

16. Dämpfung

Die Dämpfung ist die Abschwächung einer Leistung in HF-Systemen und die Verstärkung eine Erhöhung einer Leistung um einen bestimmten Betrag. Beide Vorgänge können ähnlich betrachtet werden und sind reziprok zueinander vergleichbar. Daher sind sowohl die Definitionen als auch die Meßverfahren in vielen Fällen gleich. Hier soll aber hauptsächlich auf die Dämpfungselemente und deren Messung eingegangen werden.

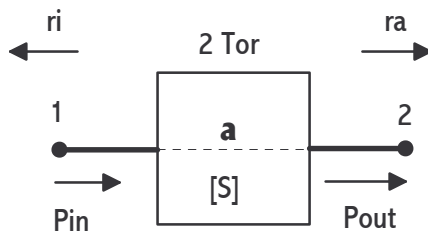
16.1 Dämpfungsdefinitionen

Die Dämpfung (Insertion-Loss) a ist ein Leistungsverhältnismaß zwischen Eingangs- und Ausgangsleistung und wird im allgemeinen aus praktischen Gründen in Dezibel angegeben.

$$a \text{ [dB]} = P_{\text{in}} \text{ [dBm]} - P_{\text{out}} \text{ [dBm]} \quad (16.1)$$

Hier wird absichtlich bei der Definition ein Vorzeichenfehler gemacht, um die Dämpfung immer als positiven Zahlenwert zu erhalten. Bei den Berechnungen mit den S-Parametern muß aus mathematischen Gründen die Dämpfung immer mit -dB und die Verstärkung mit +dB angegeben werden, wie es auch richtig ist. Weiter Hinweise hierzu im Kapitel Streumatrix. Für die Dämpfung ist $P_{\text{in}} > P_{\text{out}}$ und bei Verstärkung wäre das Verhältnis umgekehrt. Die Gleichung 16.1 kommt von der Definition, die in Gleichung 16.2 wiederzufinden ist.

$$a = 10 \log \frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{out}}} \text{ [dB]} \quad (16.2)$$



Es ist das Verhältnis von der Leistung (P_{in}) in eine Last Z_0 ohne Dämpfungsglied (Attenuator) zu der Leistung (P_{out}) in diese Last mit Dämpfungsglied. Das Dämpfungsglied stellt ein 2-Tor dar, wie aus der Abbildung zu ersehen ist. Nach den Regeln des Logarithmus gilt für Gleichung 16.2 auch: $a[\text{dB}] = 10 \log P_{\text{in}} - 10 \log P_{\text{out}}$ woraus sich Gleichung 16.1 mit P in dBm bezogen auf 1mW herleiten läßt. Für die Rückwandlung von dB in

einen Verhältnisfaktor gilt wieder Formel 16.3.

$$\frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{out}}} = 10^{\frac{a[\text{dB}]}{10}} \quad (16.3)$$

Durch Vergleich der Gleichungen 18.ff? (1-Torleistung) und 18.ff? (2-Torleistung) ins Verhältnis gesetzt ergibt sich eine neue Gleichung ($r_a = \text{Last}; r_i = \text{Quelle}$).

$$a = 10 \log \frac{|(1-s_{11}*r_i)*(1-s_{22}*r_a)-s_{21}s_{12}r_a r_i|^2}{|s_{21}|^2 * |1-r_i*r_a|^2} \quad (16.4)$$

Dies ist eine Art die (Einfügungs-) Dämpfung zu beschreiben. Im folgenden werden noch weitere Gleichungen angegeben, die aus unterschiedlichen Annahmen und Ansätzen entstehen. Meist müssen sie mit der gebräuchlichen englischen Bezeichnung angegeben werden. Die Transducer-Loss (Übertragungsdämpfung) Gl. 16.5 gibt das Verhältnis von maximaler Quellenleistung (18.ff?) zu der 2-Torleistung mit Dämpfungsglied (18.ff?) an. Die maximale Quellenleistung ist ein Sonderfall der 1-Torleistung.

$$a_{CM} = 10 \log \frac{|(1-s_{11}*r_i)*(1-s_{22}*r_a)-s_{21}s_{12}r_a r_i|^2}{|s_{21}|^2 * (1-|r_i|^2) * (1-|r_a|^2)} \quad (16.5)$$

Weiter gibt es: Dissipation-Loss / Power-Loss = Leistung am Eingang des Dämpfungsgliedes mit Dämpfungsglied zu Leistung in der Last mit Dämpfungsglied; Available-Loss = Maximale

