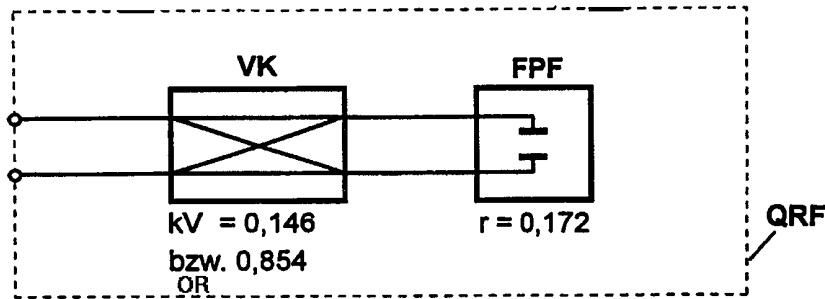




<p>(51) Internationale Patentklassifikation ⁶ : G02B 6/42, 5/20</p>	<p>A2</p>	<p>(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 99/10761</p> <p>(43) Internationales Veröffentlichungsdatum: 4. März 1999 (04.03.99)</p>
<p>(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE98/02575</p> <p>(22) Internationales Anmeldedatum: 21. August 1998 (21.08.98)</p> <p>(30) Prioritätsdaten: 197 37 450.6 22. August 1997 (22.08.97) DE</p> <p>(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten ausser US): HEINRICH-HERTZ-INSTITUT FÜR NACHRICHTENTECHNIK BERLIN GMBH [DE/DE]; Einsteinufer 37, D-10587 Berlin (DE).</p> <p>(72) Erfinder; und (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): BÜNNING, Helmut [DE/DE]; Grimmelshausenstrasse 10, D-14089 Berlin (DE).</p>	<p>(81) Bestimmungsstaaten: CA, JP, US, europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).</p> <p>Veröffentlicht <i>Ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts.</i></p>	

(54) Title: QUASI RECTANGULAR WAVE FILTER

(54) Bezeichnung: QUASI-RECHTECK-FILTER



(57) Abstract

The invention relates to a quasi rectangular wave filter for electromagnetic waves. One such quasi rectangular wave filter should have a flat amplitude characteristic, steep flanking filters and good signal suppression in the adjacent channel. According to the invention, the quasi rectangular wave filter is comprised of a coupling element with a coupling factor power output of $kV_{1,2} = (1/2)(1 \pm 1/\sqrt{2})$ or from $kV = 0,5$, said element being coupled to a resonance element via two lines which are equal in length.

(57) Zusammenfassung

Die Erfindung betrifft ein Quasi-Rechteck-Filter für elektromagnetische Wellen. Ein derartiges Quasi-Rechteck-Filter soll eine flache Durchlaßcharakteristik, steile Filterflanken und eine gute Signalunterdrückung im Nachbarkanal aufweisen. Das erfindungsgemäße Quasi-Rechteck-Filter besteht aus einem Koppelement mit einem Leistungskoppeffaktor von $kV_{1,2} = (1/2)(1 \pm 1/\sqrt{2})$ bzw. von $kV = 0,5$, das mit einem Resonanzelement über zwei gleichlange Leitungen verbunden ist.

LEDIGLICH ZUR INFORMATION

Codes zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

AL	Albanien	ES	Spanien	LS	Lesotho	SI	Slowenien
AM	Armenien	FI	Finnland	LT	Litauen	SK	Slowakei
AT	Österreich	FR	Frankreich	LU	Luxemburg	SN	Senegal
AU	Australien	GA	Gabun	LV	Lettland	SZ	Swasiland
AZ	Aserbaidschan	GB	Vereinigtes Königreich	MC	Monaco	TD	Tschad
BA	Bosnien-Herzegowina	GE	Georgien	MD	Republik Moldau	TG	Togo
BB	Barbados	GH	Ghana	MG	Madagaskar	TJ	Tadschikistan
BE	Belgien	GN	Guinea	MK	Die ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien	TM	Turkmenistan
BF	Burkina Faso	GR	Griechenland	ML	Mali	TR	Türkei
BG	Bulgarien	HU	Ungarn	MN	Mongolei	TT	Trinidad und Tobago
BJ	Benin	IE	Irland	MR	Mauretanien	UA	Ukraine
BR	Brasilien	IL	Israel	MW	Malawi	UG	Uganda
BY	Belarus	IS	Island	MX	Mexiko	US	Vereinigte Staaten von Amerika
CA	Kanada	IT	Italien	NE	Niger	UZ	Usbekistan
CF	Zentralafrikanische Republik	JP	Japan	NL	Niederlande	VN	Vietnam
CG	Kongo	KE	Kenia	NO	Norwegen	YU	Jugoslawien
CH	Schweiz	KG	Kirgisistan	NZ	Neuseeland	ZW	Zimbabwe
CI	Côte d'Ivoire	KP	Demokratische Volksrepublik Korea	PL	Polen		
CM	Kamerun	KR	Republik Korea	PT	Portugal		
CN	China	KZ	Kasachstan	RO	Rumänien		
CU	Kuba	LC	St. Lucia	RU	Russische Föderation		
CZ	Tschechische Republik	LI	Liechtenstein	SD	Sudan		
DE	Deutschland	LK	Sri Lanka	SE	Schweden		
DK	Dänemark	LR	Liberia	SG	Singapur		
EE	Estland						

Bezeichnung

Quasi-Rechteck-Filter

5 Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Quasi-Rechteck-Filter für elektromagnetische Wellen. Derartige Filter können sowohl als optische als auch als elektrische Filter ausgebildet sein.

10

Mit optischen Filtern können die Intensität (Neutralfilter wie z.B. Graufilter, Graukeile), die spektrale Zusammensetzung (Absorptionsfilter, Interferenzfilter wie z.B. Linienfilter, Kantenfilter, Wellenleiterfilter mit reflektierendem Fasergitter, AWG - arrayed waveguide grating) oder der Polarisationszustand (Polarisationsfilter) des Lichtes verändert werden. Diese Filter sind Schlüsselkomponenten in optischen Übertragungssystemen, die die WDM-Technik (wavelength division multiplexing) bzw. OFDM-Technik (optical frequency division multiplexing) anwenden. In optischen Netzen werden z.B. WDM-Filter auf Schmelzkoppler-Basis für die verlustarme Trennung bzw. Zusammenführung von WDM-Signalen und in optischen Direktempfängern werden durchstimmbare Filter, wie Fabry-Perot-Filter, für die Frequenzselektion von OFDM-Signalen und zur Unterdrückung der ASE (amplified spontaneous emission - Lichtauschen) aus optischen Faserverstärkern eingesetzt.

25

Die derzeit zur Verfügung stehenden Filter sind in ihrer Selektionswirkung begrenzt und ihre Filtereigenschaften sind durch das verwendete Aufbauprinzip weitgehend festgelegt.

30 In der „NTZ - Nachrichten Technische Zeitschrift“ 47(1994) Juni, No. 6, S. 418-422, wird über Fabry-Perot-Filter als abstimmbare optische Filter für Direktempfänger berichtet. In „Optical Fiber Communications Systems“, Leonid Kazovsky, Sergio Benedetto, Alan Willner, 1996 ARTECH HOUSE, ISBN 0-

89006-765-2, S. 646-648 ist die Funktionsweise eines solchen Fabry-Perot-Filters beschrieben.

Um eine hochselektive Filterung zu gewährleisten, müssen die Spiegel/Resonatorflächen derartiger Filter eine sehr gute Qualität aufweisen, d.h. der Leistungsreflexionsfaktor muß $\geq 0,95$ sein. Die Realisierung eines solchen Leistungsreflexionsfaktors und der mechanische Aufbau sind aber mit hohen Kosten verbunden.

Es ist Aufgabe der Erfindung, ein Quasi-Rechteck-Filter für elektromagnetische Wellen anzugeben, das sowohl kostengünstig herstellbar ist als auch die für ein periodisches Bandpaßfilter gewünschten Eigenschaften, wie flache Durchlaßcharakteristik, steile Filterflanken und eine gute Signalunterdrückung im Nachbarkanal, garantiert.

Die Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß ein Koppellement mit einem Leistungskopplfaktor von $kV_{1,2} = \frac{1}{2} \left(1 \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$ bzw. von $kV = 0,5$ über zwei gleichlange Leiter mit einem Resonanzelement verbunden ist.

Die erfindungsgemäßen optischen Quasi-Rechteck-Filter bestehen aus einem optischen 2x2-Koppler mit einem Leistungskopplfaktor von $kV_{1,2} = \frac{1}{2} \left(1 \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$ bzw. $kV = 0,5$, der über zwei gleichlange Lichtwellenleiter mit einem optischen Resonator, der eine Fabry-Perot-Leistungs-Übertragungsfunktion aufweist, verbunden ist.

Durch das Vorschalten eines optischen Kopplers, der im weiteren als Vorkoppler bezeichnet wird, vor den oben genannten optischen Resonator, werden die Übertragungseigenschaften des optischen Resonators überraschenderweise derart positiv beeinflusst, daß sich ein geändertes, neuartiges Übertragungsverhalten ergibt. Das erfindungsgemäße optische Quasi-Rechteck-Filter ist in seiner Funktion ein periodisches, bezüglich der optischen Frequenz, äquidistantes Quasi-Rechteck-Filter mit geringer

Durchlaß- und hoher Sperrdämpfung im Nachbarkanal bei sehr flachem Verlauf der Dämpfungen im Transmissions- und Reflexionsbereich und mit einer breiten quasilinear ansteigenden bzw. abfallenden Dämpfung im Frequenzbereich zwischen den Extremwerten.

5

Am oberen oder unteren Eingang des erfindungsgemäßen Quasi-Rechteck-Filters wird ein optisches Eingangssignal (komplexe Feldgröße) eingespeist, das in zwei um 90 Grad gegeneinander phasenverschobene und unterschiedlich gedämpfte Anteile aufgeteilt wird. Diese Signale gelangen über die beiden gleichlangen Wellenleiter zu einem optischen Resonator, der durch die Fabry-Perot-Übertragungsfunktion charakterisiert ist. Jedes der beiden Signale führt zu einer vom Resonator reflektierten und durch den Resonator transmittierten Welle. Diese vier Wellen laufen anschließend paarweise über die beiden gleichlangen Wellenleiter zum Vorkoppler zurück und überlagern sich dort bei gleichem Polarisationszustand konstruktiv und phasenrichtig, so daß sich am unteren und am oberen Ausgang zueinander komplementäre Leistungs-Übertragungsfunktionen mit Quasi-Rechteck-Charakteristik ergeben.

