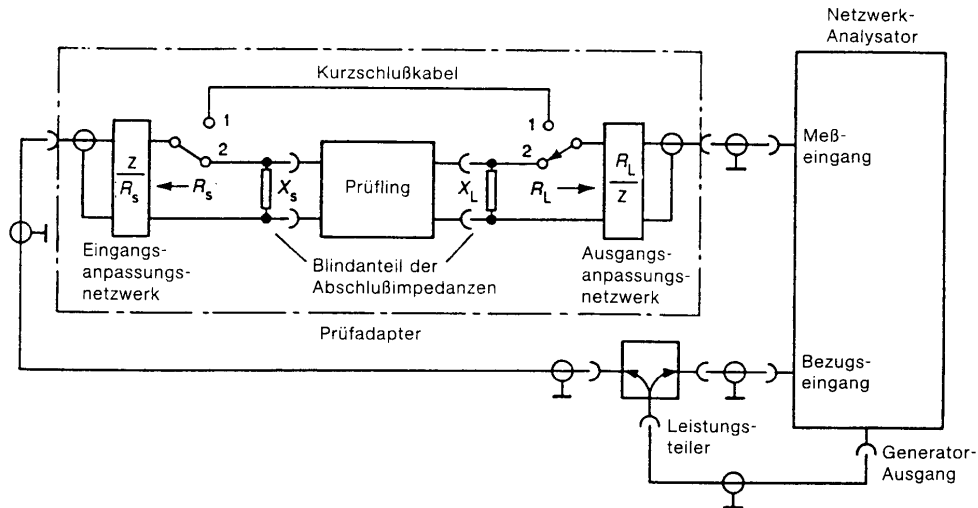


# 10. Prüfung von Quarzfiltern und SAW-Filtern

## 10.1 Messung des Übertragungsverhaltens

Das Übertragungsverhalten von Filtern wird wie in Bild 10.1 dargestellt, mit einem Netzwerkanalysator gemessen.



ANMERKUNG 1: Anstatt des Netzwerkanalysators können Vektorvoltmeter oder ähnliche Meßeinrichtungen verwendet werden.

ANMERKUNG 2: Um die Meßergebnisse durch Rauschen nicht zu beeinträchtigen, ist es notwendig, entweder mit ausreichend hohem Pegel zu arbeiten oder einen Verstärker zum Ausgleich der Grunddämpfung des Filters einzufügen, oder mit einer ausreichend kleiner Meßbandbreite des selektiven Netzwerkanalysators zu arbeiten.

Bild 10.1: Messung der Einfügungsdämpfung, Phase und Gruppenlaufzeit(aus [1])

Die übliche Meßtechnik basiert auf einer Amplituden- und Phasenmessung des Übertragungsverhaltens. Moderner ist die Messung der s-Parameter, die bei SAW-Filtern fast ausschließlich verwendet wird. Das Übertragungsverhalten (Betriebsdämpfung  $a_B$  und Betriebsphase  $\varphi_B$ ) wird durch die Parameter  $s_{21}$  bzw.  $s_{12}$  charakterisiert

$$\begin{aligned} a_B &= 20 \lg s_{21} & \text{bzw.} & \quad a_B' = 20 \lg s_{12} \text{ (Rückwärtsrichtung)} \\ \varphi_B &= \angle s_{21} & & \quad \varphi_B' = \angle s_{12} \end{aligned} \quad (1)$$

Die Parameter  $s_{11}$  und  $s_{22}$  stellen bei direkter Messung die Eingangs- und Ausgangsimpedanzen  $Z_{in}$ ,  $Z_{out}$  des Filters über die Beziehungen

$$s_{ii} = \frac{Z_{ii} - Z_0}{Z_{ii} + Z_0} \quad (2)$$

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1 + s_{11}}{1 - s_{11}} \quad Z_{out} = Z_0 \frac{1 + s_{22}}{1 - s_{22}} \quad (3)$$

dar. Hierin ist  $Z_0$  die Impedanz des Meßsystems, im allgemeinen 50  $\Omega$ . Der Vorteil der s-Paramettermessung ist, daß eine einfache Fehlerkorrektur nach Standardverfahren möglich ist, meist ist diese in den Meßgeräten als Software implementiert.