Quellenleistung zu maximaler Ausgangsleistung des Dämpfungsgliedes. Eine wichtige Gleichung ist 16.6 die (Characteristic)-Insert-Loss, die aus den Gleichungen 16.4 oder 16.5 mit der Bedingung $Z_0=Z_L=Z_1 \div r_i=r_a=0$ hergeleitet wird. Bei dieser idealen Voraussetzung fallen fast alle Terme weg.

$$A = a_{CI} = 10 \log \frac{1}{|s_{21}|^2} = -20 \log |s_{21}| = 20 \log \frac{|U_q|}{|2 * U_2|} \quad [\text{dB}] \quad (16.6)$$

Die Gleichung für A läßt sich aufspalten in einen Reflexions- und Dämpfungsanteil.

$$A = A_R + A_D = 10 \log \frac{1}{1-|s_{11}|^2} + 10 \log \frac{1-|s_{11}|^2}{|s_{21}|^2} \quad [\text{dB}] \quad (16.7)$$

A_R bezeichnet man als Reflexionsdämpfung (Reflexion-Loss) siehe auch 17.12 und A_D ist der reine Dämpfungsanteil. Beide zusammen sind untrennbar für die Gesamtabschwächung der Eingangsleistung verantwortlich. Bei Messungen von variablen Dämpfungsgliedern, bei denen es eine Grunddämpfung in Stellung 0dB gibt, ist die Substitution-Loss A_{inc} von Bedeutung. Gleichung 16.8 läßt sich ähnlich wie 16.2 herleiten.

$$a_S = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad [\text{dB}] \quad (16.8) \quad P_1 > P_2$$

P_1 ist die Leistung bei der Dämpfung 1 des 2-Tors und P_2 ist die Leistung bei der Dämpfung 2 des 2-Tors. Mit P_1 und P_2 für Gleichung 16.29 und der Bedingung $r_i=r_a=0$ ergibt dies die Gleichung 16.9, die die Differenz zwischen zwei Dämpfungseinstellungen beschreibt und genau der Differenz der Gleichung 16.6 zweifach angewendet entspricht.

$$A_{inc} = 20 \log \frac{1}{|s_{21(2)}|} - 20 \log \frac{1}{|s_{21(1)}|} \quad [\text{dB}] \quad (16.9)$$

Beispiel: Ein Schritt von 10 auf 30 dB: $A_{inc} = 30 \text{ dB} - 10 \text{ dB} = 20 \text{ dB}$

Eine weitere Größe ist der Available-Power-Transmissionfaktor, der dem Verhältnis von maximaler Leistung am Torausgang 2 zu der maximalen Quellenleistung entspricht.

$$\tau = \frac{|s_{21}|^2 * (1-|r_i|^2)}{|1-r_i*s_{11}|^2 - |s_{22}+r_i*(s_{12}s_{21}-s_{11}s_{22})|^2} \quad (16.10)$$

Ähnlich ist der Übertragungskoeffizient T zu verstehen.

$$T = 20 \log \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (16.11)$$

Bei großen Dämpfungswerten ist der Leckfehler zu beachten. Um ihn unter 0.001dB zu halten, muß die Leckdämpfung A_L um 80 dB größer als der Dämpfungswert A des Dämpfungsgliedes sein.

$$\Delta A_L = \pm 8.686 * \left(10^{-\frac{(A_L-A)[\text{dB}]}{20}} \right) [\text{dB}] \quad \text{für } A_L \gg A \quad (16.12)$$

16.2 Dämpfungsglieder

Dämpfungsglieder werden in der HF-Meßtechnik zur allgemeinen Leistungsverminderung von zu großen Leistungen, zur Veränderung der Dynamikbereiche in Meßaufbauten mit Sensoren oder zur Verbesserung der Reflexionsfaktors bei reflexionsreichen Bauteilen (Anpassung) verwendet. Ein Dämpfungsglied ist ein Durchgangselement passiver Art, daß die anliegende Eingangsleistung um einen bestimmten Betrag abgeschwächt als Ausgangsleistung anbietet. Im Gegensatz zu einem Filter soll die Dämpfung hier möglichst frequenzunabhängig sein. Es wird die übertragene Leistung im System (Z_0) dadurch verringert. Beim Verstärker, der aktiv ist und die Leistung erhöhen soll, ist dies umgekehrt. Um die Ausgangsleistung zu