10

15

Die optischen Leistungsamplituden des optischen Quasi-Rechteck-Filters hängen vom Polarisationszustand des Lichtes, von den Leistungsverlusten und der Reflektivität der Spiegelgrenzflächen, den Leistungsverlusten im optischen Resonator und im Vorkoppler und auch von der Dämpfung der Lichtwellenleiter und der optischen Eingangsstecker ab. Die Frequenz-Abhängigkeit der Leistungs-Übertragungsfunktion wird durch die Längen und den Brechungsindex der Lichtwellenleiter im Resonanzpfad des optischen Resonators bestimmt.

20

25

In Ausgestaltungen der Erfindung mit eigener schutzwürdiger Bedeutung ist der optische Resonator einmal ein Fabry-Perot-Filter mit einem Leistungsreflexionsfaktor von $r = 3 - \sqrt{8} \cong 0,172$ oder zum anderen ein optischer 2x2-Koppler, im weiteren als Fabry-Perot-Koppler bezeichnet, mit zwei an den Enden des Längs- oder Kreuz-Pfades angeordneten idealen Spiegeln. Bei Anordnung der beiden Spiegel an den Enden des Längs-Pfades des Fabry-Perot-Kopplers weist dieser einen Leistungskoppelfaktor von

30

$k = 0,828$ auf, sind die beiden Spiegel an den Enden des Kreuz-Pfades des Fabry-Perot-Kopplers angeordnet, beträgt der Leistungskopplfaktor $k = 0,172$. Bei Vorgabe einer Mindestsperrdämpfung im Nachbarkanal von -20 dB ergeben sich rechnerisch die folgenden toleranzbehafteten Leistungskopplfaktoren: $k = 0,828 \pm 0,045$ und $k_V = 0,854 \pm 0,035$. Die Spiegel sind entweder aus dielektrischen Schichten an den Endflächen des Substrats gebildet (beispielsweise durch Bedampfung der Endflächen des Wafers) oder Metall-Spiegel, die in vorgeätzten Schlitzten an den Enden des Resonanzpfades angeordnet sind, oder sind Bragg-Gitter, die z.B. beim Aufbau in integrierter Technik in die Wellenleiter eingeschrieben werden.

Anstelle der beiden Spiegel kann auch ein 3dB-Koppler mit einer ausgangsseitigen Lichtwellenleiterbrücke, ein Spiegelkoppler, eingesetzt werden. Dieser weist zwei reflektierende Eingänge auf, die entweder an den Enden des Längs- oder des Kreuzpfades angeschlossen werden können.

In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung kann der optische Resonator mit der gewünschten Fabry-Perot-Übertragungsfunktion auch aus zwei ausgangsseitig gebrückten 2x2-Kopplern aufgebaut werden, die eingangsseitig über eine Brücke in Reihe geschaltet sind. Die möglichen Leistungskopplfaktoren $k_{1/2} = 0,045$ oder $0,955$ können den Kopplern in beliebiger Kombination zugewiesen werden.

Die letzte Variante für einen Fabry-Perot-Resonator besteht aus zwei in Mach-Zehnder-Anordnung geschalteten 2x2-Kopplern mit vier Spiegeln an gleichlangen Leitern und einer Umwegleitung zwischen den beiden Kopplern.

Dem erfindungsgemäßen Prinzip zufolge, die hin- und rücklaufenden elektromagnetischen Wellen durch ein vorgeschaltetes Koppellement geeignet zu transformieren, wird jedem der o.g. Resonatoren ein 2x2-Koppler mit fest vorgegebenen Leistungs-Kopplfaktoren vorgeschaltet. Diese Anordnungen bilden dann die verschiedenen Ausführungsformen des Quasi-Rechteck-Filters.

Zwei weitere Funktionen können durch Temperaturänderung und einer damit verbundenen Brechungsindexänderung in den Lichtwellenleiter-Abschnitten realisiert werden: Die Abstimmung der Leistungsspektralfunktion in Abhängigkeit von der Frequenz bei konstanten Leistungsamplituden kann durch eine lokale Temperaturbeeinflussung der Wellenleiter im Resonanzpfad bewirkt werden. Bei den Filtern mit Vorkoppler kann die Umschaltung aus dem Reflexions- in den Transmissionsmodus, bezogen auf einen bestimmten Eingang und eine bestimmte Frequenz, durch einen Temperaturgradienten zwischen den beiden Wellenleitern zwischen dem Vorkoppler und dem optischen Resonator mit Fabry-Perot-Übertragungsfunktion erreicht werden. Somit sind die erfindungsgemäßen Filter auch als aktive Komponente - und damit noch flexibler - einsetzbar.

Das erfindungsgemäße optische Filter kann in seinen verschiedenen Ausführungsformen der Erfindung aus diskreten optischen Komponenten mit extrem kurzen Lichtwellenleitern und in kompakter gekapselter Bauweise oder in integriert optischer Bauweise aufgebaut werden. Ein besonderer Vorteil des integrierten Aufbaus liegt darin, daß die Lichtwellenleiter bei spannungsfreiem Aufbau und geringen Abmessungen polarisationshaltend sind, so daß die Unveränderlichkeit des Polarisationszustandes innerhalb des Filters gewährleistet ist. Außerdem lassen sich die Längen der Lichtwellenleiter hinreichend genau ($< \lambda/2$) festlegen, so daß die Bedingungen paarweise gleicher Längen der Lichtwellenleiter sowohl zwischen dem Vorkoppler und dem Fabry-Perot-Koppler als auch im Resonanzpfad zwischen dem Fabry-Perot-Koppler und den Spiegeln bzw. zwischen dem Fabry-Perot-Koppler und dem 3dB-Koppler mit Lichtwellenleiter-Brücke (Spiegelkoppler) erfüllbar sind.

Grundsätzlich können anstelle der optischen gleichartige elektrische Komponenten eingesetzt werden. Die optischen Koppler werden durch elektrische 3 dB- bzw. Richtkoppler ersetzt. An die Stelle der Spiegel treten entweder Kurzschlußkappen („short“ mit einem Spannungs-Reflexionsfaktor $r = -1$) oder offene Ausgänge („open“ mit $r = +1$). Der wesentliche Unterschied zum optischen Anwendungsgebiet besteht darin, daß die Übertragungseigenschaften des Filters durch die komplexe Spannungs-

Übertragungsfunktion (Betrag, Phase, Gruppenlaufzeit) gegeben ist. Dagegen wird die optische Feldgröße E hinter dem optischen Filter (durch die Fotodiode) in eine optische Leistung umgesetzt ($P_{\text{opt.}} = E \times E$ konjugiert komplex). Das bewirkt, daß hier die Übertragungseigenschaften des Filters durch die optische Leistungs-Übertragungsfunktion beschrieben werden müssen. Außerdem entfällt im elektrischen Bereich die Problematik der Aufrechterhaltung des Polarisationszustandes der Welle. Im optischen Bereich wird die volle Funktionsfähigkeit des optischen Filters nur gewährleistet, wenn die interferometrische Überlagerung der Teilwellen nicht durch Polarisationschwankungen gestört wird.

Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben bzw. werden nachfolgend zusammen mit der Beschreibung bevorzugter Ausführungsformen der Erfindung anhand der Zeichnungen näher erläutert.

Dabei zeigen:

- Fig. 1 ein erstes prinzipielles Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Quasi-Rechteck-Filters (QRF) als optisches Filter;
- Fig. 2 die Abhängigkeit des Leistungstransmissionsfaktors von der optischen Frequenz für ein bekanntes Fabry-Perot-Filter und die Leistungsübertragungsfunktionen (LÜF) für das daraus gewonnene erfindungsgemäße Quasi-Rechteck-Filter gemäß Fig. 1 im Vergleich;
- Fig. 3 Betrag und Gruppenlaufzeit (gestrichelt) für die Feldgröße E am Ausgang des Quasi-Rechteck-Filters über der optischen Frequenz;
- Fig. 4 ein zweites Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Quasi-Rechteck-Filters mit Fabry-Perot-Koppler;
- Fig. 5 ein drittes Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Quasi-Rechteck-Filters mit Fabry-Perot-Koppler und Spiegelkoppler;
- Fig. 6 ein viertes Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Quasi-Rechteck-Filters mit zwei eingangsseitig in Reihe geschalteten, ausgangsseitig gebrückten optischen Kopplern;
- Fig. 7 ein fünftes Ausführungsbeispiel für ein steiles Quasi-Rechteck-Filter bestehend aus einem Vorkoppler und zwei Mach-Zehnder-Kopplern mit

je zwei Spiegeln, die über paarweise unterschiedlich lange Lichtwellenleiter mit den Kopplern verbunden sind;

Fig. 8 Leistungsübertragungsfunktionen (Transmission gestrichelt) in Abhängigkeit von der optischen Frequenz für das Quasi-Rechteck-Filter nach Figur 7;

5

Fig. 9 Betrag und Gruppenlaufzeit (gestrichelt) für die Feldgröße E am Ausgang des Quasi-Rechteck-Filters gemäß Figur 7 über der optischen Frequenz;

Fig. 10 ein sechstes Ausführungsbeispiel für ein Quasi-Rechteck-Filter bestehend aus einem Vorkoppler und zwei Mach-Zehnder-Kopplern mit insgesamt vier Spiegeln, die über gleich lange Lichtwellenleiter mit den beiden Kopplern verbunden sind;

10

Fig. 11 einen optischen Muxer/Demuxer unter Verwendung von zwei erfindungsgemäßen Quasi-Rechteck-Filtern;

15

Fig. 12 eine optische Schaltung mit zwei über eine Lichtwellenleiterbrücke in Reihe geschalteten erfindungsgemäßen Quasi-Rechteck-Filtern;

Fig. 13 den Kurvenverlauf des Leistungstransmissionsfaktors der optischen Schaltung gemäß Fig. 12 in Abhängigkeit von der Lichtwellenlänge;

Fig. 14 eine optische Schaltung mit zwei über einen optischen Isolator in Reihe geschalteten erfindungsgemäßen Quasi-Rechteck-Filtern;

20

Fig. 15 den Kurvenverlauf des Leistungstransmissionsfaktors der optischen Schaltung gemäß Fig. 14 in Abhängigkeit von der Lichtwellenlänge;

Fig. 16 ein Ausführungsbeispiel eines elektrischen Quasi-Rechteck-Filters analog zum optischen Quasi-Rechteck-Filter nach Figur 4 in Mikrostrip-Technik;

25

Fig. 17 ein Ausführungsbeispiel eines elektrischen Quasi-Rechteck-Filters analog zum optischen Quasi-Rechteckfilter nach Figur 7 in Mikrostrip-Technik;

Fig. 18 Betrag der elektrischen Spannungsübertragungsfunktion und Gruppenlaufzeit für das Quasi-Rechteck-Filter analog zu Figur 7 über der elektrischen Frequenz.