Insbesondere bei Quarzfiltern ist es oft erforderlich, die Filterabschlußimpedanz an die Impedanz des Meßsystems anzupassen. Bild 10.2 zeigt die allgemein gebräuchliche Schaltung mit ohmschen Anpaßwiderständen.

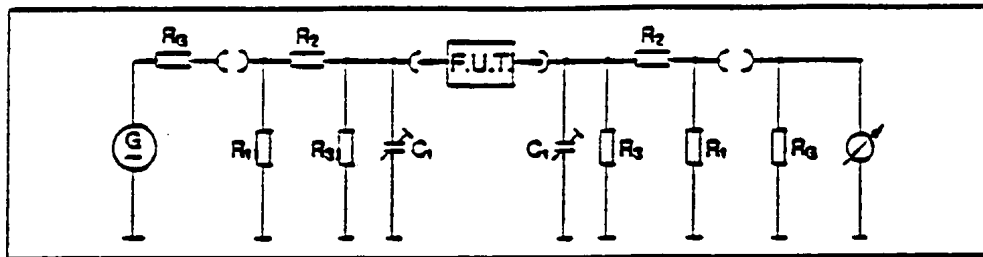


Bild 10.2: Anpaßschaltung mit Widerständen zur Messung von Filtern mit Abschlußimpedanzen ungleich 50 Ω

Die Rechenformeln für die Anpaßwiderstände für eine Filterabschlußimpedanz  $R_F$  und eine Impedanz  $R_G (=Z_0)$  des Meßsystems sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Minimale Dämpfung:

$$a_{\min} = 10 \lg K_{\min} \quad \text{wobei} \quad K_{\min} = 2 \frac{R_F}{R_G} - 1 + 2 \sqrt{\frac{R_F}{R_G} \left( \frac{R_F}{R_G} - 1 \right)} \quad (4)$$

	Für minimale Dämpfung $a = a_{\min}$ :	Für vorgeg. Dämpfung $a > a_{\min}$ :
$R_1 =$	$\frac{R_G}{\sqrt{1 - \frac{R_G}{R_F}}} \quad (5)$	$\frac{(k-1) R_G}{(k+1) - 2 \sqrt{k \frac{R_G}{R_F}}} \quad (7)$
$R_2 =$	$R_F - \frac{R_G}{1 + \sqrt{1 - \frac{R_G}{R_F}}} \quad (6)$	$\frac{k-1}{2} \sqrt{\frac{R_F R_G}{k}} \quad (8)$
$R_3 =$	$\infty$	$\frac{(k-1) R_F}{(k+1) - 2 \sqrt{k \frac{R_F}{R_G}}} \quad (9)$

Tabelle 1: Anpaßwiderstände für Filteranpassung

Für hohe Abschlußimpedanzen wie sie häufig bei monolithischen und polylithischen Quarzfiltern vorkommen (oft noch in Verbindung mit einer niedrigen Parallelkapazität  $C_F \leq 2 \text{ pF}$ ), ergeben sich bei dieser Schaltung hohe Zusatzdämpfungen. In diesem Fall wird eine Anpaßschaltung mit LC-Transformation nach Bild 10.3 bevorzugt.