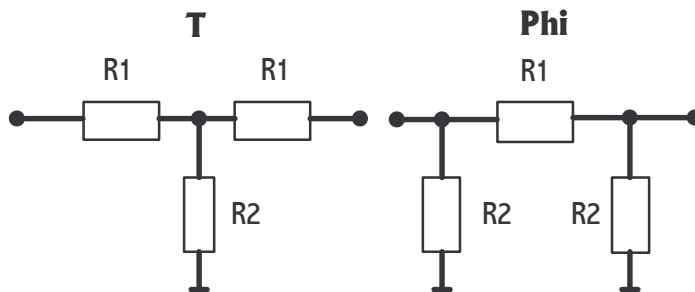
verkleinern kann man den Eingangsreflexionsfaktor künstlich erhöhen, was aber zu anderen unerwünschten Effekten in der Schaltung von der Quellenseite her führen kann, oder die Leistung im Dämpfungsglied bei allseitiger Anpassung in Wärme umwandeln. Die erste Methode ist nicht gebräuchlich, obwohl sie fast immer zu einem geringen Anteil vorhanden ist. Die Abschwächer gibt es als feste Dämpfungsglieder, in teils mehrstufig schaltbare (Eichleitung) oder in variabler Ausführung. Die koaxialen Versionen können aus verlustbehafteten Dielektrika bestehen, werden aber meistens aus Widerstandskombinationen in Phi- oder T-Schaltung aufgebaut. Die schaltbaren bestehen entweder aus einer Widerstandskombination, deren Widerstandswerte umschaltbar sind oder aus festen Kombinationen bestehen, die wechselweise in Reihe zu oder abgeschaltet werden. Für die zwei üblichen Widerstandskombinationen lassen sich im Z_L -System mit ax für das Verhältnis zwischen Eingangsspannung und Ausgangsspannung die Widerstandswerte bestimmen. Für die T-Schaltung gelten die Gleichungen 16.13 und 16.14 und für die Phi-Schaltung 16.15 und 16.16.

$$R_1 = Z_L * \frac{ax-1}{ax+1} \quad (16.13)$$

$$R_2 = \frac{2*Z_L}{ax-1/ax} \quad (16.14)$$

$$R_1 = \frac{Z_L}{2} * (ax - 1/ax) \quad (16.15)$$

$$R_2 = Z_L * \frac{ax+1}{ax-1} \quad (16.16)$$



Beispiel: Beim T-Glied: Dämpfung 20dB
 $\Rightarrow ax=10$; mit $Z_L=50$ Ohm $\Rightarrow R_1=40.91$
 Ohm und $R_2=10.10$ Ohm

Die Dämpfungsglieder sind je nach Konstruktion nur für eine bestimmte maximale Leistung

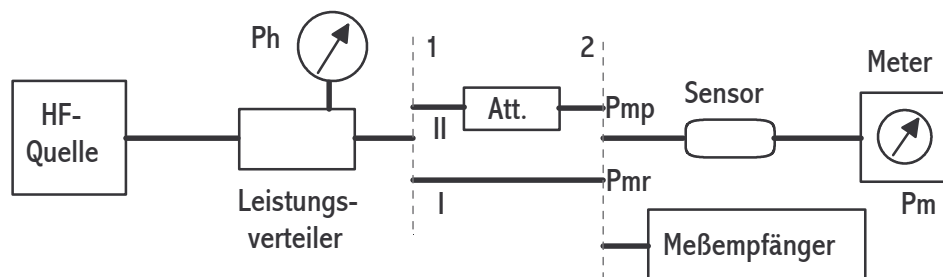
zugelassen. Ihr Wert ist temperaturabhängig. Je nach Aufbau und abhängig von den Anschlußsteckern reicht der Frequenzgang von Gleichspannung bis in den Hochfrequenzbereich (26.5Ghz). Die festen Einzeldämpfungsglieder sind normalerweise erhältlich in den Dämpfungswerten 3dB, 6dB und 10dB bis 60dB in 10dB Schritten. Die Dämpfungsglieder von Hohlleitern haben meist einen verlustbehafteten Körper, der fest oder beweglich im Hohlleiterrohr angeordnet ist. Die Körper bestehen meist aus Widerstandsschichten, die auf einem dünnen Scheibenträger aufgebracht sind Es gibt auch die Möglichkeit die Hohlleiter unterhalb ihrer Grenzfrequenz zu betreiben. Es nimmt hierbei die Feldstärkenamplitude exponentiell mit der Rohrlänge ab. Das ergibt ein von der Länge abhängiges Dämpfungsmaß. Dieser Effekt wird beim Grenzwellendämpfungsglied, einer Senderspule und Antennenspule in einem Hohlleiter genau verstellbar angeordnet, angewendet. Über ein Drehrad kann die Dämpfung relativ zur Grunddämpfung, die mit etwa 18dB sehr hoch ist, sehr präzise gewählt werden. Die beiden Spulen im Hohlleiter müssen bei einer festen Frequenz real an 50 Ohm über L-C Kombinationen angepaßt werden. Auch Richtkoppler lassen sich für über längere Zeit sehr stabile Dämpfungseinstellungen, wie sie in schaltbaren Dämpfungsnormalen gewünscht werden, verwenden. Nachteilig ist die relativ starke Frequenzabhängigkeit, die sich aber durch geschickte Reihenschaltung von zwei Kopplern etwas kompensieren läßt. Grundsätzlich sind die Hohlleiterdämpfungsglieder besser, als die koaxialen. Ein Tabelle von käuflichen festen und variablen Dämpfungsgliedern beider Versionen soll einen Überblick geben.