30

In Fig. 1 ist ein optisches Quasi-Rechteck-Filter dargestellt, das erfindungsgemäß aus einem 2x2-Koppler **VK** mit Leistungskoppelfaktoren von

$kV_{1,2} = \frac{1}{2} \left(1 \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$ und einem dem 2x2-Koppler **VK** nachgeschalteten Fabry-Perot-Filter **FPF** besteht. Das Fabry-Perot-Filter **FPF** weist qualitativ eine Fabry-Perot-Übertragungsfunktion und einen technisch ungebräuchlichen Leistungsreflexionsfaktor von $r = 3 - \sqrt{8}$ auf.

5

Fig. 2 zeigt im Vergleich die Leistungstransmissionsfaktoren eines bekannten Fabry-Perot-Filters (gestrichelte Linie unten) und des daraus abgeleiteten erfindungsgemäßen optischen Filters (durchgezogene Linie für Transmission, gestrichelte Linie oben für Reflexion) in Abhängigkeit von der optischen

10 Frequenz. Deutlich zu erkennen sind die Charakteristika des erfindungsgemäßen Filters, die durch Beeinflussen der ungebräuchlichen Übertragungseigenschaften des optischen Resonators mittels Vorschalten eines 2x2-Kopplers mit ebenfalls ungebräuchlichem Leistungskoeffizient verändert werden. Das erfindungsgemäße Filter ist ein periodisches, bezüglich

15 der optischen Frequenz, äquidistantes Quasi-Rechteck-Filter. Der relativ große lineare Wendepunkt-Bereich erlaubt eine verzerrungsarme FM-AM-Umsetzung (Frequenz-Modulation, Amplituden-Modulation) von modulierten Signalen. Außerdem kann das erfindungsgemäße optische Filter zur periodischen Unterdrückung von Lichtausbreitung Anwendung finden.

20

Fig. 3 zeigt den Betrag der optischen Feldgröße **E** und die Gruppenlaufzeit vor der Leistungsbildung durch eine Fotodiode. Die Flanken des Betrages der Feldgröße **E** verlaufen über der optischen Frequenz nicht so steil wie die der optischen Leistung. Die steileren Flanken der Leistungsübertragungsfunktion

25 aus Fig. 2 beruhen darauf, daß die Feldgröße durch die Fotodiode quadriert wird ($P_{opt} = E \times E$ konjugiert komplex). Die Verzerrungen des Phasenverlaufs über der optischen Frequenz führen zu Verzerrungen der mittleren Gruppenlaufzeit (GLZ), die für die verzerrungsfreie Übertragung von schmalen Frequenzgruppen maßgebend ist. Die mittlere Gruppenlaufzeit wird durch die

30 Wellengeschwindigkeit in den Wellenleitern und deren Gesamtlänge bestimmt. In Fig. 4 ist eine weitere Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Filters dargestellt. Der bereits erwähnte Vorkoppler **VK** ist hier über zwei gleichlange Lichtwellenleiter **LWL_{1,2}** mit dem Fabry-Perot-Koppler **FPK**

verbunden, der aus einem optischen 2x2-Koppler mit einem Leistungskopplfaktor von $k = 1 - (3 - \sqrt{8})$ und zwei Spiegeln S_1 und S_2 an den Enden des Längs-Pfades besteht. Möglich ist auch eine Anordnung der Spiegel an den Enden des Kreuz-Pfades des Fabry-Perot-Kopplers **FPK**, der in diesem Fall einen Leistungskopplfaktor von $3 - \sqrt{8}$ besitzt. Der für die Transformation der Feldgröße-Übertragungsfunktionen des Fabry-Perot-Kopplers **FPK** zuständige vorgeschaltete 2x2-Koppler **VK** muß die bereits oben erwähnten Werte für den Leistungskopplfaktor $kV_{1,2} = \frac{1}{2} \left(1 \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$ aufweisen.

Ein derartig ausgebildetes Filter ist für einen „freien spektralen Bereich“ (fsr) bis 200 GHz geeignet, wenn beispielsweise die Kopplerzone des integrierten Kopplers minimal $lk = 0,5$ mm ist und die Gesamtlänge der Wellenleiter zu den Spiegeln $l = 0,5$ mm beträgt. Der „freie spektrale Bereich“ wird berechnet gemäß: $fsr = c_0 / n(lk + l)$, wobei c_0 die Lichtgeschwindigkeit und n der Brechungsindex der Lichtwellenleiter sind (z.B. für SiO_2 ist $n = 1,5$).

Durch eine örtlich gezielte Erwärmung der Wellenleiter im Resonanzpfad können der Brechungsindex und die Länge der Wellenleiter beeinflusst werden. Damit kann die Leistungsspektralfunktion geringfügig über der Wellenlänge abgestimmt werden.

In Fig. 5 ist eine Variante des erfindungsgemäßen optischen Filters dargestellt, in der anstelle der technisch aufwendig herstellbaren Spiegel ein Spiegelkoppler **SK** mit einer rechtsseitigen Lichtwellenleiter-Brücke **B_r** angeordnet ist. Die beiden linksseitigen Eingänge des Spiegelkopplers **SK** wirken bei $k = 0,5$ wie zwei Spiegel. Der „freie spektrale Bereich“ wird aber hierbei durch die Vergrößerung der wirksamen Resonatorlänge verkleinert; dieses Filter ist für einen „freien spektralen Bereich“ < 50 GHz geeignet. Die Lichtwellenleiter-Brücke **B_r** kann für die Steuerung des „freien spektralen Bereichs“ mittels Temperaturänderung (Änderung der optisch wirksamen Länge des Resonanzpfades) genutzt werden.

Fig. 6 zeigt ein Ausführungsbeispiel der Erfindung, bei dem das Fabry-Perot-Filter durch zwei optische 2x2-Koppler K_1 und K_2 ersetzt wird, die eingangsseitig mit einer Lichtwellenleiter-Brücke B_i (Länge b) in Reihe geschaltet und ausgangsseitig mit je einem Lichtwellenleiter gebrückt sind.

5 Diese Anordnung wirkt wie ein Fabry-Perot-Filter, wenn die Koppler unterschiedliche oder gleiche Leistungskoeffizienten von $k_{1/2} = 0,045$ bzw. $0,955$ aufweisen. Der vorgeschaltete 2x2-Koppler VK bewirkt auch hierbei die Transformation der Feldgrößen und damit die Generierung der Leistungsspektralfunktion des erfindungsgemäßen Quasi-Rechteck-Filters.

10 Dieser Vorkoppler VK besitzt einen Leistungskoeffizienten von $k_{1,2}^V = \frac{1}{2} \left(1 \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$. Der „freie spektrale Bereich“ dieser Ausführungsform der Erfindung berechnet sich bei einer Länge l_k der Kopplerzone aus $f_{sr} = c_0 / n \cdot (l + b + 2 \cdot l_k)$ und erreicht Werte von ≤ 50 GHz. Auch in dieser Ausführungsform kann die Temperatur der Brücken B_r und B_i verändert werden, wodurch die

15 Leistungsspektralfunktion geringfügig über der Wellenlänge abgestimmt werden kann.

Eine weitere Ausführungsform für ein Quasi-Rechteck-Filter mit noch steileren Flanken als das in Fig. 4 gezeigte besteht aus zwei in Mach-Zehnder-

20 Anordnung geschalteten 2x2-Kopplern K ($k = 0,25/0,75$) mit vier Spiegeln, einer Umwegleitung LU zwischen den Kopplern K und einem Vorkoppler VK ($k^V = 0,5$) gemäß Fig. 7. Das Filter besteht aus vier gekoppelten Resonatoren, von denen sich drei bei paarweise (Paar LA , Paar LB) gleichlangen Spiegelzuleitungen voneinander unterscheiden. Der „freie spektrale Bereich“

25 ergibt sich aus den Längen im kürzesten Resonanzpfad. Die Längen der Spiegelzuleitungen müssen auf jeder Kopplerseite bei $k = 0,25$ der folgenden Bedingung genügen: $LB/LA = 3 + LU/LA$. In diesem Fall verhält sich der „freie spektrale Bereich“ des kürzesten Resonanzpfades zu dem des längsten wie $3 : 1$ und zu dem des mittleren Resonanzpfades wie $2 : 1$. Für $k = 0,75$ ist LA

30 gegen LB auszutauschen, d.h., daß die längeren die Stelle der kürzeren Spiegelzuleitungen einnehmen und umgekehrt.

Dieses Filter ist bezüglich Transmissions- und Reflexions-Bereich etwas unsymmetrisch (Fig. 8, Transmission gestrichelt), läßt jedoch eine relativ große Koppelfaktor-Toleranz von beispielsweise $k = 0,25 \pm 0,06$ zu, wenn man von einer gerade noch tolerierbaren Reflexionsdämpfung im Transmissionsbereich von -20 dB ausgeht. Diese Eigenschaft ist für den Fall von Bedeutung, wenn
5 die Leistungs-Koppelfaktoren der optischen Koppler eine Frequenzabhängigkeit aufweisen sollten. Bei Wegfall des Vorkopplers wird aus der breiteren Transmissions-Übertragungsfunktion (Fig. 8) die komplementäre genauso breite Reflexions-Übertragungsfunktion (durchgezogene Linie).