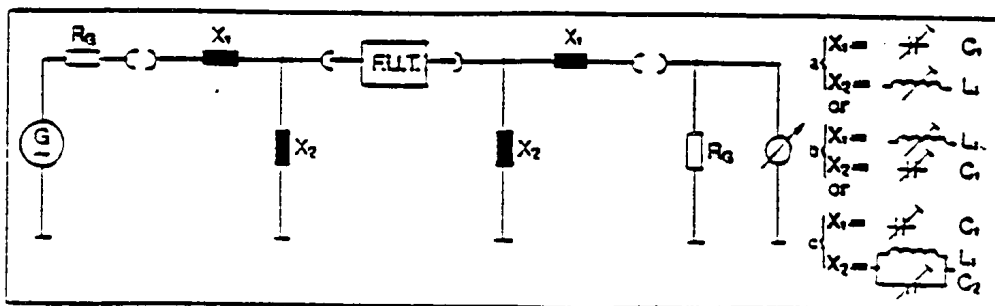


Bild 10.3: Anpaßschaltung mit L-C-Transformation

Wie in der Abbildung seitlich dargestellt, können die Reaktanzen  $X_1$ ,  $X_2$  dabei unterschiedlich ausgeführt werden: als Spule und Kondensator in Hochpaß- oder Tiefpaßanordnung (Fall a und Fall b), wobei die Induktivität auch verstimmter Parallelschwingkreis ausgeführt werden kann (Fall c). Im letzteren Fall kann die Spulenabstimmung durch eine Trimmerabstimmung ersetzt werden. Die Werte von  $X_1$  und  $X_2$  ergeben sich aus den Beziehungen:

$$X_1 = \sqrt{R_G (R_F - R_G)} \quad (10)$$

$$X_2 = \frac{R_F}{\omega_0 R_F C_F + \sqrt{\frac{R_F}{R_G} - 1}} \quad (11)$$

$$\text{Fälle (a),(b):} \quad L_i = \frac{X_i}{\omega_0} \quad C_i = \frac{1}{\omega_0 X_i} \quad (12)$$

$$\text{Fall (c):} \quad L_2 = \frac{1}{\omega_0^2 C_2 - \frac{\omega_0}{X_2}} \quad C_1 = \frac{1}{\omega_0 X_1} \quad (13)$$

Beim praktischen Aufbau eines Meßadapters ist (wie beim Einbau auf die Platine) zu beachten, daß Eingangs- und Ausgangsanschlüsse des Filters sehr gut voneinander elektrisch geschirmt sind und das Filter selbst einen sehr guten Massekontakt besitzt. Nur dadurch ist es möglich, auch Selektionswerte bis 100 dB und darüber zu messen. Während die einwandfreie Schirmung insbesondere bei Filtern mit höherer Eingangs- und Ausgangsimpedanz wichtig ist, ist ein sehr guter Erdkontakt von besonderer Bedeutung bei Filtern mit 50 Ω und ähnlich niedriger Abschlußimpedanz. Die Einhaltung der geforderten Filterabschlußimpedanzen ist durch eine Kalibrierung mit einem Impedanzmeßgerät bei der Filtermittenfrequenz direkt an der Anschlußebene der Filterein- und ausgänge sicherzustellen, wobei der Meßadapter am Eingang und Ausgang durch Kalibrierwiderstände von 50 Ω abzuschließen ist. Bei SAW-Filtern häufig zwischen Hersteller und Anwender ein geeigneter Meßadapter vereinbart.

Bei der Messung ist auf die Einhaltung des angegebenen Nenn-Eingangspegels zu achten, da Quarzfilter und SAW-Filter bei einem Pegel oberhalb 0 dBm ... 10 dBm ein nichtlineares Verhalten zeigen. Der Generatorpegel, der dafür eingestellt werden muß, ist je nach der verwendeten Anpaßschaltung zu berechnen, wobei dies auf die Nennmittenfrequenz bezogen wird. Hier kann im allgemeinen mit ausreichender Genauigkeit davon ausgegangen werden, daß die Filtereingangsimpedanz etwa der Abschlußimpedanz entspricht.