Art	Typ (dB)	Hersteller	Frequenz	Dämpfung z.B:	VSWR	P _{max}
Koax	8491A (3-60)	HP	0 .. 12 Ghz	10±0.6dB	1.2	2W
Koax	8491B (3-30)	HP	0 .. 18 Ghz	10±0.6dB	1.4	2W
Koax	8493C (3-40)	HP	0 .. 26.5 Ghz	10±0.5dB	1.25	2W
Koax	8498A (30)	HP	0 .. 18 Ghz	30±1dB	1.2	25W
Koax	8494B (1-Step)	HP	0 .. 18 Ghz	0 .. 11±>0.3dB	1.5 .. 1.9	1W
Koax	8496B (10-Step)	HP	0 .. 18 Ghz	0 .. 110dB±4%	1.5 .. 1.9	1W
Koax	DPU (1/10-Step)	R&S	0 .. 2 Ghz	0 .. 140dB	1.2	0.4W
Koax	DPSP(1-Step)	R&S	0 .. 2.7 Ghz	0 .. 139±>0.2dB	1.4	1W
Koax	RSP(0.1-Step)	R&S	0 .. 2.7 Ghz	0 .. 140±>0.2dB	1.5	1W
Hohl	382A (Linear)	HP	2.6 .. 60 Ghz	0 .. 50dB±2%	1.15	~2W

16.3 Meßaufbauten

Die Dämpfung eines HF-Bauteils wird meist über eine Spannungs- oder Leistungsmessung bestimmt. Man kann die Dämpfung direkt messen oder durch ein Präzisionsdämpfungsglied substituieren. Als Referenz dient üblicherweise der Durchgang (Leitung).

a) **Richtkoppler (Splitter):** Der Richtkoppler ist dazu da die Pegelschwankungen des Generators der hinlaufenden Welle auszukoppeln, um sie bei der Dämpfungsmessung herauszurechnen. Zum Auskoppeln der Welle kann auch ein Leistungsverteiler 2-fach-R verwendet werden. Für etwas ungenauere Messungen ist statt der rechnerischen Korrektur des Generatorpegels auch eine direkte Pegelsteuerung (ALC) des Generators mit P_h möglich. Zuerst wird



eine Referenzmessung I (R) durch einen Kurzschluß zwischen Tor 1 und 2 oder besser durch direktes Anschließen des Sensors an Tor 1 nötig. Dies entspricht dem 0 dB Dämpfungswert. Bei schaltbaren Dämpfungsgliedern wird oft die Schalterstellung 0 dB für die Referenzmessung gewählt. So kann die Schrittgenauigkeit (Δ -dB) ohne Aus- und Einbau für die Referenzmessung leicht bestimmt werden. Für die normale Messung muß nun nach der Referenzmessung der Prüfling eingefügt werden und der Sensor an Tor 2 angeschlossen werden II (P). Aus Gleichung 16.1 folgt hier Gleichung 16.17 für jeden einzelnen Frequenzpunkt.