10

In Figur 9 wird der Betrag und die Gruppenlaufzeit für die Feldgröße **E** des Quasi-Rechteck-Filters gemäß Figur 7 über der optischen Frequenz gezeigt. Die Gruppenlaufzeit weist Verzerrungen auf, die symmetrisch zur Mitte des Transmissionsbereiches liegen.

15

Das Filter gemäß Fig. 10 hat dieselbe Struktur wie das Filter nach Fig. 7. Das zuerst genannte Filter unterscheidet sich in drei Punkten vom zuletzt genannten: Der Leistungs-Koppelfaktor des Vorkopplers **VK** beträgt $k_V = 0,146$ bzw. $0,854$; die Mach-Zehnder-Koppler weisen beide entweder $k = 0,293$ bzw.
20 $k = 0,707$ (liefert die komplementäre Leistungs-Übertragungsfunktion) auf und die Spiegelzuleitungen sind gleichlang. Die Leistungs-Übertragungsfunktion ist mit der des Filters nach Fig. 4 identisch. Der „freie spektrale Bereich“ ist durch die identischen Längen der vier gekoppelten Resonatoren festgelegt. Da die vier Spiegelzuleitungen gleichlang sind, können diese durch geeignetes
25 Ausrichten der beiden Koppler ohne Krümmungen der Leiter auf eine Seite des Wavers geführt und dort in einem Arbeitsgang an einer Grenzfläche verspiegelt werden. Außerdem läßt sich der „freie spektrale Bereich“ durch Wahl der Umwegleitungslänge **LU** festlegen und gegebenenfalls durch Temperaturbeeinflussung feinabstimmen, ohne daß die Symmetrie der
30 Resonatoren beeinflusst wird. Ein Nachteil ist der höhere Aufwand gegenüber dem Aufbau nach Fig. 4 (ein Koppler, zwei Spiegel).

Zwei identische erfindungsgemäße Quasi-Rechteck-Filter **QRF** gemäß Fig. 1 sind in Fig. 11 als Bestandteil einer Muxer-/Demuxer-Anordnung dargestellt.

Dabei ist je ein optisches Filter **QRF** in je einem Verbindungspfad zwischen zwei 3dB-Kopplern K_{3dB} angeordnet. Werden nun beispielsweise eine Welle im Transmissionsbereich der Leistungsspektralfunktion T und eine Welle im Reflexionsbereich R auf den gezeichneten oberen Eingang gegeben, so erscheinen das T-Signal und das R-Signal verlustlos an getrennten Ausgängen (Demuxer). Durch die Vertauschung von Ein- und Ausgängen wird die Muxer-Funktion realisiert. Die Spektralfunktionen für die Transmission und die Reflexion sind identisch mit denen des erfindungsgemäßen Quasi-Rechteck-Filters **QRF**. Im Vergleich dazu wird bei einem einzelnen Quasi-Rechteck-Filter **QRF** der R-Anteil auf den Eingang reflektiert, der T-Anteil gelangt zum unteren Ausgang. Die beschriebene Anordnung zweier erfindungsgemäßer optischer Filter weist bei Erzeugung eines Temperaturgradienten zwischen dem oberen und unteren Verbindungspfad und der damit einhergehenden Brechzahländerung die Eigenschaft eines optischen Dämpfungsgliedes auf, wobei die T-Welle wegen der optischen Weglängendifferenz zwischen dem oberen und unteren Lichtwellenleiter vom unteren Transmissionsausgang **T 1** auf den oberen Transmissionsausgang **T 2** kontinuierlich übergeblendet werden kann. Ähnliches gilt für die R-Welle. Diese wird bei einer entsprechenden Temperaturänderung vom unteren linken Ausgang **R** auf den Eingang **E** übergeblendet (Spiegelfunktion).

Fig. 12 zeigt zwei identische Quasi-Rechteck-Filter **QRF** gemäß Fig. 1, die über eine Lichtwellenleiter-Brücke **Br** der Länge **lb** eingangsseitig in Reihe geschaltet sind. Diese Brücke **Br** bildet einen neuen Resonanzkreis über beide Quasi-Rechteck-Filter **QRF**, der die QRF-Leistungs-Übertragungsfunktion insbesondere an den Flanken verzerrt, so daß steilere Flanken entstehen.

Der Kurvenverlauf des Leistungstransmissionsfaktors der beschriebenen optischen Schaltung in Abhängigkeit von der optischen Wellenlänge ist in Fig. 13 im Vergleich zu der eines Einzelfilters dargestellt. Es ergeben sich zwei Typen von Steilwandfiltern, wenn die Bedingung $lb = m \cdot \lambda/4$ (m gerad- oder ungeradzahlig) erfüllt wird. Diese Bedingung kann durch eine Temperaturbeeinflussung der Brücke **Br** realisiert werden.

In Fig. 14 ist eine optische Schaltung mit zwei über einen optischen Isolator **Iso** in Reihe geschalteten erfindungsgemäßen Quasi-Rechteck-Filtern **QRF** dargestellt. Dieser optische Isolator **Iso**, der zwar eine erhöhte Dämpfung aufweist, entkoppelt beide Filter **QRF** voneinander, so daß sich stabile Filterformen unabhängig von der Länge des Lichtwellenleiters ausbilden. Wählt man die „freien spektralen Bereiche“ beider Teilfilter im Verhältnis von beispielsweise 11:1, so erhält man auch bei Wahl unterschiedlicher Koppelfaktoren für die Vorkoppler ($kV_1 = 0,146$ für Koppler 1 und $kV_2 = 0,854$ für Koppler 2) ein Kammfilter, von dem etwa vier Filterkurven mit maximaler Transmission genutzt werden können. Dies ist deutlich in dem in Fig. 15 dargestellten Kurvenverlauf des Leistungstransmissionsfaktors der optischen Schaltung gemäß Fig. 14 in Abhängigkeit von der optischen Lichtwellenlänge im Vergleich zum Kurvenverlauf eines Einzelfilters erkennbar. Die in Fig. 12 dargestellte optische Schaltung erlaubt auch die Erzeugung von Kammfiltern, wobei die Filterkurven an den Flanken aber verzerrt sind.

Die nachfolgend beschriebenen Ausführungsbeispiele für elektrische Quasi-Rechteck-Filter weisen jeweils einen Aufbau in Analogie zu entsprechenden optischen Filtern auf.

Für das in Fig. 16 gezeigte elektrische Quasi-Rechteck-Filter mit einem Aufbau analog zum optischen Filter nach Fig. 4 wird ein Aufbau-Vorschlag in Mikrostrip-Technik gezeigt. Um ein kompaktes Design zu erreichen, werden beide Richtkoppler in zwei Lagen mit einer „groundplane“ dazwischen orthogonal angeordnet. Die beiden exakt gleichlangen elektrischen Zuleitungen der Länge L vom ersten als Vorkoppler eingesetzten Richtkoppler ($kV = 0,854$ bzw. $0,146$) gelangen über zwei Durchstoßpunkte **D** zum zweiten als Resonator fungierenden Richtkoppler ($k = 0,828$), der entweder mit zwei „shorts“ oder zwei „opens“ abgeschlossen werden kann. Es ergeben sich je nach Abschlußart komplementäre Quasi-Rechteck-Filter-Übertragungsfunktionen.

Der Design-Vorschlag für das in Fig. 17 gezeigte elektrische Quasi-Rechteck-Filter mit einem Aufbau analog zum optischen Filter nach Fig. 7 zeigt einen möglichen Aufbau in Mikrostrip-Technik mit einer Abgleichmöglichkeit für den „freien spektralen Bereich“ mit Hilfe der Umweglänge **LU**. Das Quasi-Rechteck-Filter gemäß Fig. 17 weist einen Vorkoppler **VK** mit einem Leistungskopplfaktor $k_V = 0,5$ sowie zwei in Mach-Zehnder-Anordnung geschaltete Richtkoppler (Resonator) mit einem Leistungskopplfaktor $k = 0,25$ bzw. $0,75$ für beide Richtkoppler auf, wobei die Abschlußzuleitungen je Richtkoppler ungleich lang sind.

10

Ein weiteres (nicht dargestelltes) Ausführungsbeispiel eines elektrischen Quasi-Rechteck-Filters besitzt einen Aufbau analog zum Aufbau des optischen Filters nach Fig. 10. Der als Vorkoppler eingesetzte Richtkoppler besitzt einen Leistungskopplfaktor $k_V = 0,146$ bzw. $0,854$. Der Leistungskopplfaktor der als Resonator fungierenden Richtkoppler in Mach-Zehnder-Anordnung beträgt $k = 0,293$ bzw. $0,707$. Die Abschlußzuleitungen des Resonators sind gleichlang.

15

Die Spannungs-Übertragungseigenschaften des in Fig. 17 gezeigten Quasi-Rechteck-Filters werden durch den Betrag der Spannungstransmission und die Gruppenlaufzeit über der elektrischen Frequenz charakterisiert. Die Gruppenlaufzeit-Verzerrungen verlaufen symmetrisch zur Mitte des Transmissionsbereiches (s. Fig. 18).

20

Die Funktionsfähigkeit der einzelnen Ausführungsformen der elektrischen Filter konnte durch Experimente mit kommerziellen Richtkopplern nachgewiesen werden.

