. Den Betriebsdämpfungsverlauf gibt Fig. 20 nach den Gln. (66) wieder.

Für die Verhältnisse der Kristallserienkapazitäten der Brückenzweige Fig. 18 liefern die Gln. (67):

$$C_3 : C_5 : C_2 : C_4 = 5,7 : 5,0 : 10,1 : 1,0 \quad (83)$$

Die Werte liegen bei Quarzen gerade an der Grenze des Herstellbaren. Diese Betrachtung wird noch in der parallelen Anwendung durch die Spulenverluste eingeschränkt. Der Vergleich ist nur für verlustlose Spulen einwandfrei.

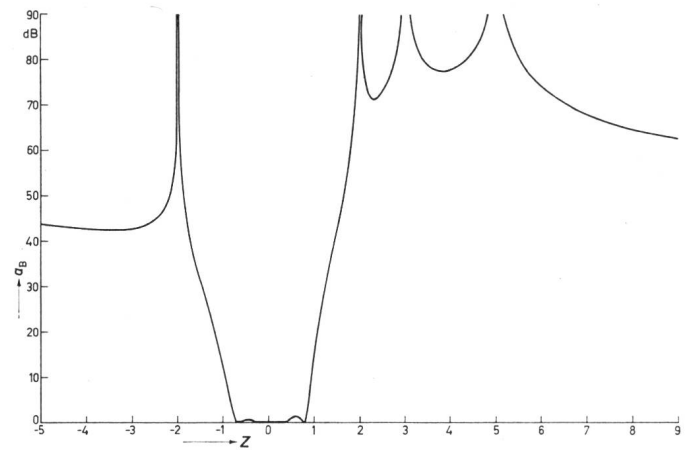


Fig. 20  
Dämpfungsverlauf des Bandfilters gemäss Fig. 16

## 6. Anwendungsmöglichkeiten des Brückenelementes

Bandfilter-Brückenschaltungen üblichen Aufbaus mit Kristallen allein haben immer die gleiche Anzahl von Serien- und Parallelresonanzstellen (schmale Filter). Nimmt man eine Induktivität in Serie oder parallel dazu, so überwiegt jeweils eine Art der Resonanzstellen (breite Filter). Das vorliegende Beispiel in Fig. 16 und 17, hat gleiche Anzahl von Serien- und Parallelresonanzen, ist aber ein breites Filter. Lässt man die Brückenskapazitäten  $C_{1a}$ ,  $C_{2a}$  und  $C_{1b}$ ,  $C_{2b}$  weg und benutzt nur die Zweige  $X_1$  und  $X_2$ , so ergibt sich ein breites Filter, das eine Resonanzstelle weniger besitzt und damit eine Polstelle weniger und einen entsprechend ungünstigeren Dämpfungsverlauf. Die Brückenkondensatoren können als Differentialkondensatoren aufgebaut werden, so dass der Mehraufwand gering ist.

Abgesehen von der Erweiterung der Schaltungsmöglichkeiten, bietet die neue Anordnung eine Anpassung der Serienkapazitäten der Kristalle und zwar für beide Zweige getrennt, da die Grössen  $x$  und  $y$  in weiten Grenzen wählbar sind.

Kombinationen mit Brückenzweigen üblichen Aufbaus, wobei nur ein Zweig ein Brückenelement enthält, bieten weitere Möglichkeiten. Mit Brücken aus drei verschiedenen Elementen werden die Filter noch günstiger, doch sind nur grosse relative Bandbreiten herstellbar. Auch das Ersetzen eines Kristalls durch sein Brückenersatzbild in Fig. 7 bietet neue Anordnungen.

## Literatur

- [1a] W. Herzog: Zur Kettenschaltung von Kristallbrückenfiltern. Frequenz 17(1963), S. 233...244.
- [1b] W. Herzog: Crystal lattice filters in cascade. Frequency 3(1965)3/4, S. 391...404.
- [2a] W. Herzog: Der Brücke bedingt gleichwertige Schaltungen. Frequenz 15(1961), S. 391...404.
- [2b] W. Herzog: Circuits conditionally equivalent to a lattice circuit. Proc. IREE Australia 27(1966), S. 180...196.
- [2c] W. Herzog: Zur Umwandlung von Brückenschaltungen in  $\Pi$ - und T-Glieder. Frequenz 18(1964), S. 229...232.
- [2d] W. Herzog: The transformation of lattice networks into  $\Pi$ - and T-networks. Proc. IREE Australia 27(1966)12, S. 363...367.
- [3] W. Herzog: Zur Kettenschaltung symmetrischer Vierpole. NTZ 14(1961), S. 331...333.
- [4] W. Herzog: Symmetrische Vierpole. NTZ 14(1961)10, S. 502...511.
- [5] W. Herzog: Siebschaltungen mit Schwingkristallen. Braunschweig, Vieweg, 2. Auflage, 1962.
- [6] W. Herzog: Zur Berechnung der Brückenfilter. Frequenz 17(1963)4, S. 139...145.

## Adresse des Autors:

Prof. Dr. phil., Dr.-Ing. W. Herzog, Direktor des Institutes für Elektrotechnik der Universität Mainz, Joh.-Joachim-Becher-Weg 14, D - 6500 Mainz.