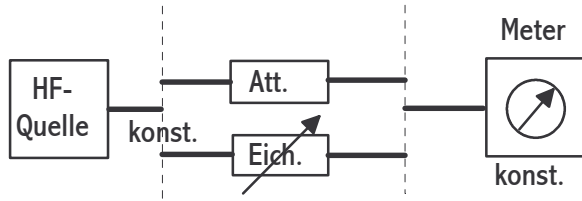
$$a = (P_{mR} - P_{mP}) - (P_{hR} - P_{hP}) \quad [\text{dB}] \quad (16.17)$$

$$\text{mit } P_{hR} = P_{hP} \Rightarrow a = P_{mR} - P_{mP} \quad [\text{dB}] \quad (16.18)$$

Da breitbandige Sensoren nicht über eine so große Dynamik verfügen, wird um Dämpfungen größer als etwa 70 dB zu messen das Signal mit einem Mischer und einem zweiten Localgenerator auf eine andere Frequenz - oft 30 MHz-heruntergesetzt, um so mit einem schmalbandigen rauscharmen Präzisionsempfänger direkt messen zu können. Hier bieten sich selektive Voltmeter (SPM-19), Meßempfänger (HP8902) oder auch Spektrumanalysatoren an, die

verschieden gute Spezifikationen haben. Es sind die Linearitätsprobleme besonders bei großen Pegeln und das Rauschen bei kleine Signalen zu beachten (70dB-Programm).

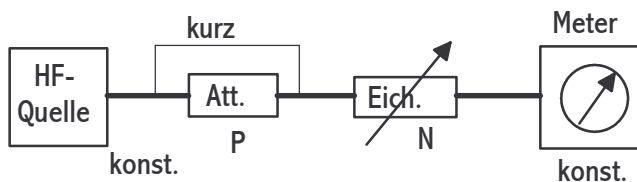
b) **Eichleitung:** Als Eichleitung bezeichnet man hier ein in dB-Schritten einstellbares Präzisionsdämpfungsglied (Dämpfungsnormale). Zuerst wird der Prüfling eingefügt und danach die



Eichleitung anstelle des Prüflings eingesetzt und so lange verstellt, bis die Anzeige mit der bei der Prüflingsmessung übereinstimmt. Die Generatorspannung bleibt hierbei konstant und das Dämpfungsnormale muß eine hohe Auflösung haben. Nach dem Vergleich gilt dann: $\text{dB}_{\text{Att}} = \text{dB}_{\text{Eich}}$. Der große Vorteil ist,

daß der Empfangsteil mit Meter in einem günstigen Arbeitspunkt betrieben werden kann und so auch sehr hohe Dämpfungswerte bestimmt werden können. Das Meter wird sich in der Praxis mit der Eichleitung nicht konstant halten können, aber kleine Abweichungen sind bei üblichen Empfangssystemen wegen der guten Linearität nicht störend.

c) **HF-Substitution:** Hierbei werden Prüfling und Normal (Eichleitung) in Reihe geschaltet. Ist der Prüfling wie das Normal auf 0 dB schaltbar, so kann der Aufbau während der ganzen Messung zusammen verbunden bleiben. Zuerst wird der Prüfling gemessen, wenn die Eichleitung auf 0 dB eingestellt ist. Danach wird der Prüfling auf 0 dB gestellt oder kurzgeschlossen und die Eichleitung dann so lange verstellt, bis die Anzeige mit der Prüflingsmessung übereinstimmt. Für die Fehlerbetrachtungen müssen die zu Teil wechselnden Reflexionsfaktoren und die Dämpfungsunsicherheit der Eichleitung beachtet werden. Die Generatorspannung muß während der beiden Meßvorgänge konstant sein. Es gilt dann wieder wie bei Fall b:



$$\text{dB}_{\text{Att}} = \text{dB}_{\text{Eich}}$$

Beispiel: 1.) $P=20\text{dB} \Rightarrow N=0\text{dB}$ 2.) $P=0\text{dB} \Rightarrow N=20.2\text{dB} \Rightarrow P_{\text{wahr}}=20.2\text{dB}$
dann folgt: 1.) $P=40\text{dB} \Rightarrow N=0\text{dB}$ 2.) $P=20\text{dB} \Rightarrow N=20.4\text{dB} \Rightarrow P_{\text{wahr}}=20.2+20.4 \text{ dB}$ und so weiter.