25

Patentansprüche

1. Quasi-Rechteck-Filter für elektromagnetische Wellen,
5 dadurch gekennzeichnet, daß
ein Koppellement mit einem Leistungskoppelfaktor von $kV_{1,2} = \frac{1}{2} \left(1 \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$ bzw.
von $kV = 0,5$ über zwei gleichlange Leitungen mit einem Resonanzelement
verbunden ist.
- 10 2. Filter nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, daß
dieses als optisches Filter ausgebildet ist, aufweisend einen optischen 2 x 2-
Koppler mit einem Leistungskoppelfaktor von $kV_{1,2} = \frac{1}{2} \left(1 \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$ bzw. von
15 $kV = 0,5$ (Vorkoppler), der über zwei gleichlange Lichtwellenleiter mit einem
eine Fabry-Perot-Leistungs-Übertragungsfunktion aufweisenden optischen
Resonator verbunden ist.
3. Filter nach Anspruch 2,
dadurch gekennzeichnet, daß
20 der optische Resonator mit Fabry-Perot-Übertragungsfunktion ein Fabry-Perot-
Filter (FPF) mit einem Leistungsreflexionsfaktor von $r = 3 - \sqrt{8}$ ist.
4. Filter nach Anspruch 2,
dadurch gekennzeichnet, daß
25 der optische Resonator mit Fabry-Perot-Übertragungsfunktion aus einem
optischem 2x2-Koppler und zwei idealen Spiegeln (S_1, S_2), die an den Enden
des Längs- oder Kreuz-Pfades angeordnet sind, gebildet ist.
5. Filter nach Anspruch 4,
30 dadurch gekennzeichnet, daß

die beiden Spiegel (S_1 , S_2), an den Enden des Längs-Pfades des optischen 2x2-Kopplers angeordnet sind, wobei der Leistungskopplfaktor $k = 1 - (3 - \sqrt{8}) = 0,828$ beträgt.

- 5 6. Filter nach Anspruch 4,
dadurch gekennzeichnet, daß
die beiden Spiegel (S_1 , S_2), an den Enden des Kreuz-Pfades des optischem 2x2-Kopplers angeordnet sind, wobei der Leistungskopplfaktor $k = 3 - \sqrt{8} = 0,172$ beträgt.

10

7. Filter nach Anspruch 4,
dadurch gekennzeichnet, daß
die Spiegel aus dielektrischen Schichten an den Endflächen des Substrats, auf dem die Komponenten angeordnet sind, gebildet sind.

15

8. Filter nach Anspruch 4,
dadurch gekennzeichnet, daß
die Spiegel als Metall-Spiegel ausgebildet und in vorgeätzten Schlitzen an den Enden des Resonanzpfades angeordnet sind.

20

9. Filter nach Anspruch 4,
dadurch gekennzeichnet, daß
anstelle der idealen Spiegel (S_1 , S_2) Bragg-Gitter vorgesehen sind.

25

10. Filter nach Anspruch 4 und 5 oder 6,
dadurch gekennzeichnet, daß
der optische Resonator mit Fabry-Perot-Übertragungsfunktion ein optischer 2x2-Koppler (FPK) mit einem Leistungskopplfaktor von $k_1 = 1 - (3 - \sqrt{8})$ (Längs-Pfad) bzw. $k_2 = 3 - \sqrt{8}$ (Kreuz-Pfad) ist, der mit einem 3dB-Koppler
30 mit rechtsseitiger Lichtwellenleiterbrücke (B_r), einem Spiegelkoppler (SK),
verbunden ist.

11. Filter nach Anspruch 2,
dadurch gekennzeichnet, daß
der optische Resonator mit Fabry-Perot-Übertragungsfunktion aus zwei
rechtsseitig gebrückten 2x2-Kopplern (K_1 , K_2) gebildet ist, die über eine
5 linksseitige Lichtwellenleiter-Brücke (B_1) miteinander verbunden sind, wobei die
Leistungskoeffizienten beider Koppler (K_1 , K_2) $k_{1/2} = 0,045$ bzw. $k_{1/2} = (1 -$
 $0,045)$ betragen, wobei $k_{1/2}$ gleich groß oder unterschiedlich groß sind.
12. Filter nach Anspruch 1,
10 dadurch gekennzeichnet, daß
der dem einen Leistungskoeffizienten von $k_V = 0,5$ aufweisenden Vorkoppler
nachgeordnete Resonator aus zwei in Mach-Zehnder-Anordnung geschalteten
2x2-Kopplern mit einem Leistungskoeffizienten von $k = 0,25$ bzw. $k = 0,75$ mit
vier Spiegeln mit paarweise unterschiedlich langen Zuleitungen besteht, die
15 eine Umwegleitung (LU) zwischen ihren oberen Anschlüssen aufweisen.
13. Filter nach Anspruch 2,
dadurch gekennzeichnet, daß
der dem einen Leistungskoeffizienten von $k_V = 0,146$ bzw. $k_V = 0,854$
20 aufweisenden Vorkoppler nachgeordnete Resonator aus zwei in Mach-
Zehnder-Anordnung geschalteten 2x2-Kopplern mit einem
Leistungskoeffizienten von $k = 0,293$ bzw. $k = 0,707$ mit vier Spiegeln mit
gleichlangen Zuleitungen besteht.
- 25 14. Filter nach Anspruch 12,
dadurch gekennzeichnet, daß
das Verhältnis der Längen der Spiegelzuleitungen der Bedingung
 $LB/LA = 3 + LU/LA$ genügt.
- 30 15. Filter nach mindestens einem der Ansprüche 2 bis 14,
dadurch gekennzeichnet, daß
je ein optisches Filter mit Quasi-Rechteck-Charakteristik (QRF) in je einem
Verbindungspfad zwischen zwei 3 dB-Kopplern (K_{3dB}) mit Muxer/Demuxer-
Funktion angeordnet ist.

16. Filter nach mindestens einem der Ansprüche 2 bis 15,
dadurch gekennzeichnet, daß
Mittel zur Einstellung einer Temperaturänderung an den Lichtwellenleiter-
Abschnitten zur Beeinflussung des Brechungsindex und der Leiterlänge im
5 Resonanzpfad und/oder Mittel zur Erzeugung eines Temperaturgradienten
zwischen den Zuleitungen zwischen dem Vorkoppler und dem optischen
Resonator vorgesehen sind.
- 10 17. Filter nach Anspruch 2,
dadurch gekennzeichnet, daß
zwei optische Filter (QRF) über eine Lichtwellenleiter-Brücke (Br)
eingangsseitig in Reihe geschaltet sind.
- 15 18. Filter nach Anspruch 2,
dadurch gekennzeichnet, daß
zwei optische Filter (QRF) über einen optischen Isolator (Iso) eingangsseitig in
Reihe geschaltet sind.
- 20 19. Filter nach mindestens einem der Ansprüche 2 bis 18,
dadurch gekennzeichnet, daß
das Filter aus diskreten optischen Komponenten in kompakter Bauweise mit
kurzen, gleichlangen Lichtwellenleitern aufgebaut ist.
- 25 20. Filter nach mindestens einem der Ansprüche 2 bis 16,
dadurch gekennzeichnet, daß
das Filter in integriert optischer Bauweise aufgebaut ist.
- 30 21. Filter nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, daß
dieses als elektrisches Filter ausgebildet ist, bei dem als Vorkoppler ein
Richtkoppler angeordnet ist und ein bzw. zwei Richtkoppler als
Resonanzelement angeordnet sind, wobei deren Ausgänge, abgesehen vom
Signalausgang, mit „shorts“ oder „opens“ abgeschlossen sind.

22. Filter nach Anspruch 21,
dadurch gekennzeichnet, daß
der Leistungskopplfaktor des als Vorkoppler angeordneten Richtkopplers
5 $k_V = 0,146$ bzw. $k_V = 0,854$ beträgt und ein Richtkoppler mit $k = 0,828$ bzw.
 $k = 0,172$ als Fabry-Perot-Resonator-Koppler mit zwei Abschlüssen jeweils am
Längs- oder Kreuzpfad des Resonators angeordnet ist.

23. Filter nach Anspruch 21,
10 dadurch gekennzeichnet, daß
der Vorkoppler einen Leistungskopplfaktor von $k_V = 0,5$ aufweist, die
Abschlußzuleitungen ungleich lang sind und der Leistungskopplfaktor der
beiden den Resonator bildenden Mach-Zehnder-Koppler $k = 0,25$ bzw. $k = 0,75$
beträgt.

15

24. Filter nach Anspruch 21,
dadurch gekennzeichnet, daß
der Vorkoppler einen Leistungskopplfaktor von $k_V = 0,146$ bzw. $k_V = 0,854$
aufweist, der Leistungskopplfaktor der beiden den Resonator bildenden
20 Mach-Zehnder-Koppler $k = 0,293$ bzw. $k = 0,707$ beträgt und die
Abschlußleitungen des Resonators gleichlang sind.