Ist die Filterabschlußimpedanz nicht zu stark von 50 Ω verschieden, kann auf eine Impedanzanpassung im Adapter verzichtet werden und das Verhalten bei Nennabschluß per Software aus der Messung im 50 Ω- System errechnet werden. Ein Verfahren basierend auf der Messung aller vier s-Parameter ist in Lit. [5] beschrieben. Die s-Parameter aus der 50 Ω-Messung werden hierbei in die Elemente der ((Z))-Matrix des Vierpols umgerechnet. Die Elemente  $Z_{11}$ ,  $Z_{12}$ ,  $Z_{21}$ , und  $Z_{22}$  können als T-Anordnung von drei Impedanzen dargestellt werden, bei denen dann am Eingang und Ausgang rechnerisch die komplexe Filterabschlußimpedanz addiert wird und die daraus folgenden geänderten Übertragungseigenschaften mathematisch ermittelt werden können. Für Einzelheiten wird auf die Referenz verwiesen.

Auf einen wichtigen Punkt soll hier noch hingewiesen werden: die Abschlußimpedanz  $R_F // C_F$  eines Filters ist die Impedanz, mit der das Filter abgeschlossen werden muß, um die spezifizierten Eigenschaften zu erreichen. Sie ist nicht notwendigerweise identisch mit der Eingangsimpedanz  $Z_{in}$ , die das Filter der vorausgehenden oder der nachfolgenden Stufe "zeigt". Die Eingangs- und Ausgangsimpedanz  $Z_{in}$ ,  $Z_{out}$  variiert im sowohl im Durchlaßbereich als auch im Sperrbereich des Filters - oft über mehrere Größenordnungen. Dies läßt sich dadurch erklären, daß die Dämpfung eines verlustfreien Filters ja ausschließlich

durch Reflektion, d.h durch die Abweichung der Eingangs- bzw. Ausgangsimpedanz von der Filterabschlußimpedanz erzeugt wird.

## 10.2 Kenngrößen von Filtern

Zur Erläuterung der meisten der nachfolgend beschriebenen Kenngrößen siehe Bild 10.4.

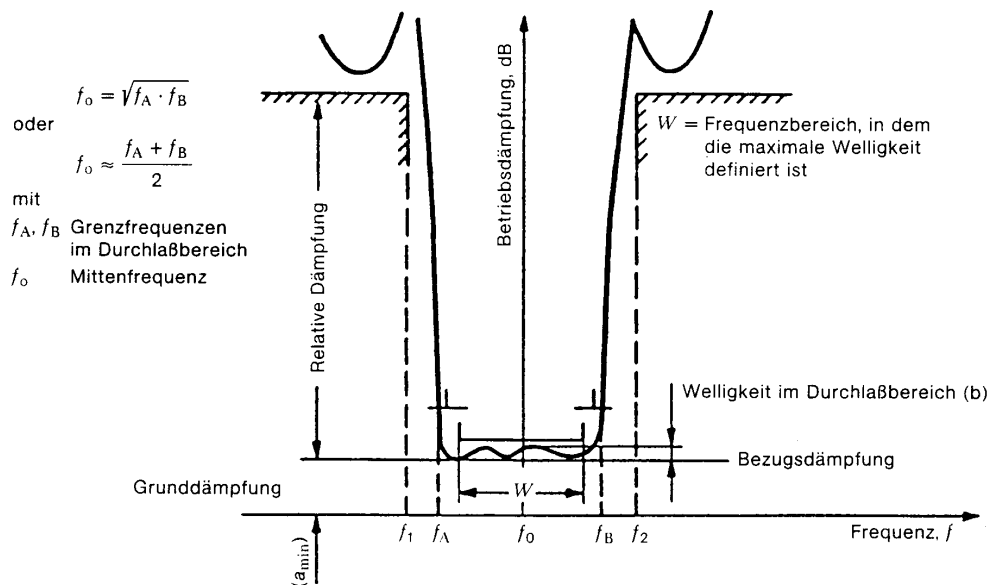


Bild 10.4: Betriebsdämpfung eines Filters (aus [1])

Die Betriebsdämpfung ist die Dämpfung eines Filters bezogen auf den Wert bei maximal möglicher Leistungsübertragung (d.h. bei einem idealen, verlustfreien Filter mit Leistungsanpassung).