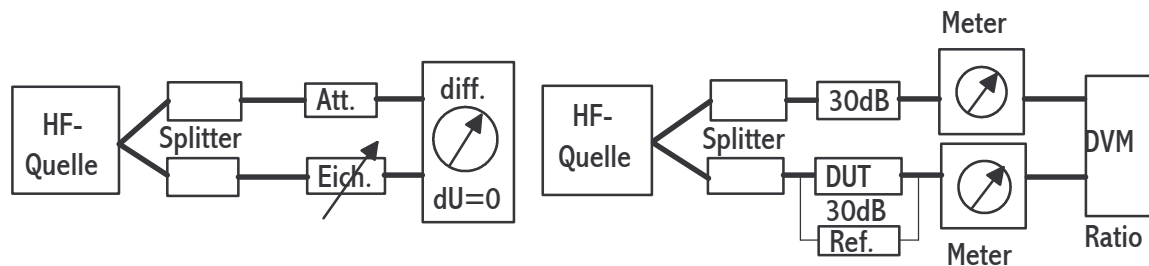
1. Bei den Meßmethoden Eichleitung (b) und Substitution (c) kann als Anzeigemeter und Meßeinheit ein Selektiver Meßempfänger, eine Spektrumanalysator, ein HF-Sensor oder auch das EPM-1 (bei 0dBm) zum Einsatz kommen. Die absolute Genauigkeit der Geräte ist relativ uninteressant, da ja ihre Anzeige auf einem etwa konstanten Wert gehalten wird. Jedoch sollte eine hohe Auflösung mit guter Kurzzeitstabilität vorhanden sein. Die Generatorspannung, die bei jeder Laständerung über die Meßzeit konstant sein muß, kann mit einem Leistungsteiler im Referenzarm überwacht werden. Die Substitution kann auch bei Systemen, die mit einer Zwischenfrequenz arbeiten im ZF-Teil angewendet werden, das hat den Vorteil einer schmalbandigen Eichleitung von höherer Präzision. Allerdings sind mit jeder ZF-Mischung andere Nachteile zu erkaufen.

d) **Meßempfänger:** Ein Meßempfänger wie der SPM-19 von W&G oder 8902 von HP kann zur direkten Dämpfungsmessung über einen weiten Frequenzbereich eingesetzt werden. Der Meßbereich liegt zwischen 50 Hz und 1500 MHz und die Geräte besitzen oft eine Referenztaaste, um Relativmessungen zu einer Grunddämpfung durchzuführen. Um auch große Dämpfungswerte zwischen 90 dB und 140dB messen zu können muß die Bandbreite des Meßempfängers klein gehalten werden, um noch einen genügende großen Rauschabstand zu

erhalten. Eine AFC-Schaltung sorgt dann dafür, daß die Arbeitsfrequenz der Empfängerfilter synchron zur Eingangsfrequenz gehalten werden. Entweder haben die Meßempfänger eigene Generatoren zur Einspeisung in den Prüfling oder sie müssen zusammen mit einem Generator, der besonders frequenz- und pegelstabil sein muß, betrieben werden. Zusammen mit einem Mischer können auch Dämpfungen bei Frequenzen über 1500 Mhz gemessen werden. Hierzu ist aber noch zusätzlich zum Mischer ein Localgenerator nötig. Die Messungen werden üblicherweise in 50-Ohm-Systemen durchgeführt. Dazu wird zuerst der Generator ohne eingefügten Prüfling mit dem Eingang des Meßempfängers oder Mixers verbunden um dann die Referenz zu setzen. Dann fügt man den Prüfling zwischen Generator und Meßeingang ein. Der Dämpfungswert wird jetzt für eine Frequenz angezeigt. Frequenzdurchläufe, wie bei Netzwerkanalysatoren üblich, werden bei den Präzisionsverfahren normalerweise nicht angewendet. Die Reflexionsfaktoren der Prüflinge sollten sehr klein sein, da sie sonst die Unsicherheit der Messung stark erhöhen.

