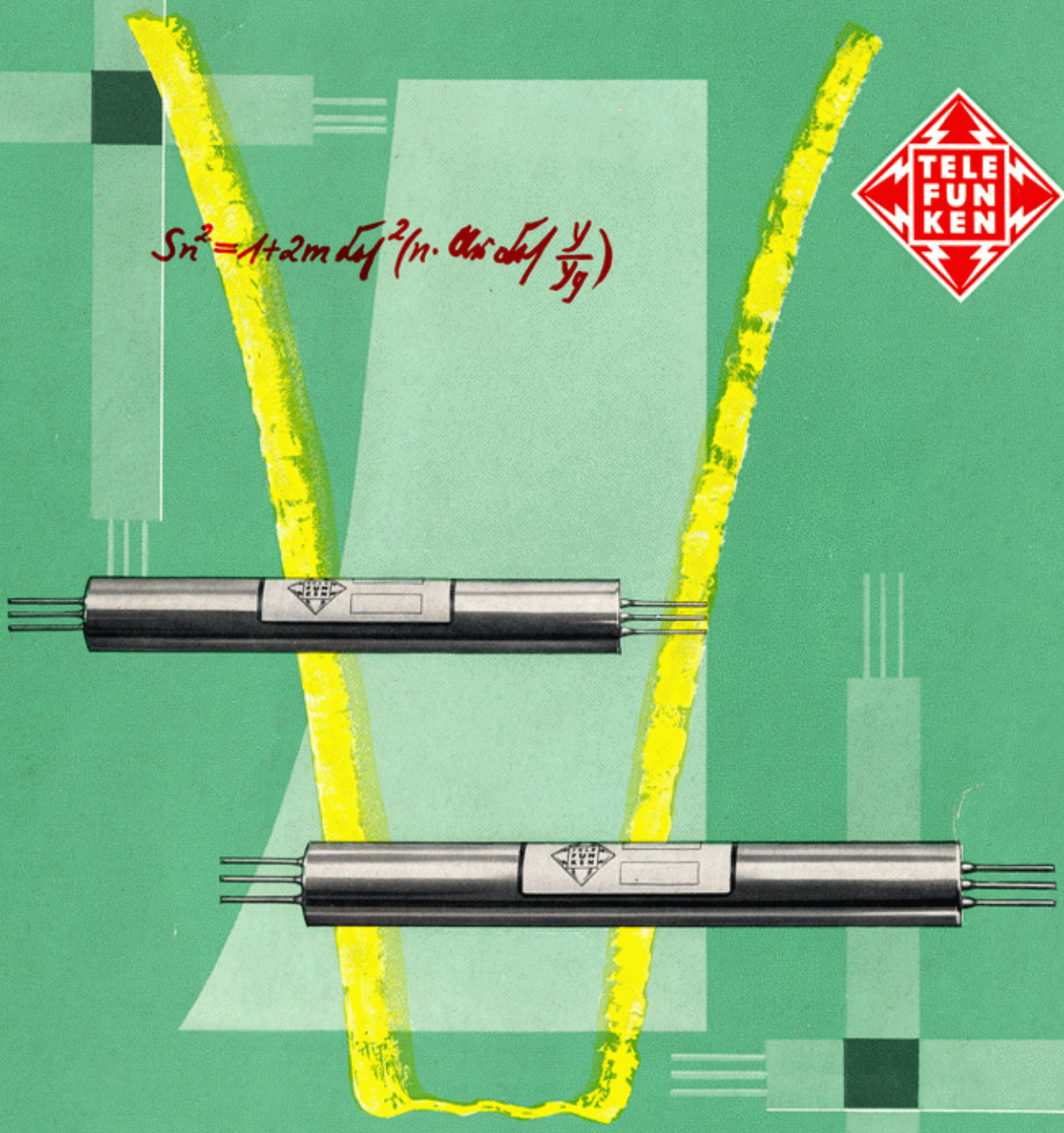
MECHANISCHE FILTER

für 473 und 525 kHz

$$S_n^2 = 1 + 2m \cos^2\left(n \cdot \arccos \frac{y}{y_g}\right)$$



TELEFUNKEN

Vervielfältigung und Nachdruck, auch auszugsweise,
bedürfen unserer Zustimmung

AH/Bs – V 300 628 41.10 Vo (Mo)

Allgemeines

Die starke Ausbreitung der drahtlosen Nachrichtenübermittlung hat eine immer dichter werdende Belegung des zur Verfügung stehenden Frequenzspektrums zur Folge. Moderne Funkgeräte, vor allem Empfänger, müssen daher hohen Selektionsforderungen genügen und mit Kreisen höchster Güte aufgebaut sein. Bisher benutzte man dazu in der Mehrzahl normale L-C-Filter, die man über Filterquarze miteinander koppelte und erreichte auf diese Weise bei gleicher Bandbreite höhere Flankensteilheit und hohe Weitabselektion.

Diese Quarzfilter sind jedoch, bedingt durch den großen Aufwand an Einzelelementen, voluminös und teuer. Man versuchte deshalb, die hohen Güten, die sich bei den mechanischen Resonanzen von Metallkörpern ergeben und die bis zu 100 mal höher sein können als die der besten elektrischen Kreise, auszunutzen und entwickelte sogenannte mechanische Filter, die in ihrer jetzt vorliegenden Form, bei noch besseren elektrischen Eigenschaften, bedeutend kleiner in ihren Abmessungen und relativ preiswerter als bisher übliche Spulen und Quarzfilter sind (s. Bild 1).