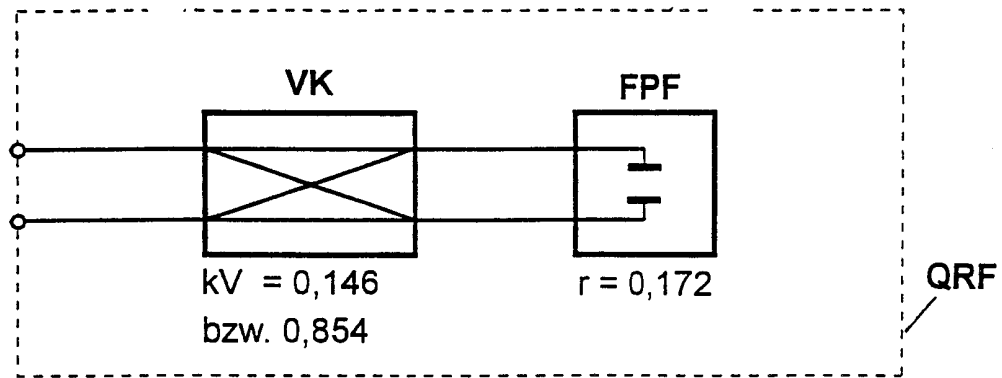


Fig. 1

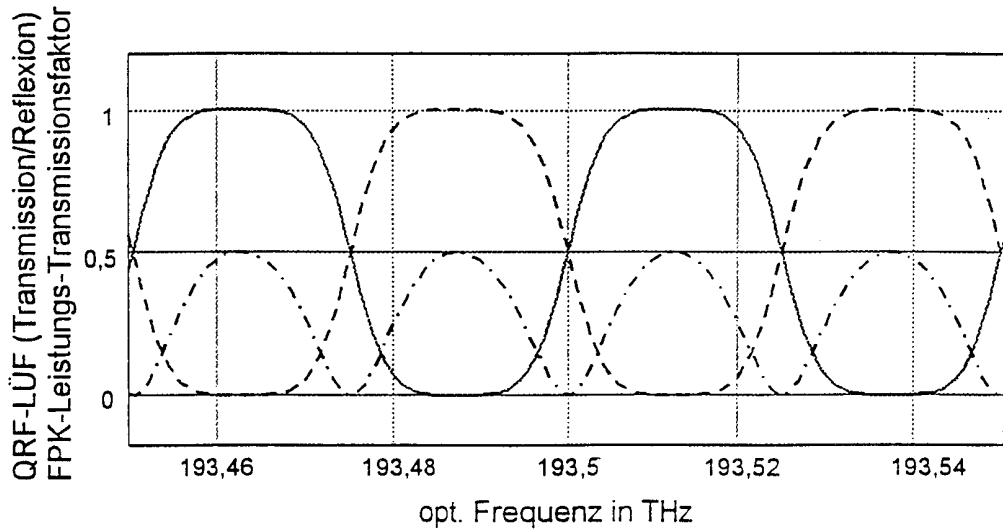


Fig. 2

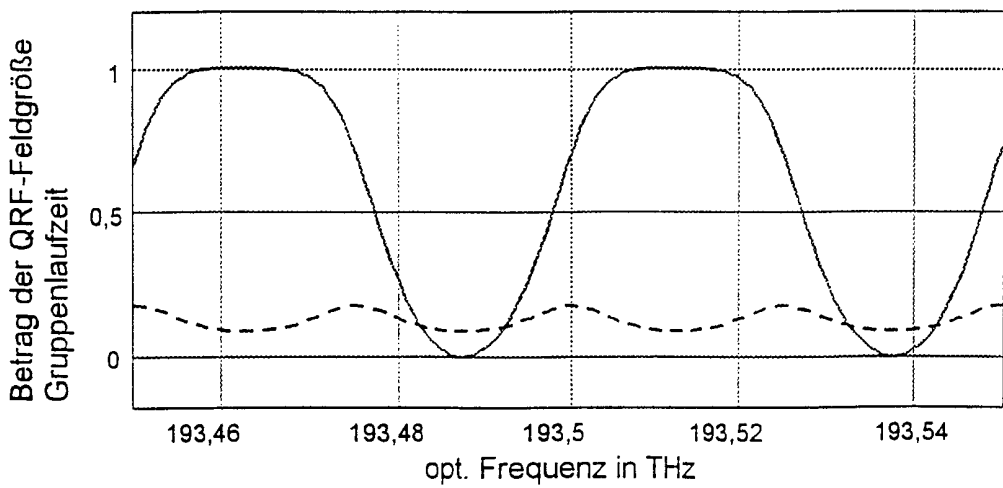


Fig. 3

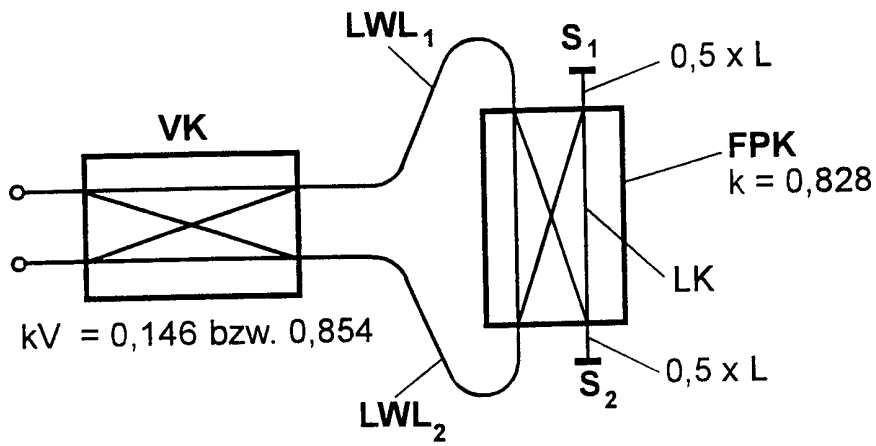


Fig. 4

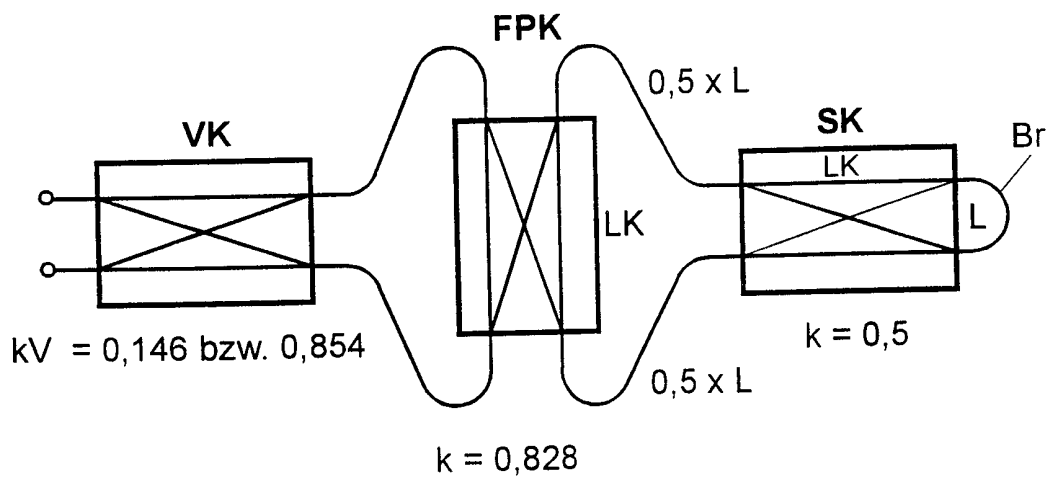


Fig. 5

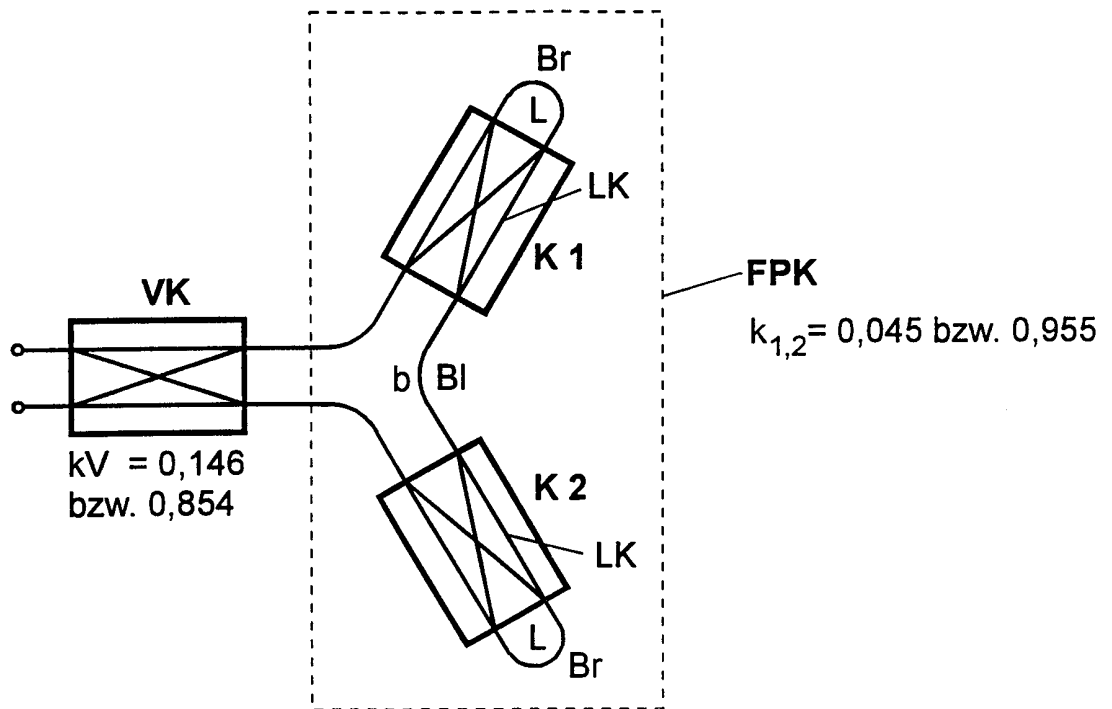


Fig.6