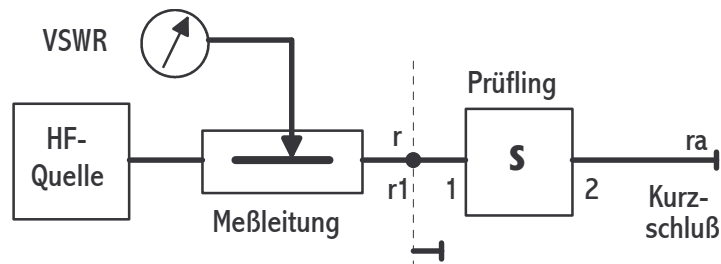
Der HP 8902A ist ein vollautomatischer, HP-IB-steuerbarer Präzisions-Meßempfänger mit fünf HF-Meßfunktionen (Trägerleistung, selektiv gemessener Trägerpegel, Trägerrauschen/Nachbarkanalleistung, Modulation, Trägerfrequenz) und drei NF-Meßfunktionen (Pegel, Frequenz und Verzerrung). Für die Dämpfungsmessung bis zu 100dB wird die Funktion selektiver abgestimmter Pegelmesser (Tuned RF Level) benötigt. Das Gerät ermöglicht Messungen herunter bis zu einem absoluten Pegel von -127dBm ($0.1\mu\text{V}$). Zusammen mit einem HF-Generator sind Dämpfungsmessungen von 100dB bei 0dBm Einspeisepegel mit einer typischen Meßunsicherheit -bei 30 MHz ohne Reflexionseinflüsse- von 0.03dB möglich. Die angegebene Herstellermeßunsicherheit beträgt für den gesamten Frequenzbereich bei dieser Dämpfung 0.12dB. Der Meßempfänger ist ein Überlagerungsempfänger, der das ankommende Signal über einen Mischer in eine feste Zwischenfrequenz umwandelt und dann demoduliert, um es schließlich zur Anzeige zu bringen. Der Schaltungszug bestehend aus HF-Verstärker, Dämpfungsgliedern, Mischer, Filter, Zwischenfrequenzverstärker (455kHz) und Detektor ist für die hier gewünschte Anwendung in Betrieb. Um eine möglichst hohe Empfindlichkeit zu erhalten, muß mit synchronisiertem Detektor gemessen werden. Hierbei wird der Detektor mit dem Zwischenfrequenzsignal synchronisiert und man erhält so eine Meßbandbreite von nur 150Hz.

e) Differenzvoltmeter: Nach gleicher angepasster Aufteilung des Generatorsignals wird das Normal so lange verstellt, bis die Differenzspannung Null ergibt. Dies ist auch mit einem Zweikanaloszilloskop möglich. Die Differenzspannung kann beispielsweise mit einem Vektorvoltmeter mit zwei selektiven Eingängen detektiert werden. Wenn $dU=0 \Leftrightarrow dB_{\text{Att}}=dB_{\text{Eich}}$. In zwei Abbildungen werden die beschriebene und eine ähnliche Methode gezeigt.



f) Reflexion: Die Reflexion in dB entspricht einem Dämpfungswert. So wird ein Signal, was durch ein Dämpfungsglied von 6 dB auf einen Kurzschluß trifft und voll reflektiert wird, an seinem Eingang, um $2 \cdot 6 = 12$ dB gedämpft, wirksam.

Mit einem festen Kurzschluß und einer Meßleitung wird der Reflexionsfaktor bestimmt und daraus die Dämpfung abgeleitet. Ein ähnliches Verfahren ist direkt mit dem Netzwerkanalysator möglich. Nach Gleichung A25 ???? gilt für r:



$$r = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}r_a}{1 - S_{22}r_a} \quad (16.19)$$

Gesucht wird nun S_{21} für die Gleichung 16.6. Es wird der Idealfall angenommen, das $S_{11} = S_{22} = 0$ gilt. Dies bedeutet das es keine Reflexion an den beiden Toren des Dämpfungsgliedes vorhanden sind. Aus Gleichung 16.19 ergibt sich eine Vereinfachung: $r_1 = S_{12}S_{21}r_a$. Unter der Annahme, daß sich der Prüfling reziprok verhält gilt $S_{12} = S_{21}$ und damit für den Reflexionsfaktor die neue Gleichung 16.20.

$$r_1 = S_{21}^2 * r_a \quad (16.20)$$

Die Abbildung die auch für das zweite Verfahren gültig ist, zeigt vereinfacht den Meßaufbau. Zuerst wird eine Referenzmessung durchgeführt. Dabei wird direkt r_a an der Meßebeane bestimmt. Dann folgt die eigentliche Messung von r_1 bei eingefügtem Prüfling. Aus $r_1 = 2 * S_{21} + r_a$ [dB] folgt die Auswertegleichung 16.21, wobei natürlich die Umrechnung der VSWR-Werte zuvor durchgeführt werden muß.

$$S_{21} = \frac{|r_1 - r_a|}{2} \text{ [dB]} \quad (16.21)$$

Für kleine Dämpfungswerte bietet sich ein Verfahren an, das vergleichbar mit dem vorherigen ist, aber mit einem verschiebbarem Kurzschluß (Sliding-Short) an Tor 2 des Prüflings durchgeführt wird.

$$r = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21} * (-e^{-j2\beta l})}{1 - S_{22} * (-e^{-j2\beta l})} \quad (16.22)$$