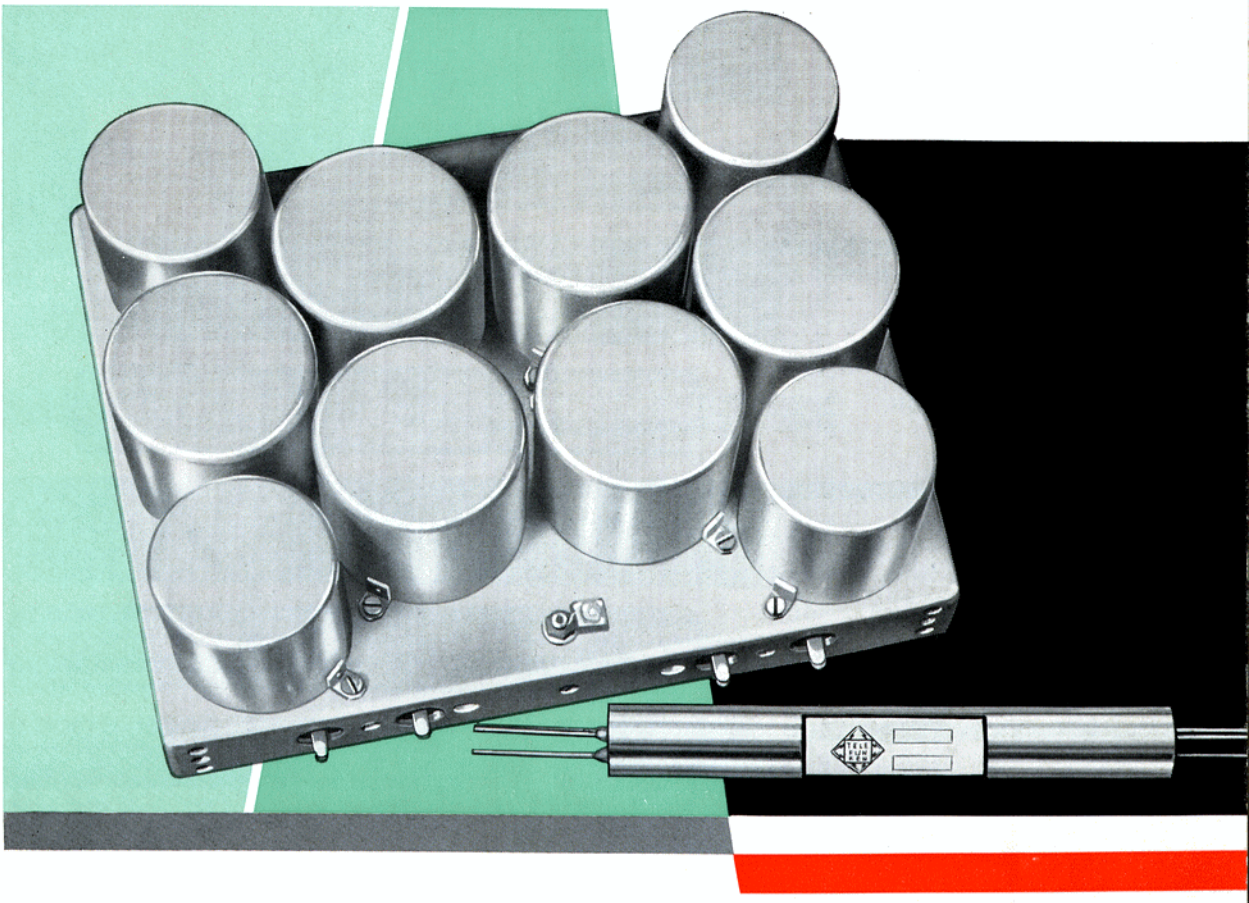


Bild 1 Maßstäblicher Größenvergleich eines Quarzbrückenfilters mit einem mechanischen Filter FZ 07 gleicher elektrischer Kennwerte

Mechanische Filter werden bei der Herstellung durch Beschleifen der Resonatoren des Schwingkörpers auf Mittenfrequenz und Bandbreite mit hoher Genauigkeit abgestimmt. Diese Abstimmung bleibt bei Einhaltung der mechanischen und elektrischen Vorschriften sehr konstant erhalten und läßt sich nachträglich im Betrieb nicht verändern. Aus diesem Grunde wurden mehrere Typen mit verschiedener Bandbreite und Mittenfrequenz entwickelt.
Für UKW-FM-Geräte gibt es ein Filter (FZ 01) mit einer Bandbreite von ± 18 kHz und einer Mittenfrequenz von 473 kHz. Für die AM-Technik sind im Bandbreitenbereich ± 0,1 bis ± 6 kHz, gleichmäßig abgestuft, 6 Filtertypen (FZ 04–09) mit der Mittenfrequenz 525 kHz lieferbar (s. Bild 2).
Der Typ FZ 06 wird bei gleicher Flankensteilheit mit um + oder — 1,7 kHz versetzter Mittenfrequenz auch als Einseitenbandfilter für das obere bzw. untere Seitenband geliefert. Die Typenbezeichnung lautet dann FE 01 bzw. FE 02.

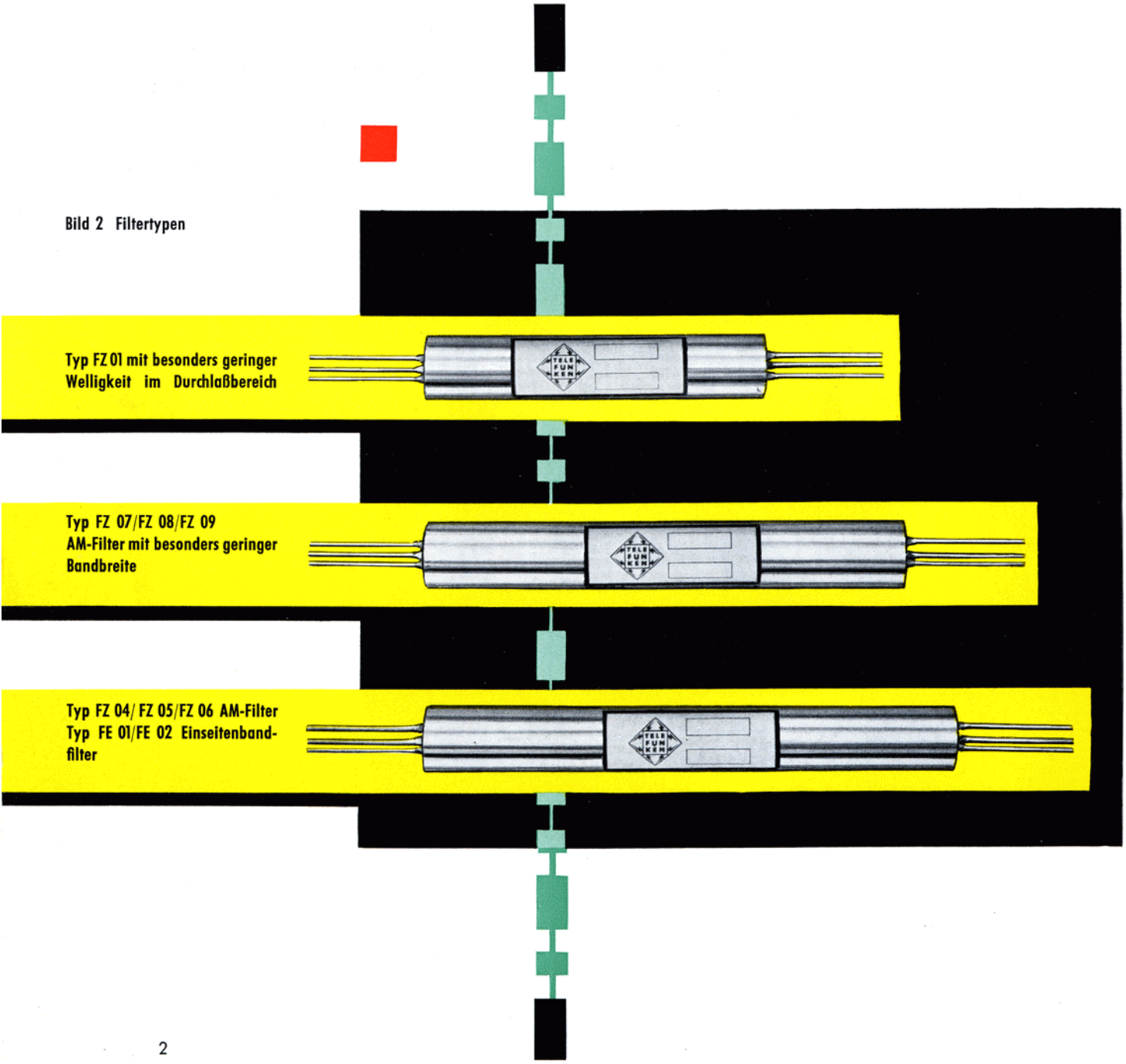
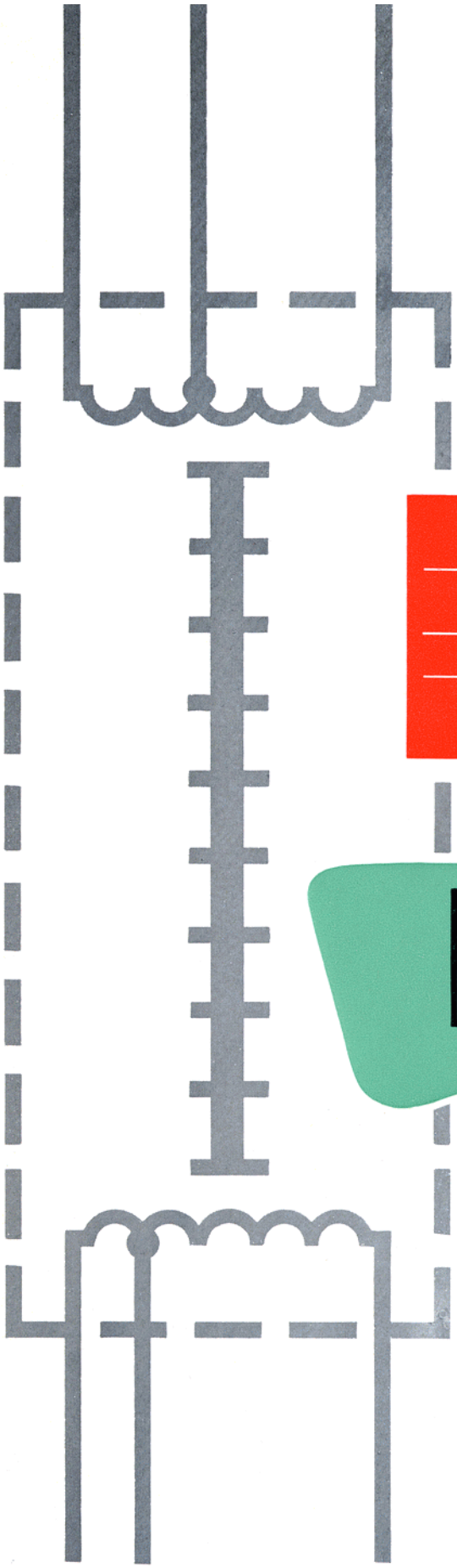