Für die Messung der Grunddämpfung eines Filters ist eine "0 dB"-Bezugsmessung notwendig. Nur bei Filtern mit beidseitig gleicher Abschlußimpedanz ohne kapazitiven oder induktiven Blindanteil ist die Bezugsmessung durch Einsetzen einer Kurzschlußbrücke anstelle des Filters möglich. In den anderen Fällen ergibt eine solche Messung nur den Wert der sog. Einfügungsdämpfung, die nicht identisch ist mit der Grunddämpfung (minimale Betriebsdämpfung bezogen auf maximale Leistungsübertragung). Näheres siehe z.B. (DIN) IEC 368-2 und (DIN) IEC 862-2.

Relative Dämpfungswerte beziehen sich im allgemeinen auf den Punkt minimaler Betriebsdämpfung im (Durchlaßbereich). In Einzelfällen (z.T. bei SAW-Filtern) ist der Bezug die Dämpfung bei der Nenn(mitten)frequenz. Dies ist aber ausdrücklich zu vereinbaren.

Die (Gesamt-) Bandbreite ist der Frequenzunterschied zwischen den beiden Eckpunkten gleicher relativer Dämpfung (üblicherweise 3dB oder 6 dB) im Durchlaßbereich des Filters. Wird die Bandbreite mit einem  $\pm$ -Wert angegeben, bezieht sich diese auf die Nenn(mitten)frequenz. Die Bandbreite wird entweder als Mindestwert oder mit einer Toleranz angegeben.

Die Welligkeit ist die maximale Änderung der Betriebsdämpfung in einem bestimmten Teil des Durchlaßbereichs, üblicherweise die Differenz zwischen dem Dämpfungsminimum und einem relativen Dämpfungsmaximum („Welle“). Teilweise wird auch eine sogenannte Welligkeitsbandbreite spezifiziert, das ist das

Frequenzintervall im Durchlaßbereich, bei dem der Dämpfungsverlauf eine durch ein Rechteck beschriebenen Bereich (z.B. mit 1 dB Breite) nicht verlassen darf.

Der Übergangs - und der Sperrbereich können auf drei Arten spezifiziert werden:

Sperrdämpfung: Minimalwert der Dämpfung bei vorgegebener Sperrfrequenz (bzw. in bestimmtem Frequenzbereich), z.B.: mind. 60 dB bei  $f_N \pm 50 \text{ kHz} \dots \pm 100 \text{ kHz}$

Sperrbandbreite: Maximaler Abstand der Punkte einer bestimmten Sperrdämpfung, z.B.:  $< \pm 50 \text{ kHz}$  bei 60 dB.

Formfaktor (shape factor SF): Verhältnis zweier Bandbreiten bei zwei vorgegebenen Dämpfungswerten, z.B.: SF (60dB zu 3 dB)  $< 2$ . Wird ein Formfaktor spezifiziert, muß zur Eindeutigkeit für die Durchlaßbandbreite auch ein Maximalwert vorgegeben sein.

Weitabselektion: Mindestdämpfung in einem bestimmten Teil des Sperrbereichs. Zur Eindeutigkeit sollte der Frequenzbereich begrenzt werden, z.B.  $>80 \text{ dB}$  bei  $f_N \pm 100 \text{ kHz} \dots \pm 1 \text{ MHz}$ .

Nebenwellen: Im Durchlaßbereich treten Nebenwellen als schmalbandige Dämpfungsspitzen auf. Sie werden entweder in der Welligkeitsforderung eingeschlossen oder getrennt spezifiziert. Im Sperrbereich erscheinen Nebenwellen als meist schmalbandige Dämpfungseinbrüche. Sie werden meist von der Sperrdämpfungsforderung ausgenommen und getrennt spezifiziert.

Die Betriebsphase wird zwischen dem Generatorausgang und dem Empfängerausgang gemessen, wie es Netzwerkanalysatoren automatisch korrekt durchführen. Die Messung direkt zwischen den Filteranschlüssen führt dagegen zu falschen Ergebnissen.