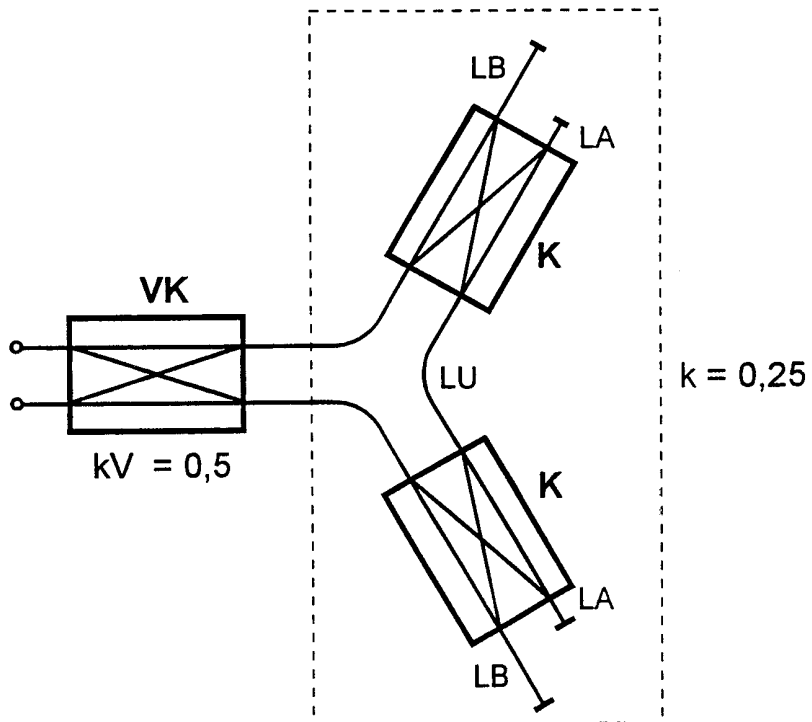


Fig. 7

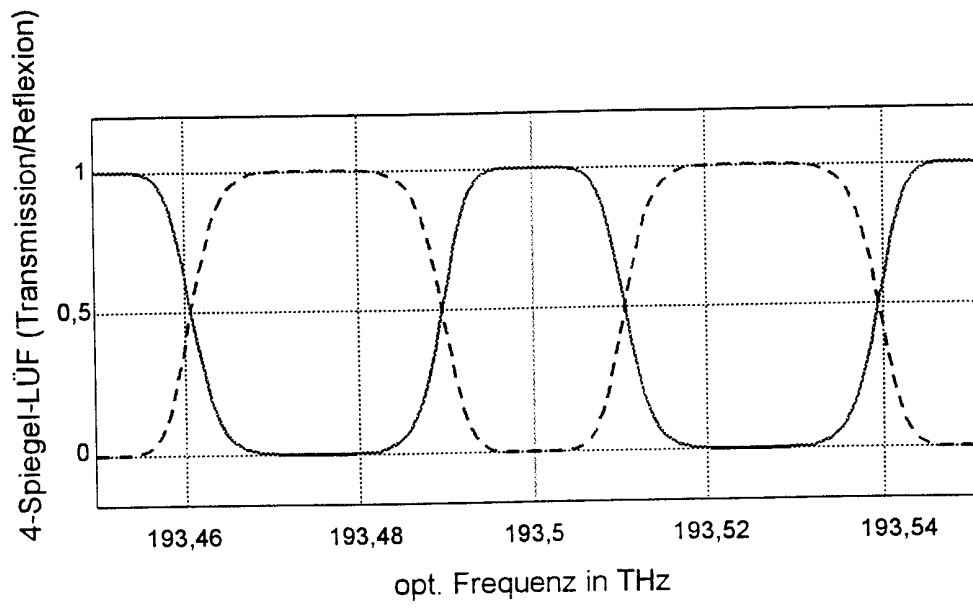


Fig. 8

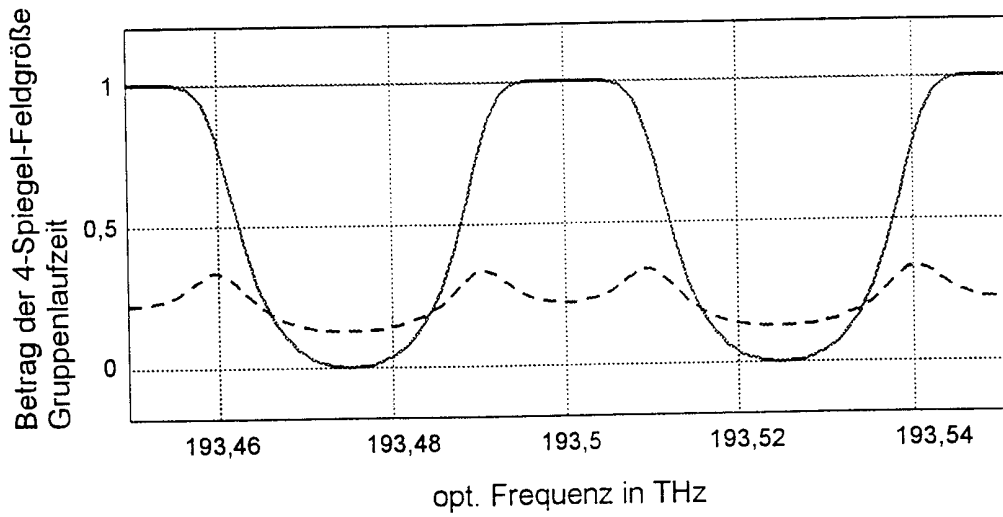


Fig. 9

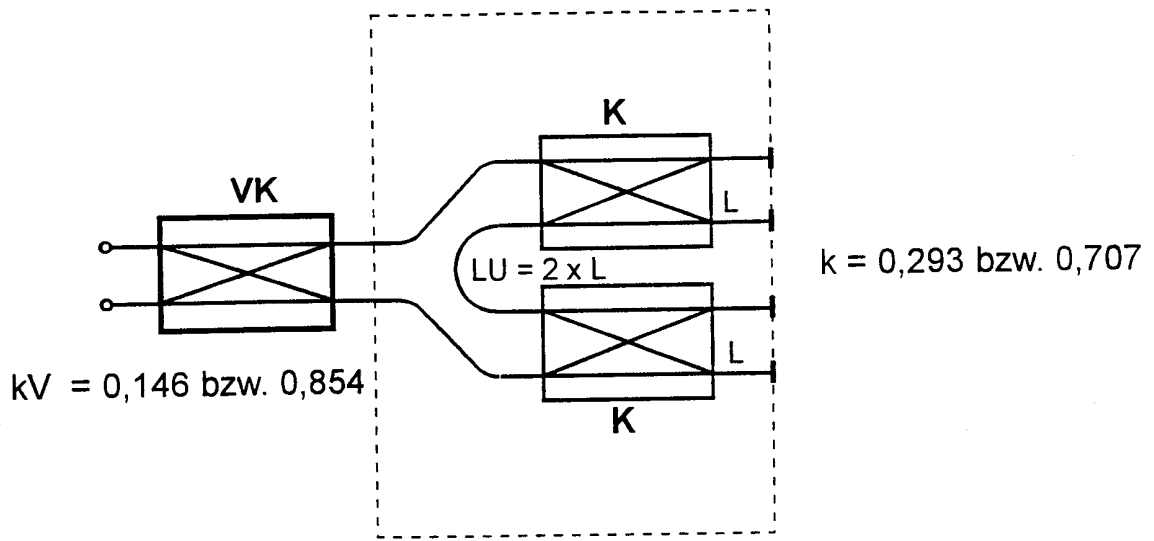


Fig. 10

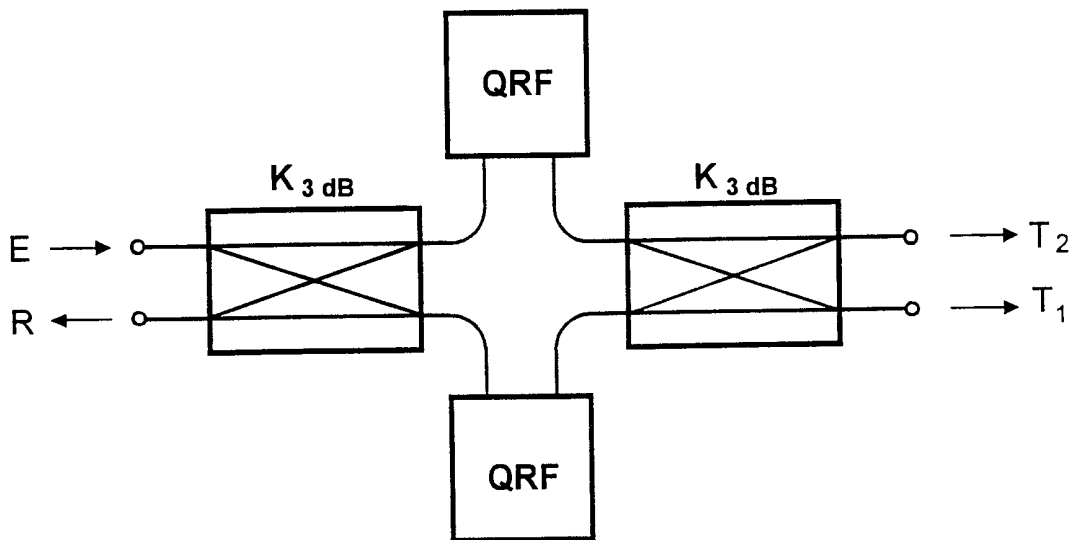


Fig. 11

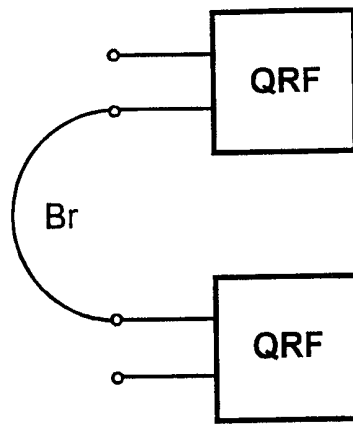


Fig. 12