Bild 2 Filtertypen



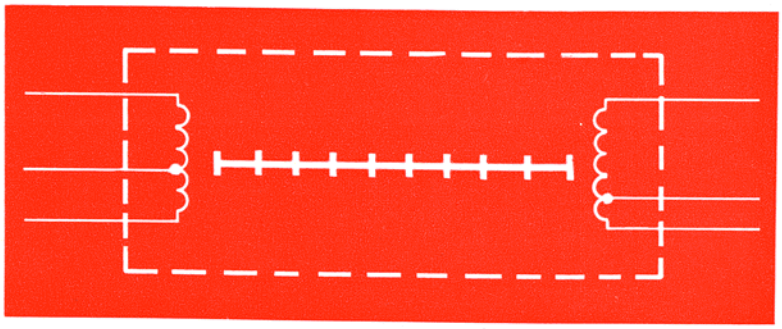


Bild 3 Darstellung des mechanischen Filters in Stromlaufplänen und Schaltbildern

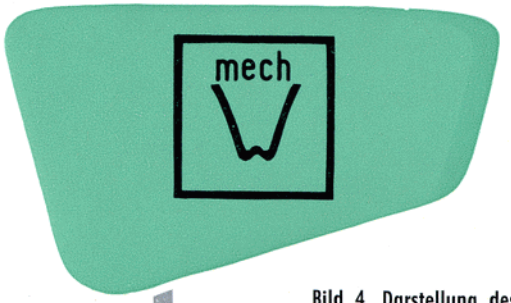


Bild 4 Darstellung des mechanischen Filters in Blockschaltbildern

Für die Darstellung mechanischer Filter in Stromlaufplänen und Schaltbildern empfehlen wir die in Bild 3 gezeigte. Für Blockschaltbilder schlagen wir vor, das für normale elektrische Filter gebräuchliche Zeichen mit dem Zusatzvermerk „mech." anzuwenden (s. Bild 4).

Technische Daten

	Typ	FZ 01	FZ 04	FZ 05	FZ 06	FZ 07	FZ 08	FZ 09
Selektionswerte	Bandbreite bei 3 dB Abfall [kHz]:	± 18	± 6	± 3	± 1,5	± 0,75	± 0,25	± 0,1
	Toleranz der Bandbreite [kHz]:	+2/–0,5	± 0,6	± 0,6	+0,6/–0	+0,15/–0,1	+0,15/–0	+0,06/–0
	Bandbreite bei 60 dB Abfall [kHz]:		<± 12,5	<± 6,5	<± 4	<± 2,5	<± 0,9	<± 0,55
	80 dB Abfall [kHz]:	<± 40						
	Welligkeit im Durchlaßbereich [dB]:	1,5—2,5	<		< 3			>
Mittenfrequenz	[kHz]:	473	<		525			>
	Toleranz der Mittenfrequenz bei 20° C [kHz]:	± 1,5	<	± 0,2	>	± 0,15	± 0,1	± 0,075
	Temperaturkoeffizient der Mittenfrequenz im Bereich –20° C bis +65° C in 10^{-5}/° C	<± 15	<		<± 1			>
Durchlaßdämpfung	Richtwert [dB]:	2	2	3	4	6	8	10
Anzahl der für die Selektion wirksamen Kreise:		9	<	7	>	<	6	>

Zulässige Umgebungstemperatur:	–20° C bis +65° C
Nebenwellendämpfung:	60 dB
Schüttelfestigkeit:	6 g

Anschlußwerte des elektromechanischen Wandl

Ohmsche Belastung:	18 kΩ ± 15% ganze Wicklung rot/grün 500 Ω ± 15% Anzapfung gelb/grün 60 Ω ± 15% Anzapfung blau/grün
Parallelkapazität: (ganze Wicklung rot/grün)	600 pF ± 20% bei Filter fo = 473 kHz 350 pF ± 20% bei Filter fo = 525 kHz Der genaue Kapazitätswert ist in der Verpakkung des Filters angegeben.
Eingangsspannung:	2 V eff maximal
Gleichstromanteil des Eingangs- bzw. Ausgangsstromes:	2 mA maximal (Gleichstromfreier Anschluß ist anzustreben.)

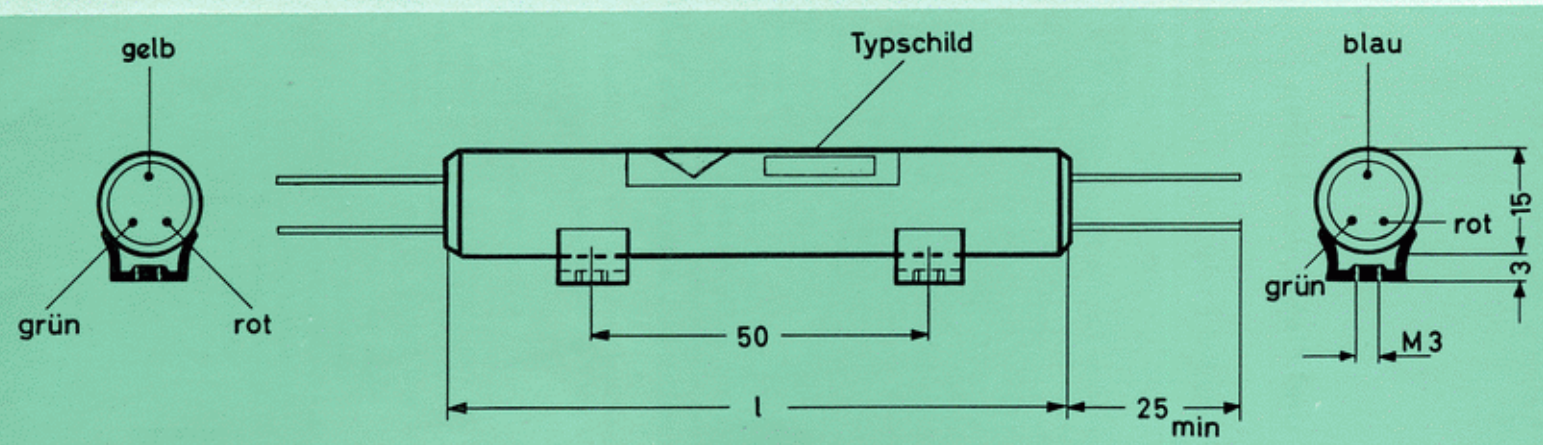


Bild 5 Maßskizze der mechanischen Filter

Typ		FZ 01	FZ 04	FZ 05	FZ 06	FZ 07	FZ 08	FZ 09
Länge „l"	[mm]	72	<	117	>	<	106	>
Gewicht	[g]	35	<	50	>	<	45	>

Mechanischer Aufbau und Einbauvorschriften

Die perspektivische Schnittzeichnung Bild 6 zeigt den inneren Aufbau des Filters FZ 01.