Die Messung der Gruppenlaufzeit eines Filters erfolgt durch mathematisches Differenzieren der Kurve des Phasengangs im angegebenen Teil des Durchlaßbereichs, was bei modernen Netzwerkanalysatoren durch die eingebaute Software durchgeführt wird.

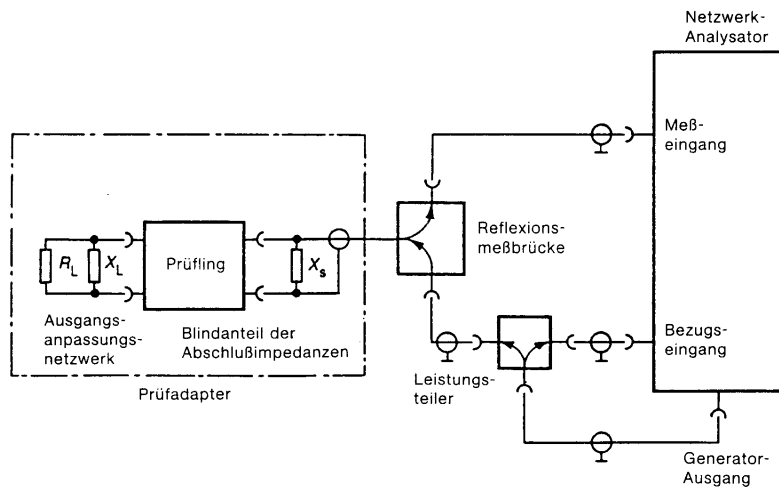
Für die Reflexion am Eingang und Ausgang sind es drei Meßgrößen gebräuchlich:

Reflexionskoeffizient  $\rho = \left| \frac{\underline{Z} - \underline{Z}_0}{\underline{Z} + \underline{Z}_0} \right|$  mit  $\underline{Z} = \underline{Z}_{in}$  bzw.  $\underline{Z}_{out}$  (14)

Reflexionsdämpfung  $a_r = 20 \lg \left| \frac{1}{\rho} \right|$  (15)

Stehwellenverhältnis  $VSWR = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|}$  (16)

Die Messung wird ein Aufbau nach Bild 10.5 benutzt.



ANMERKUNG 1: Anstatt des Netzwerkanalysators kann auch ein Vektorvoltmeter oder ein gleichwertiges Meßgerät verwendet werden. Einige Meßgeräte stellen das Meßergebnis in einem Smith-Diagramm dar. Die Impedanz und Reflexionsdämpfung können dann direkt aus dem Smith-Diagramm abgelesen werden.

ANMERKUNG 2: Die Verbindung zwischen dem Filter und der Reflexionsdämpfungs-Brücke sollte sehr kurz sein, um die Genauigkeit der Meßwerte zu garantieren.

ANMERKUNG 3: Die Nennimpedanz des verwendeten Kabels sollte der Impedanz der Meßgeräte entsprechen.

Bild 10.5: Meßschaltung für die Reflexionsdämpfung (aus [1])

### 10.3 Messung des Intermodulationsverhaltens

Für viele Anwendungen ist die Messung der Intermodulationsfestigkeit von Filtern von großer Bedeutung. Sie soll daher getrennt beschrieben werden.

Die Intermodulationsverzerrung wird durch Nichtlinearitäten der Filterbauteile hervorgerufen. Bei Quarzfiltern sind dies vor allem die Pegelabhängigkeit (DLD, Dips usw.) der Filterquarze, die bei schmalbandigen Filtern dominieren, und die Nichtlinearität der Spulen (insbesondere des Kernmaterials), die bei größeren Bandbreiten und im Sperrbereich maßgebend sind. Bei SAW-Filtern sind es insbesondere Nichtlinearitäten in der Grenzfläche Substrat zu Metallisierung usw. Die „ideale“ Verhalten der Intermodulationsprodukte in Abhängigkeit vom Eingangspegel zeigt Bild 10.6.