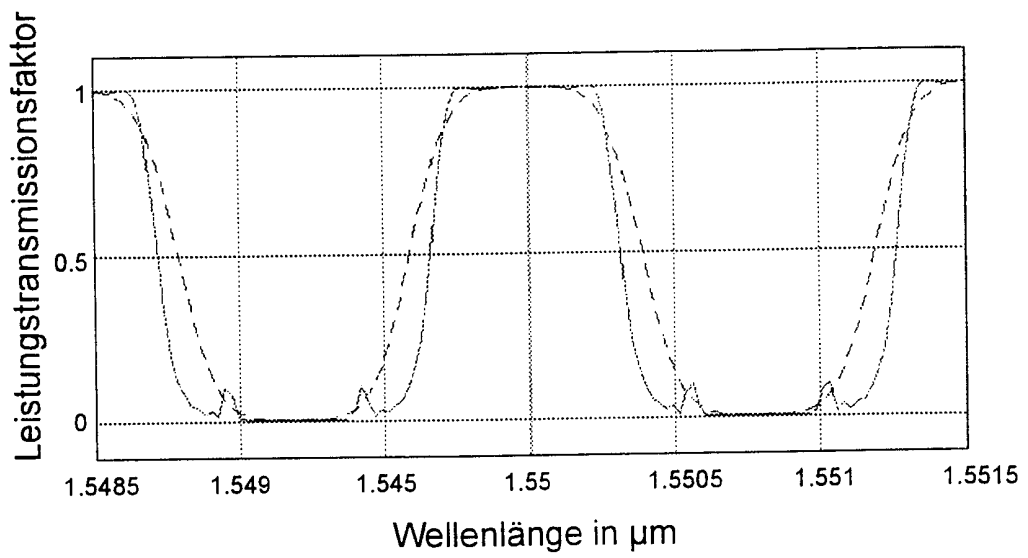


Fig. 13

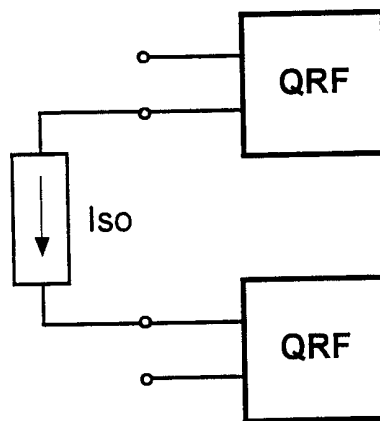


Fig. 14

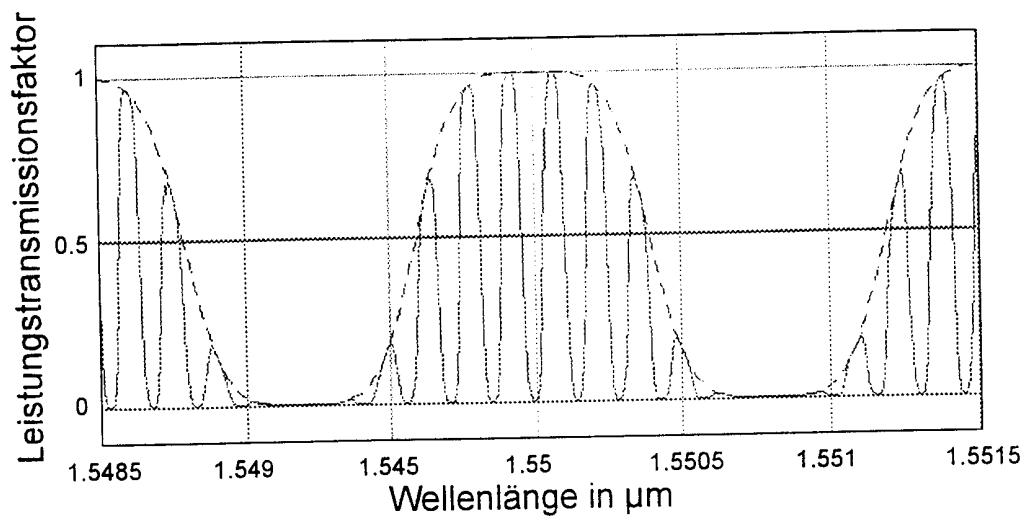


Fig. 15

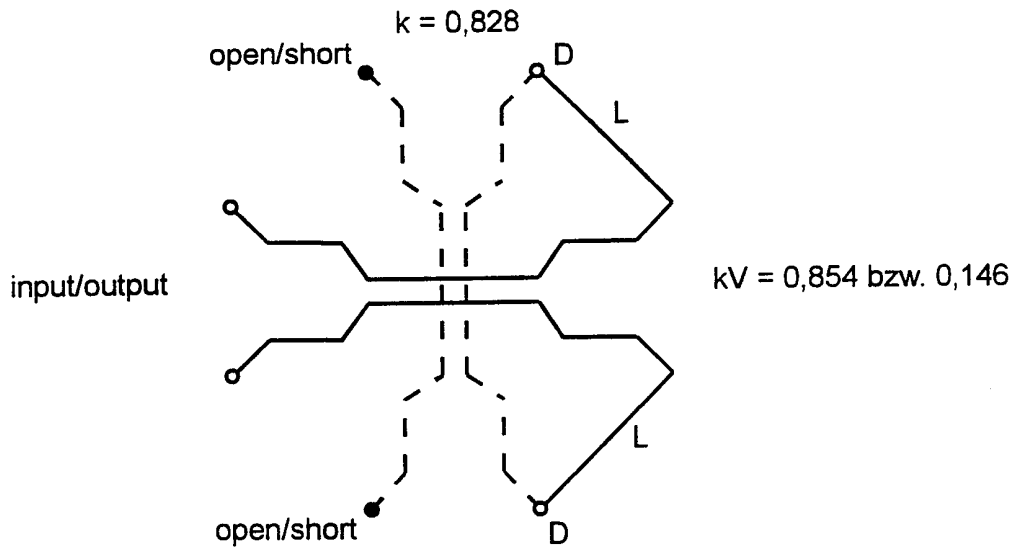


Fig. 16

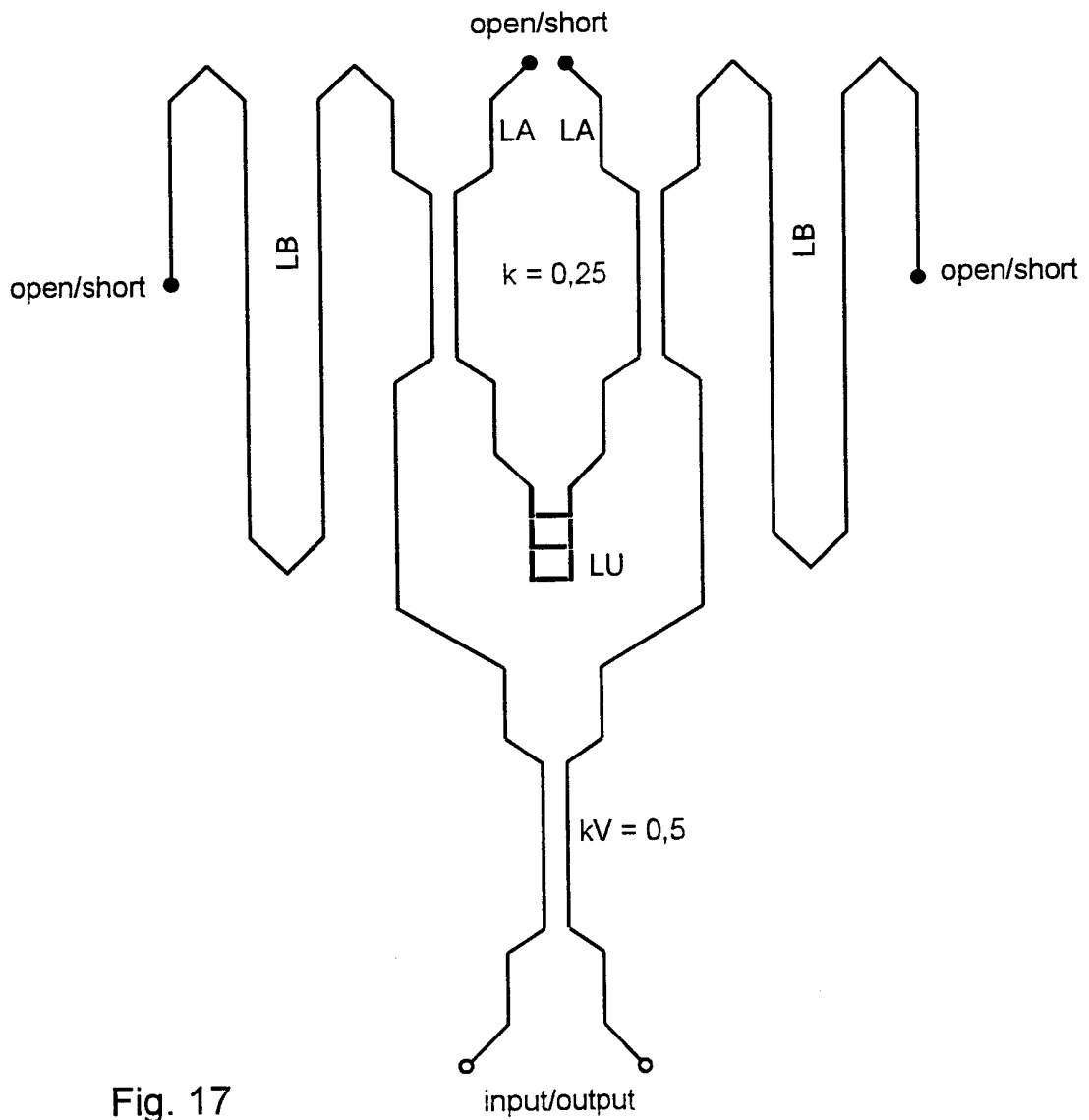


Fig. 17

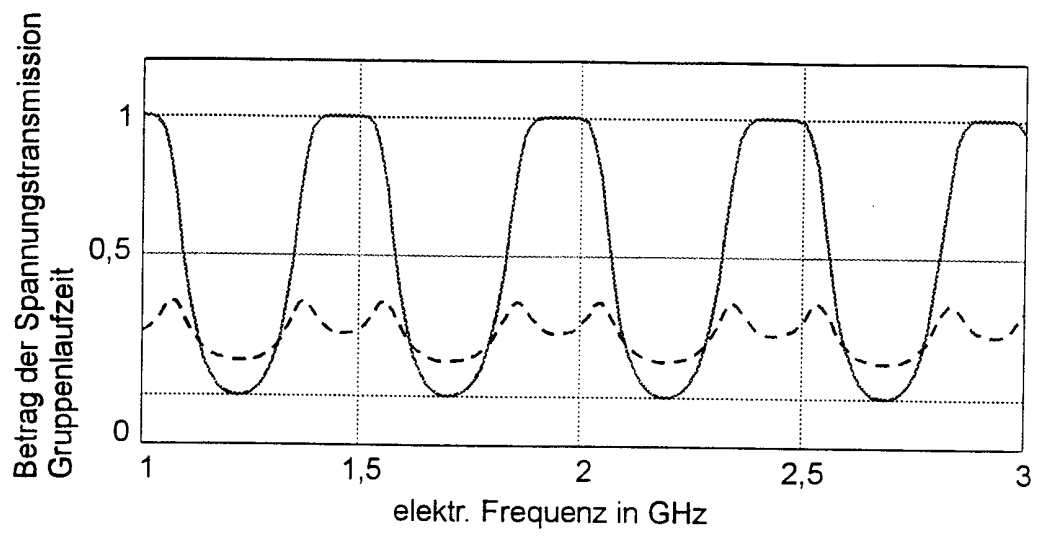


Fig. 18