Der innere Aufbau ist im wesentlichen für alle Filter gleich. Die hintereinander aus einem Stück einer Spezial-Nickellegierung, deren TK der mechanischen Resonanz für bestimmte Temperaturbereiche auf Null einstellbar ist, herausgedrehten Leitungsstücke (Resonatoren und Kopplungsstege) bilden den sogenannten Schwingkörper, der mit feinen Drähtchen an den vier Distanzstäben senkrecht zu seiner Schwingrichtung aufgehängt ist. Gleichzeitig werden mit diesen Distanzstäben die Erregermagnete der elektromechanischen Wandler an beiden Enden auf richtigem Abstand gehalten.
Der gesamte Innenaufbau des Filters bildet damit eine geschlossene mechanische Einheit, die in ein Metallrohr mit 15 mm Außendurchmesser eingeschoben und an den Enden mit diesem weich verlötet ist. Das abgedichtete Filtergehäuse wird mit trockener Luft bei vermindertem Druck (Unterdruck) gefüllt. Damit sind die funktionswichtigen Filterelemente vor Feuchtigkeit und chemischen Einflüssen geschützt.

Zur Befestigung der Filter sind an den Metallrohren 2 Füße mit M 3 - Gewinde angeschweißt. (Der Gewindeabstand ist für alle Typen gleich und beträgt 50 mm, s. Bild 5).

Beim Einbau der Filter müssen elektrische Verkopplungen des Filterausganges mit dem Filtereingang unbedingt vermieden bzw. um insgesamt wenigstens 100 dB abgeschwächt werden, damit die hohe Selektion der Filter, d. h. die starke Bedämpfung aller außerhalb des Durchlaßbereiches (Bandbreite) liegenden Frequenzen nicht aufgehoben wird.
Die nachstehend empfohlenen Maßnahmen sollten deshalb sorgfältig beachtet werden!
In vielen Fällen, vor allem bei gedrängtem Aufbau und räumlich enger Anordnung der Eingangs- und Ausgangsschaltung wird die Anbringung von Abschirmblechen notwendig sein. Kopplungen über Anoden- und Heizspannungsleitungen müssen mit Sperrdrosseln auf den geforderten Wert reduziert werden.
Sorgfältige Erdung des Filtergehäuses ist unbedingt erforderlich!

Die Verlötung der Anschlußdrähte muß in mindestens 10 mm Abstand von ihrem Austritt aus dem Filtergehäuse (Preßglassockel) erfolgen.
In dem Glassockel sind Durchführungsbuchsen eingepreßt, durch die die Anschlußdrähte geführt und luftdicht verlötet sind.
Bei einem Lötabstand $<$ 10 mm wird das Lot in der Buchse zu stark miterhitzt, es kann verflüssigen und durch den Unterdruck im Inneren des Filters eingesogen werden. Damit entfällt der für das Innere des Filters wichtige Schutz vor chemischen Einflüssen.

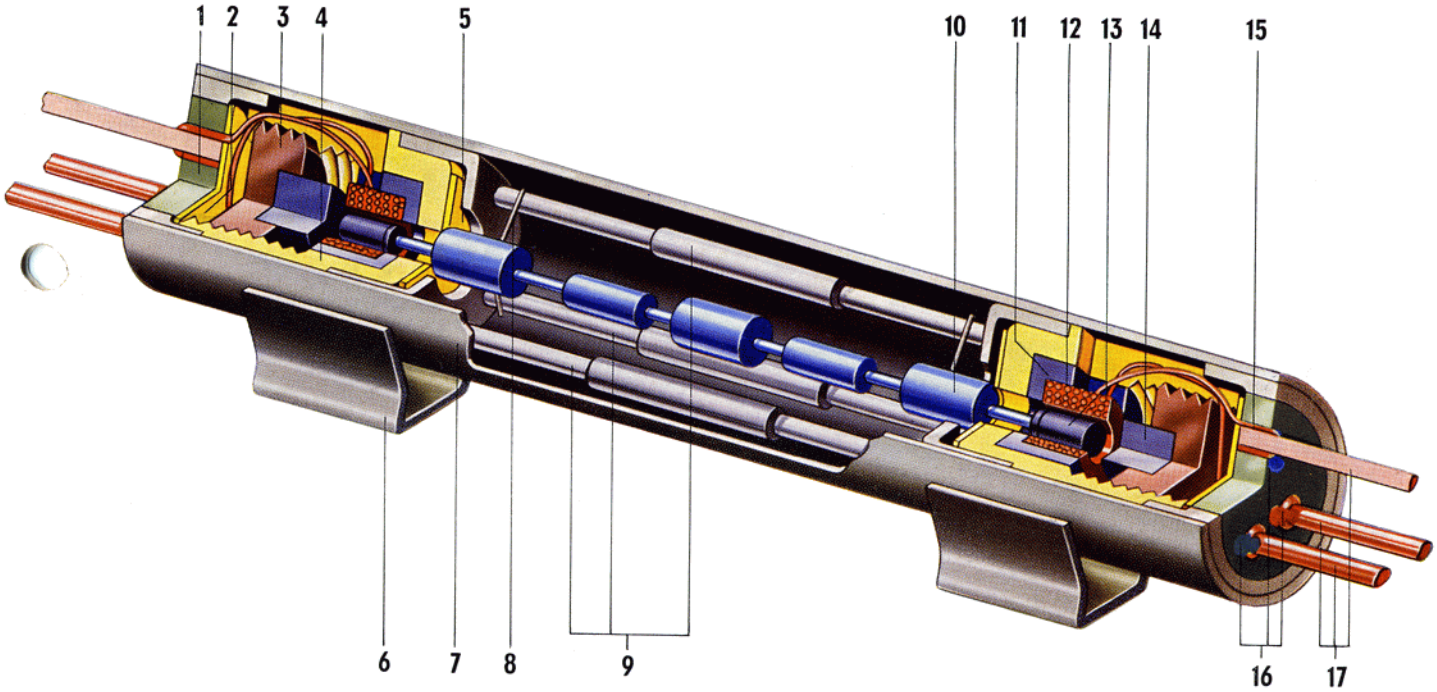


Bild 6 Perspektivische Schnittzeichnung des mechanischen Filters FZ 01 (Maßstab ca. 2 : 1)

1 Preßglassockel mit Durchführungsbuchsen (15)
2 Isolierscheibe
3 Einstellschraube (Isolierkörper) mit Permanentmagnet (14)
4 Gewindebuchsen (Isolierkörper)
5 Gummischeibe
6 Befestigungsfuß
7 Filtergehäuse
8 Aufhängedraht für Filterkörper
9 Distanzstäbe
10 Schwingkörper
11 Ferrittopf
12 Erregerwicklung
13 Wandlerkern (Ferrit)
14 Permanentmagnet
15 Durchführungsbuchse mit eingelötetem Anschlußdraht und Erregerwicklungsanschluß
16 Farbkennzeichnung
17 Anschlußdrähte

Schaltung und Wirkungsweise

Die funktionelle Verbindung zwischen mechanischem Schwingkörper und elektrischer Schaltung wird durch die an beiden Enden des Filters eingebauten elektromechanischen Wandler hergestellt, die Strom und Spannung in die mechanischen Komponenten Kraft und Geschwindigkeit umformen.
Der die Erregerwicklung L 1 (s. Bild 6 oder Bild 11) durchfließende Strom wird im Wandler durch Magnetostriktion in mechanische Schwingungen umgesetzt. Der den Wandlerkern vormagnetisierende Permanentmagnet dient dabei zur Unterdrückung des quadratischen Effektes, wie er z. B. auch von Lautsprechern her bekannt ist.
Die Erregerwicklung erzeugt im Wandlerkern einen magnetischen Wechselfluß, der mit der Vormagnetisierung durch den Permanentmagneten einen wechselnden magnetischen Gleichfluß ergibt. Auf diese Weise wird eine Verdopplung der den Schwingkörper erregenden Kraftimpulse vermieden.
Die mechanischen Schwingungen (Longitudinalschwingungen) durchlaufen nun den sogenannten Schwingkörper, einen Bandpaß, gebildet von λ/2-Leitungsstükken (Resonatoren) und λ/4-Leitungsstücken (Kopplungsstege) und werden durch den elektromagnetischen Wandler am anderen Ende des Filters wieder in elektrische Werte rückgeformt.