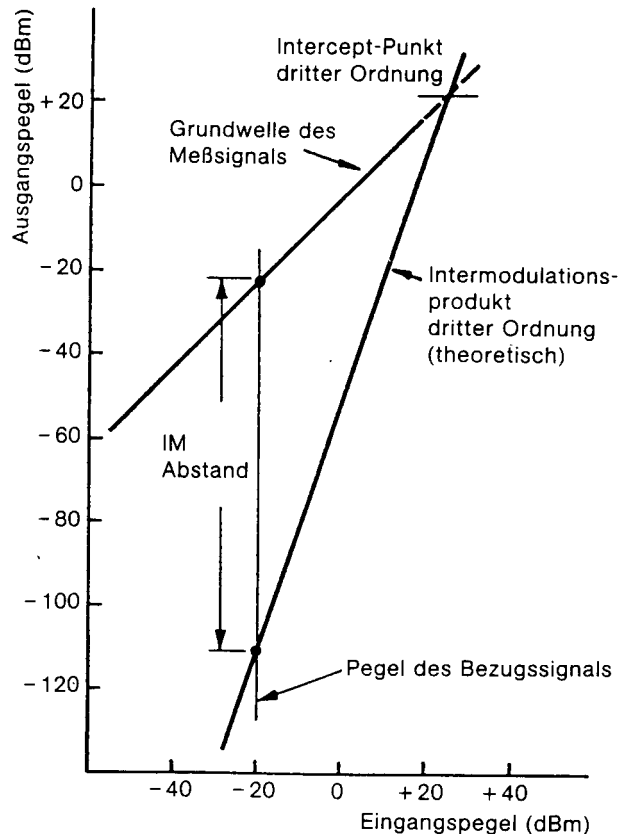


Bild 10.6: Intermodulationsverlauf für ein piezoelektrisches Filter (aus [1])  
Die Steilheit der Pegelfunktionen entspricht dem Ordnungsgrad, die Grundwelle der ersten Ordnung und die dritte harmonische der dritten Ordnung. Der Schnittpunkt der Grundwelle und der dritten Harmonischen entspricht dem Intercept-Punkt.

Da die Intermodulationsverzerrung durch mehrere Bauteile und Mechanismen hervorgerufen werden, die bei verschiedenen Pegeln einsetzen können, ist in der Praxis der Verlauf des Produkts 3. Ordnung oft nicht so linear (in der logarithmischen Darstellung) wie im Bild dargestellt.

Bild 10.7 stellt den prinzipiellen Meßaufbau zur Messung der Intermodulation dar.

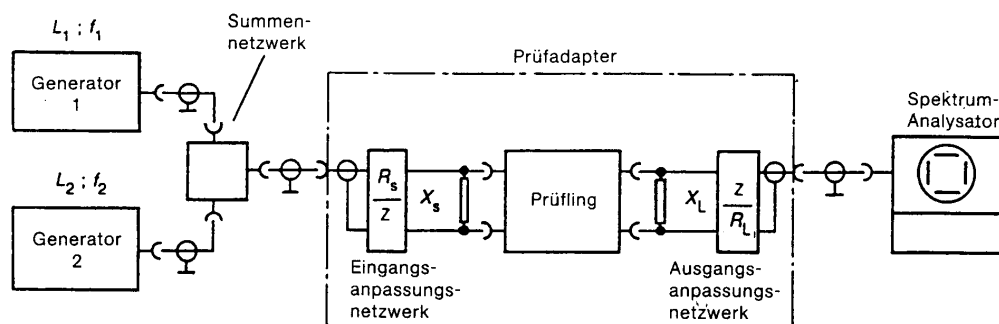


Bild 7: Messung der Intermodulationsverzerrung

Bild 10.7: Messung der Intermodulationsverzerrung (aus [1])

Meist wird bei Filtern die sogenannte Außerbandintermodulation 3. Ordnung mit 2 äquidistanten Meßfrequenzen  $f_1$  und  $f_2$  im Sperrbereich des Filters spezifiziert. In einigen Fällen wird auch die Innerband-Intermodulation angegeben, bei der die