Die Filter sind symmetrisch aufgebaut, d. h., jede Seite kann als Eingang oder als Ausgang benutzt werden.

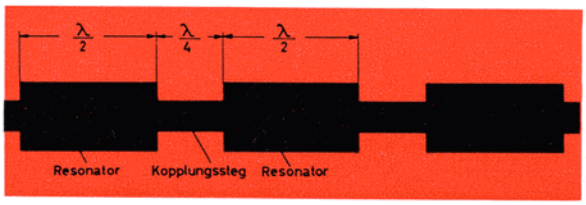


Bild 7 Breitbandige Kopplung

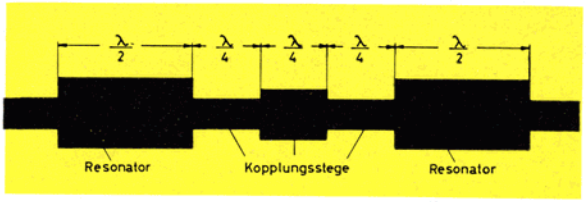


Bild 8 Schmalbandige Kopplung

2 Kopplungsanordnungen werden benutzt, für breitbandige Filter die auf Bild 7, für schmalbandige (K < 1%) die auf Bild 8 dargestellte. Die mit diesen Kopplungen aufgebauten Schwingkörperformen sind in Bild 9 gezeigt.
Der jeweilige Kopplungsfaktor errechnet sich aus dem Querschnittsverhältnis des Resonators (λ/2-Leitungsstück) zu dem des Kopplungssteges (λ/4-Leitungsstück). Da die Kopplung nur von dem Querschnittsverhältnis und die Resonanzlage praktisch nur von der Länge des Resonators abhängig ist, kann die absolute Größe der einzelnen Schwingkörperquerschnitte frei gewählt werden.
Diese Möglichkeit nutzt man zur Unterdrückung der Nebenwellen.

Die Nebenwellen sind unerwünschte Schwingungen, die sich sowohl in den λ/2-Leitungsstücken (Resonatoren) als auch in den λ/4-Leitungsstücken (Kopplungsstege) ausbilden.
Bei der Entwicklung der mechanischen Filter wurden deshalb in zahlreichen Versuchsreihen Schwingkörperformen ermittelt, in denen die Nebenwellen um mehr als 60 dB unterdrückt bzw. abgeschwächt sind.
Zur vollen Ausnutzung der Selektion bei sehr weitabliegenden Frequenzen (Harmonische der Mittenfrequenz) empfiehlt es sich, im Verhältnis zur Durchlaßbreite des Filters breitbandige L-C-Kreise vorzusehen.

Bild 10 Selektionskurven ▶

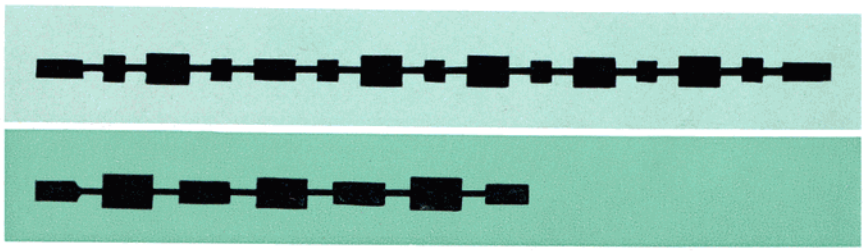
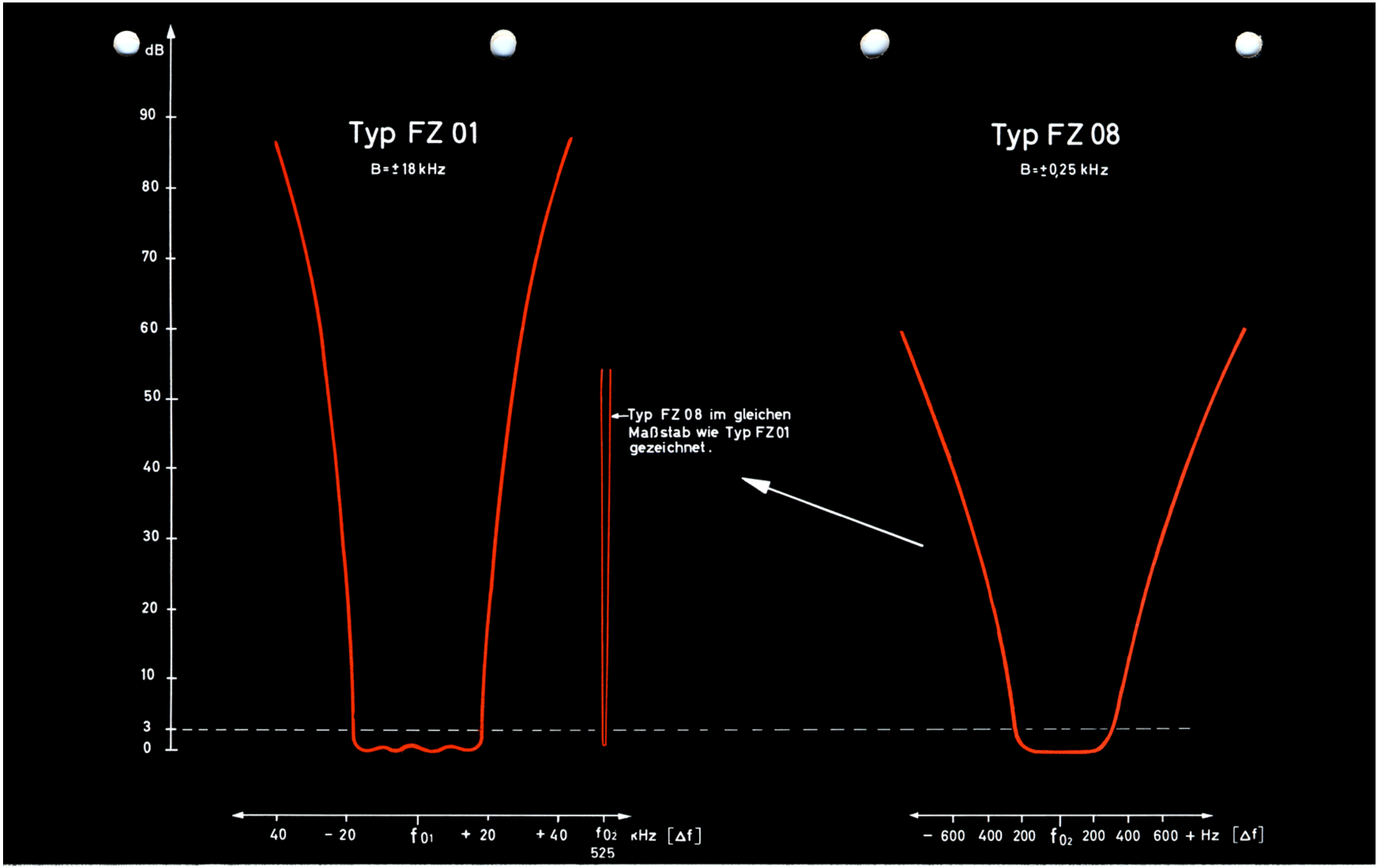


Bild 9 obere Abbildung Schwingkörper mit schmalbandiger Kopplung (FZ 07)
untere Abbildung Schwingkörper mit breitbandiger Kopplung (FZ 01)



f_{01} = 473 kHz

f_{02} = 525 kHz

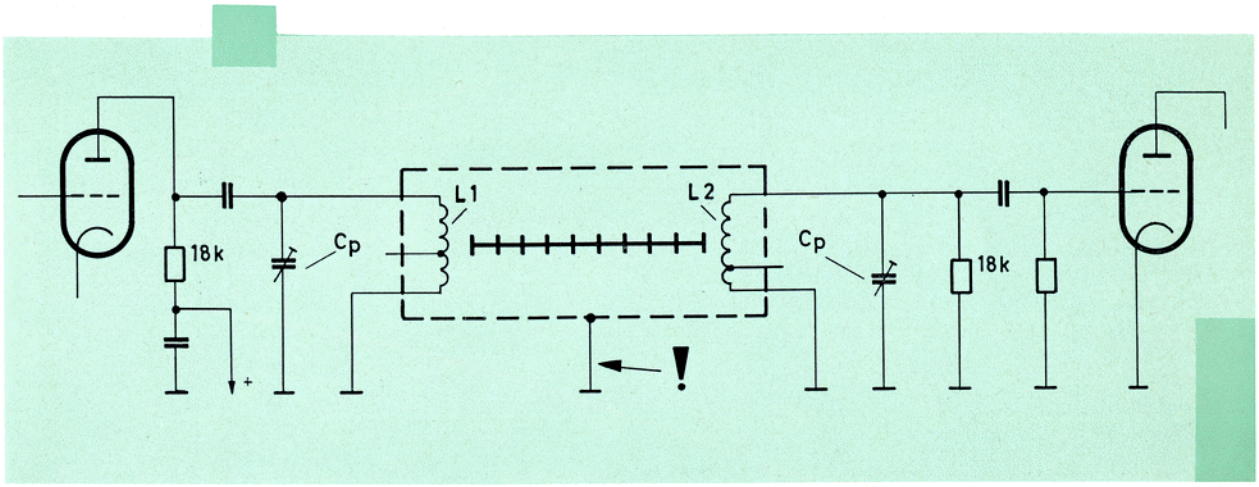


Bild 11 Prinzip-Schaltbild für eine selektive Verstärkerstufe mit einem mechanischen Filter

Der elektrische Anschluß der mechanischen Filter erfolgt eingangs- und ausgangsseitig an den Erregerwicklungen der elektromechanischen Wandler.

Der ganzen Erregerwicklung wird eine Kapazität „Cp" (s. Bild 11), in der Praxis bestehend aus einem Festkondensator und einem Trimmer (s. Bild 14), parallel geschaltet und die Resonanzfrequenz dieser Anordnung auf die Mittenfrequenz des Filters grob abgestimmt.
Der Feinabgleich soll möglichst mit einem Wobbelgerät vorgenommen werden, wobei auf geringste Welligkeit im Durchlaßbereich zu achten ist.

Bei Abstimmung mit einem Röhrenvoltmeter wird zuerst bei der Mittenfrequenz die maximale Ausgangsspannung eingestellt und danach durch vorsichtiges Weitertrimmen auf geringste Welligkeit im Durchlaßbereich nachgeregelt.

Der für die genaue Abstimmung des jeweiligen Filters nötige Wert von Cp ist an jeder Anschlußseite (C 1 und C 2) vom Prüffeld ermittelt und auf dem der Verpakkung beigelegten Anschlußschema angegeben. Stehen die obengenannten Abstimm-Meßgeräte nicht zur Verfügung, so wird das Filter durch Anlöten der angegebenen C-Werte, unter Berücksichtigung des Kapazitätsanteiles der Verdrahtung, abgestimmt.

Die Kapazität „Cp" beträgt bei Filtern mit der Mittenfrequenz 473 kHz, 600 pF ± 20% und bei 525 kHz-Filtern 350 pF, ± 20%.

Die Gesamtbelastung jeder Filterseite durch die Schaltung muß dem vorgeschriebenen Wert entsprechen und beträgt entweder 18 kΩ ± 15% für den Anschluß rot/grün (ganze Wicklung) oder 500 Ω für den Anschluß gelb/grün bzw. 60 Ω für den Anschluß blau/grün (Anzapfungen). Die niederohmigen Anzapfungen sind für Transistor-Verstärkerstufen (Emitter- bzw. Basisschaltung) oder für den Anschluß von 60 Ω-Kabel vorgesehen. Der grün gekennzeichnete Anschluß ist wechselstrommäßig zu erden!

Der Gleichstromanteil des Stromes in der Erregerwicklung darf etwa 2 mA betragen. Da das Filter jedoch im gleichstromfreien Zustand abgeglichen wird, können dabei bereits geringe Verformungen der Durchlaßkurve auftreten. Größere Gleichstromwerte, auch wenn sie nur kurzzeitig auftreten, haben bleibende Änderungen der Filterkurve zur Folge. Es ist daher zweckmäßig, das Filter gleichstromfrei anzuschließen.

Die Wechselspannung an den äußeren Anschlüssen (rot/grün, 18 kΩ) darf 2 V eff nicht übersteigen. Bei höheren Spannungen treten nichtlineare Verzerrungen auf, d. h. die Dämpfung der Intermodulationsprodukte wird < 60 dB.
Bleibende Beschädigungen der Filter durch kurzzeitige Überschreitung dieser Spannung treten jedoch nicht auf.

Mechanische Filter - praktisch angewendet

Beispiel 1

Mechanische Filter in kommerziellen UKW-Empfängern
Kommerzielle UKW-Empfänger werden heute für die verschiedensten Zwecke in großer Zahl eingesetzt. Es handelt sich in der Hauptsache um Empfänger für frequenzmodulierte Sendungen, wobei jedoch erheblich geringere Frequenzhübe verwendet werden, als in der Rundfunktechnik. Für die Trennschärfe eines Überlagerungsempfängers ist in erster Linie der Zwischenfrequenzverstärker maßgebend. Da von einem hochwertigen Gerät eine definierte Selektionskurve verlangt wird, müssen die Selektionsmittel so aufgebaut sein, daß sie gegen Schwankungen der Temperatur, der Speisespannung und der Aussteuerung, gegen klimatische Einflüsse sowie gegen die mechanischen Einwirkungen, denen das Gerät im Betrieb ausgesetzt ist, möglichst unempfindlich sind. Werden im ZF-Verstärker Transistoren verwendet, so besteht die Gefahr, daß diese infolge der bekannten Temperaturabhängigkeit ihrer Daten die zwischen den Stufen angeordneten Abstimmkreise während des Betriebes verstimmen. Man ist daher dazu übergegangen, die Transistoren über breitbandige Transformatoren zu koppeln und die Selektion in ein Filter zu verlegen, das vor dem eigentlichen Verstärker angeordnet ist.
Außer den bereits erwähnten Eigenschaften verlangt man von diesem Filter möglichst geringe geometrische Abmessungen, da gerade Transistorgeräte meist sehr gedrängt aufgebaut werden. Natürlich sind auch wirtschaftliche Gesichtspunkte für die zu wählende Konstruktion maßgebend.
Ein Spulenfilter vermag den Anforderungen nur bedingt gerecht zu werden. Je nach der geforderten Selektion enthält es etwa 7–10 Kreise. Selbst bei Verwendung von Subminiaturteilen läßt sich ein gewisses Volumen nicht unterschreiten (s. Bild 12).
Die Bauelemente müssen eng toleriert sein. Der Abgleich eines Filters mit der genannten Kreiszahl ist schon im Prüffeld nicht ganz einfach und wird für den Service oft zu einem äußerst schwierigen Problem.