Meßfrequenzen im Durchlaßbereich des Filters liegen. Bei den nichtlinearen Mischprodukten ist vor allem das Produkt 3. Ordnung wichtig, d.h. die Frequenzen  $(f_1 - 2f_2)$  bzw.  $(f_2 - 2f_1)$ , die in den Durchlaßbereich des Filters fallen. Zur reproduzierbaren Messung sind folgende Punkte zu beachten:

1. Beide Generatoren müssen über den Leistungssummierer ausreichend entkoppelt sein, ggf. über zusätzliche Dämpfungsglieder.
2. Der Eingangspegel der beiden Meßfrequenzen am Filtereingang bei abgetrenntem Filter und korrektem Abschluß des Anschlusses ist exakt zu spezifizieren. Die durch den Meßaufbau einschließlich des Meßempfängers selbst produzierte Intermodulation muß deutlich geringer als die zu messende Intermodulationsverzerrung sein.
3. Es ist darauf zu achten, daß die Oberwellen der Generatoren ausreichend unterdrückt sind, da ihre Intermodulationsprodukte ebenfalls in den Nutzkanal fallen können. Außerdem sind unbedingt Generatoren mit geringerem Phasenrauschen zu verwenden.
4. Es ist anzugeben, auf welchen Punkt der zulässige Intermodulationspegel sich bezieht. Im allgemeinen wählt man den am Filterausgang gemessenen Pegel. Der am Filtereingang vorhandene Pegel ist dann um die Grunddämpfung höher.
5. Die Charakterisierung der Intermodulationsverzerrung durch einen Intercept-Punkt  $IP_3$  ohne Angabe der Pegel der Testfrequenzen ist bei Quarzfiltern oft fragwürdig, da das Intermodulationsprodukt über einen weiten Eingangspegelbereich nicht immer linear (in logarithmischer Darstellung) ansteigt.

Es ist daher unbedingt zu empfehlen, den Meßaufbau bei Intermodulationsmessungen zwischen Anwender und Hersteller zu vereinbaren und ggf. Vergleichsmessungen durchzuführen.



## 10.4 Literaturliste

- [1] DIN IEC 368: Piezoelectrische Filter  
Teil 1: Allgemeine Angaben, Normwerte und Prüfbedingungen  
Teil 2-1: Leitfaden für die Anwendung von piezoelektrischen Filtern; Hauptabschnitt 1 - Quarzfilter  
Teil 3: Gehäuse
- [2] DIN EN 167000 Fachgrundspezifikation: Piezoelektrische Filter  
DIN EN 167100 Rahmenspezifikation: Piezoelektrische Filter  
DIN EN 167101 Vordruck für Bauartspezifikation: Piezoelektrische Filter  
DIN EN 167200 Rahmenspezifikation: Piezoelektrische Filter (Bauartzulassung)  
DIN EN 167201 Vordruck für Bauartspezifikation: Piezoel.Filter (Bauartzulassung)
- [3] DIN IEC 862: Oberflächenwellen (OFW)-Filter  
Teil 1: Allgemeine Angaben, Normwerte und Prüfbedingungen  
Teil 2-1: Leitfaden für die Anwendung von Oberflächenwellen-Filtern  
Teil 3: Gehäuse
- [4] DIN EN 166000 Fachgrundspezifikation: Oberflächenwellenfilter  
DIN EN 166100 Rahmenspezifikation: Oberflächenwellenfilter  
DIN EN 166101 Vordruck für Bauartspezifikation: Piezoelektrische Filter  
DIN EN 166200 Rahmenspezifikation Oberflächenwellenfilter (Bauartzulassung)
- [5] Smith,W.L.: Characterization and Measurement of Filters Using a Vector Network Analyzer; Proc. 13<sup>th</sup> PiezoelectricDevices Conference (1991), S. 86 - 111