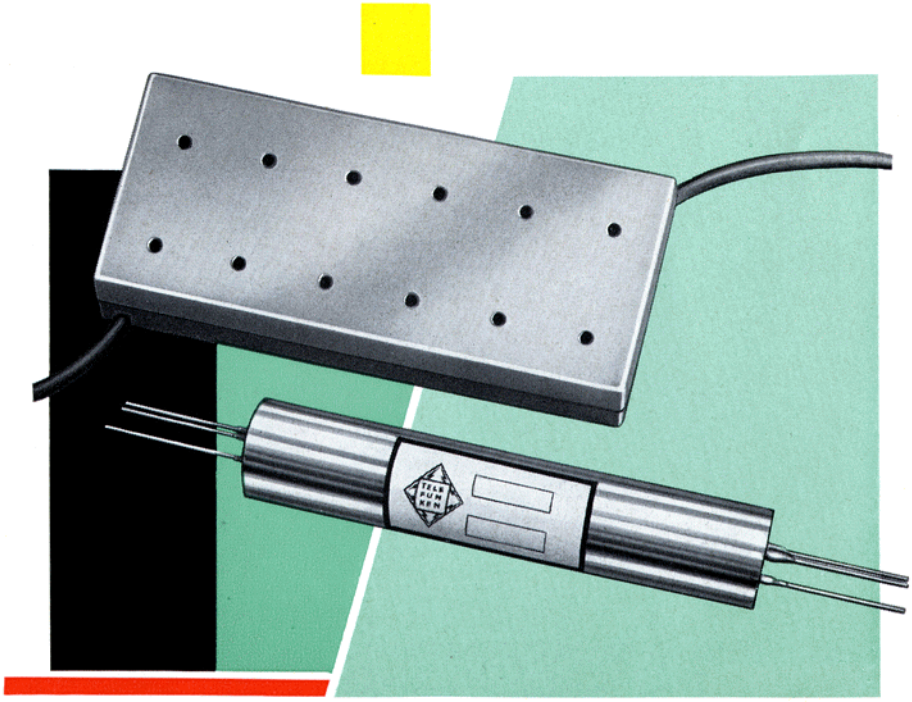
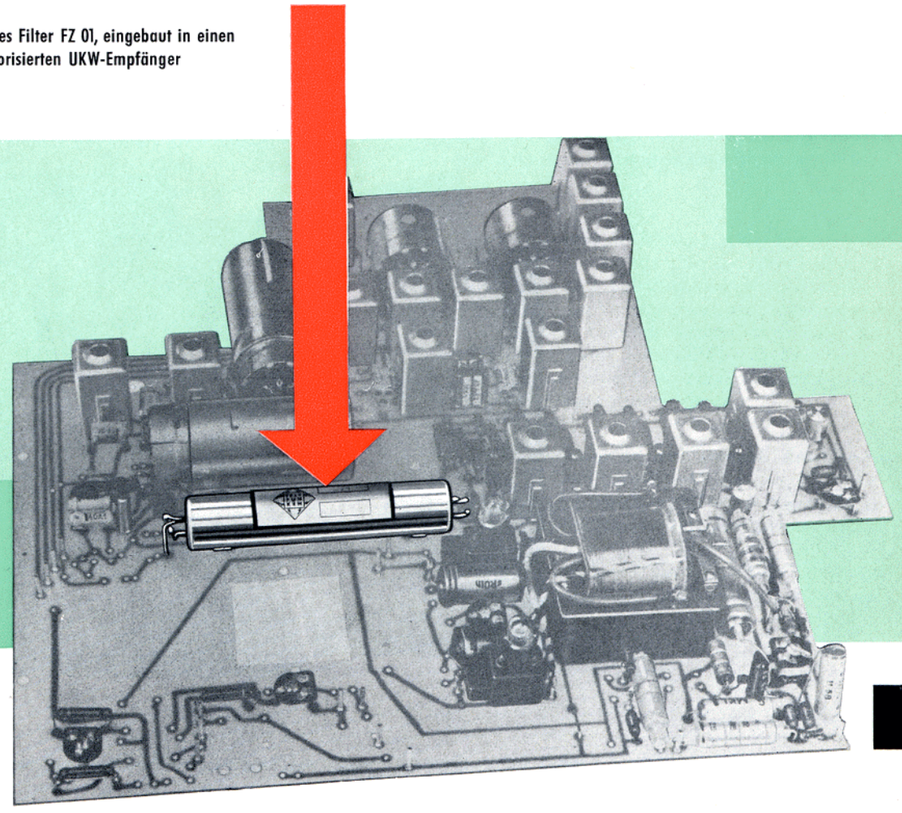


Bild 12 Maßstäblicher Größenvergleich eines Submin-Spulenfilters mit einem mechanischen Filter gleicher Bandbreite (FZ 01), jedoch ca. doppelter Flankensteilheit und geringerer Durchlaßdämpfung

Demgegenüber bietet ein mechanisches Filter an dieser Stelle erhebliche Vorteile. Seine geometrischen Abmessungen sind geringer als die eines Spulenfilters mit der gleichen Selektion. Die wichtigsten Teile sind in einem allseits geschlossenen festen Gehäuse untergebracht, so daß eine Änderung der elektrischen Daten durch klimatische Einflüsse kaum zu befürchten ist. Ein weiterer Vorteil ist die geringe Durchlaßdämpfung des mechanischen Filters. Da die Einschaltung vor dem ZF-Verstärker erfolgt, könnte ein Filter mit hoher Durchlaßdämpfung gegebenenfalls den Rauschabstand des Empfängers verschlechtern.
Für die Praxis ist entscheidend, daß es sich um ein geschlossenes Bauelement handelt, das fertig abgeglichen in die Schaltung eingesetzt wird.

Bild 13 Mechanisches Filter FZ 01, eingebaut in einen teiltransistorisierten UKW-Empfänger



Außer der nicht sehr kritischen Abstimmung des Eingangs- und Ausgangskreises entfallen alle Abgleicharbeiten im Prüffeld. Es werden also sowohl die Montage- als auch die Prüfkosten verringert. Auch ein etwa notwendiger Austausch des defekten Filters gegen ein neues durch Service-Kräfte ist ohne besondere Schwierigkeiten mit einem geringen Aufwand an technischen Hilfsmitteln durchführbar.
Bild 13 zeigt die Anordnung eines mechanischen Filters in einem teiltransistorisierten UKW-Empfänger. In Bild 14 ist der entsprechende Schaltungsauszug prinzipiell dargestellt.
Der Einsatz mechanischer Filter bringt also sowohl in schaltungstechnischer Hinsicht als auch für die Fertigung und Wartung eines Gerätes wesentliche Vorteile.

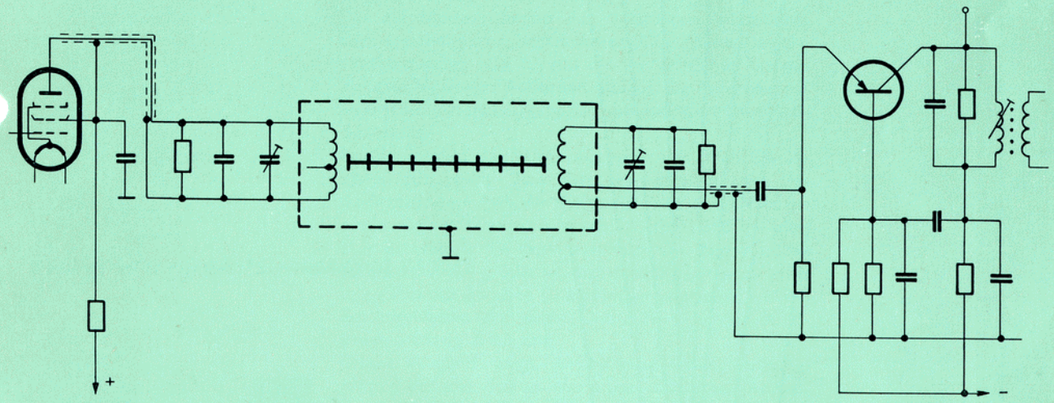


Bild 14 Schaltbild der selektiven Verstärkerstufe mit mechanischem Filter des im Text genannten UKW-Empfängers

Mechanische Filter in ZF-Verstärkern mit umschaltbarer Bandbreite

Verfolgt man die Entwicklung moderner Nachrichten-Geräte, so kann man u. a. zwei sich scheinbar widersprechende Entwicklungsrichtungen erkennen: Die Forderung nach immer besserer Selektion, die naturgemäß einen hohen Aufwand erfordert und eine immer intensiver betriebene Miniaturisierung, verbunden mit einer Vereinfachung der Schaltung und der Bauelemente.
Hier bietet sich als ausgezeichneter Kompromiß das mechanische Filter an, das alle diese Forderungen in geradezu idealer Weise erfüllt.

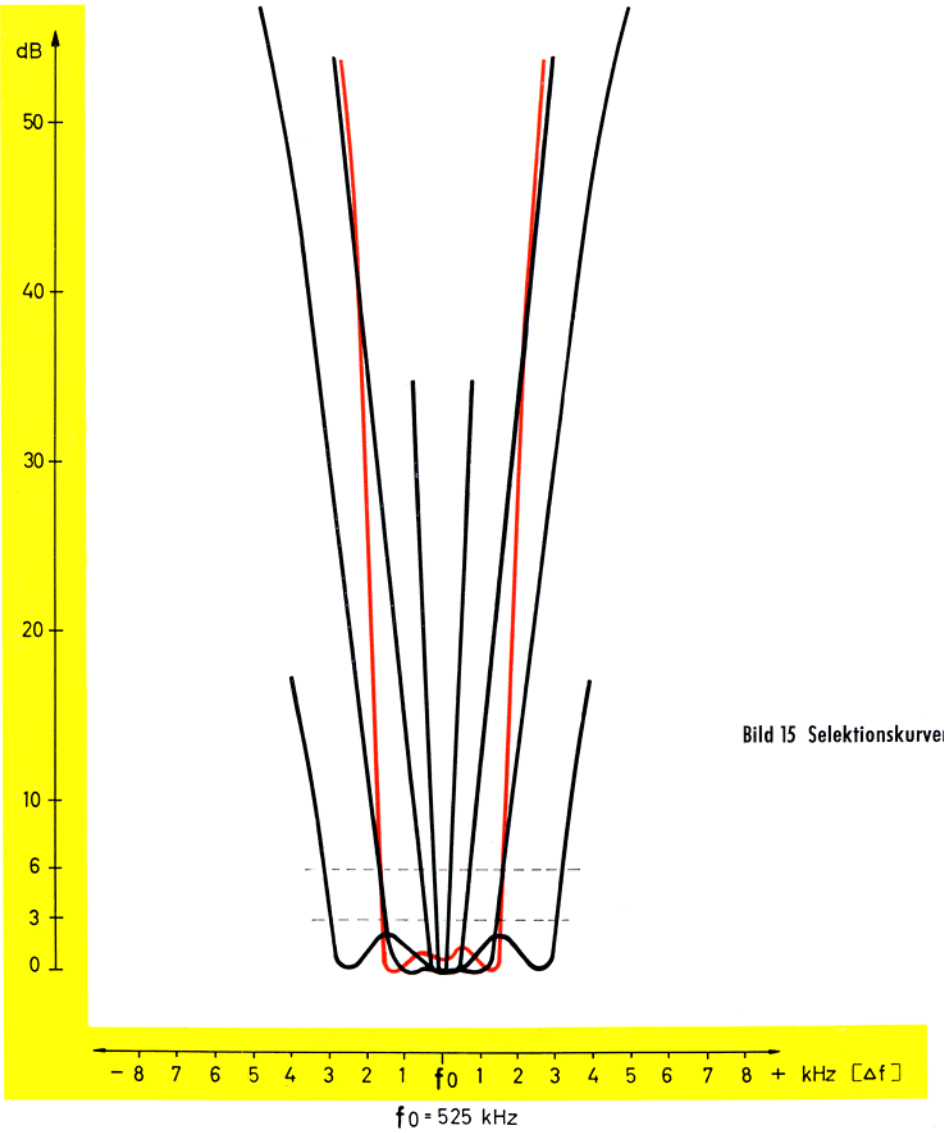


Bild 15 Selektionskurven, Erläuterungen im Text auf Seite 15

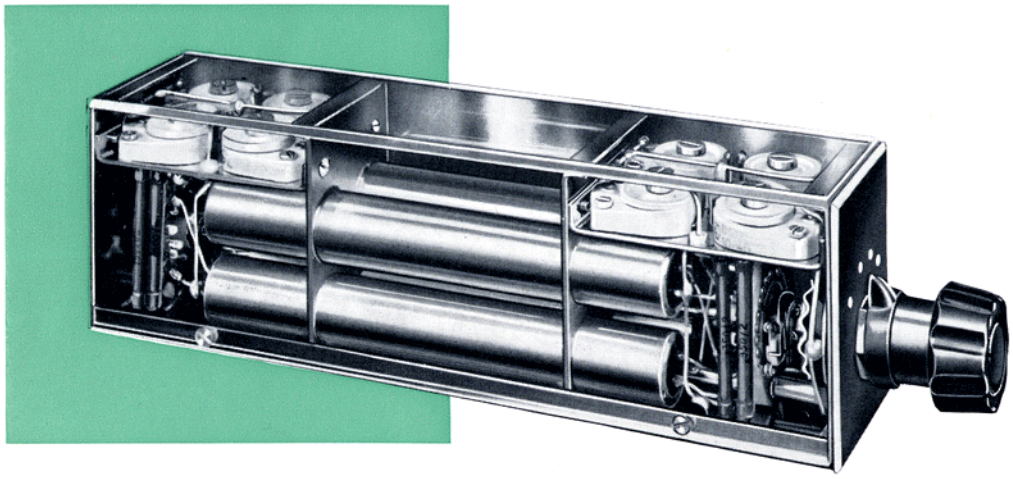


Bild 16 4 mechanische Filter, zusammengestellt zu einem Filtersatz mit umschaltbarer Bandbreite

In einem ZF-Verstärker mit umschaltbarer Bandbreite (4 Bandbreiten und zwar ± 0,1 / ± 0,5 / ± 1,5 und ± 3 kHz) wurde bisher ein schaltbares Quarzfilter üblicher bekannter Bauart benutzt.
Der zur Modernisierung des Verstärkers eingebaute Satz umschaltbarer mechanischer Filter (siehe Demonstrationsmodell Bild 16) hat ein im Verhältnis 1:6 geringeres Volumen. Außerdem haben die Filter bedeutend höhere Flankensteilheiten und geringere Durchlaßdämpfung.
In Bild 15 sind die Selektionskurven des alten Quarzfilters dargestellt. Zum Vergleich dazu ist die des mechanischen Filters für die Bandbreite ± 1,5 kHz rot eingezeichnet. Man erkennt sehr deutlich, daß bei gleicher Bandbreite die Flankensteilheit des mechanischen Filters um soviel größer ist, daß die Filterkurve bei etwa ± 2,5 kHz den gleichen Dämpfungswert erreicht wie die Selektionskurve des alten Quarzfilters in der Bandbreite-Stellung ± 0,5 kHz.
Dieser Vergleich zeigt, welche erheblichen Verbesserungen der elektrischen Werte und räumlichen Abmessungen mit dem Einbau mechanischer Filter bei der Modernisierung des ZF-Verstärkers erzielt wurden.