In der Gleichung gibt l die Länge und β die Phase der verlustfreien Leitung zwischen Tor 2 und dem Kurzschlußschieber an. Dies bedeutet, daß der Kurzschlußschieber direkt an dem Prüfling zu befestigen ist. Durch das Verschieben des Kurzschlusses entsteht für r ein verschobener Kreis auf dem Polardiagramm mit dem Radius R, der den Ursprung (Nullpunkt) einschließen muß, sonst sind die folgenden Annahmen nicht möglich. Der Radius entspricht einer sinusförmigen Welligkeit der Amplitude, die um ein konstantes dR versetzt ist, wobei dies dem Kreisversatz aus dem Koordinatenmittelpunkt entspricht. Für den Radius gelten in Polarkoordinaten die Gleichungen 16.23 (aus 16.22) und 16.24, die im Meßfall gleichzusetzen sind.

$$R = \frac{1}{A_D} = \frac{|S_{21}|^2}{1 - |S_{11}|^2} \quad (16.23)$$

$$R = \frac{|r|_{\max} + |r|_{\min}}{2} = \frac{s_{\max} * s_{\min} - 1}{(s_{\max} + 1) * (s_{\min} + 1)} \quad (16.24)$$

Für die Formel 16.23 wurde wieder angenommen, daß $S_{12}=S_{21}$ gilt. Bei Formel 16.24 im Teil zwei ist die Angabe für die Messung mit dem Stehwellenverhältnis gemacht. Das Maximum und Minimum sind durch das Verschieben des Kurzschlusses zu suchen. Um nun die wirkliche Dämpfung A zu bestimmen, muß Gleichung 16.7 beachtet werden. Hier fehlt noch der Reflexionsanteil A_R , der mit einer extra Messung mit einer guten Last (Load-50Ohm) bestimmt wird. Beide Anteile zusammen $A=A_D+A_R$ ergeben den gewünschten Wert. Diese Methode ist recht aufwendig und wird daher selten angewendet.

g) Netzwerkanalysator: Ein vektorielle Netzwerkanalysator (z.B: HP8510) besteht aus vier Komponenten, die zum Teil nach Anwenderwunsch frei wählbar sind. Die beiden Hauptkomponenten, Display-Prozessor und IF-Detektor gehören zusammen und bilden die Kerneinheit für die Verarbeitung der komplexen Signale, deren Umrechnungen mit Fehlerkorrektur, die Abspeicherung der Arbeits- und Kalibrierdaten, sowie die Anzeige und Menuesteuerung für den Anwender. Je nach Anwenderwunsch können verschiedene S-Parameter-Test-Sets gewählt werden. In dem Test-Set befinden sich Dämpfungsglieder für das Eingangssignal, die Koppler zum Messen der Prüflingssignale und die erste Mischerstufe, die auf eine Zwischenfrequenz von 20 MHz herabmischet. Am Test-Set befinden sich die Anschlußports für die Messkabel, die zum Prüfling führen und die Einspeisung des Generatorsignals. Die zwei gemischten Kopplersignale und Referenzsignale werden zum IF-Detektor weitergeleitet und dort nochmals vor der eigentlichen Amplituden-Phasenmessung auf 100kHz herabgemischt. Auch bei dem HF-Generator bestehen Wahlmöglichkeiten. Es kommt ein Synthesized Sweeper zum Einsatz, dessen HF-Ausgang direkt mit dem Test-Set verbunden ist und dessen Steuerung von den beiden Hauptkomponenten übernommen wird.

16.4 Messunsicherheitsbetrachtungen

Für die Bestimmung der Dämpfung werden Unsicherheitsbetrachtungen nur für die Messungen mit dem Netzwerkanalysator und dem Messempfänger durchgeführt und das nur beim Substitutionsverfahren durchgeführt.

Allgemein gelten für die Wiederholbarkeitseinflüsse der Steckerpaare etwa die folgenden Dämpfungswerteänderungen.

<u>Steckertyp</u>	<u>Grunddämpfung</u>		<u>frequenzab. Dämpfung (f[GHz])</u>	
GR 900	$\pm (0.0025$	+	$0.0005 * f$	dB
APC-7	$\pm (0.005$	+	$0.0003 * f$	dB
N	$\pm (0.01$	+	$0.0005 * f$	dB
SMA-3.5	$\pm (0.01$	+	$0.0005 * f$	dB
Hohlleiter	$\pm (0.005$	+	$0.0003 * f$	dB

16.4.1 Dämpfungsmessung mit dem Netzwerkanalysator

Wenn man nun die Differenz zwischen der realen (2) und der idealen (3) Dämpfung bildet, erhält man die Dämpfungsabweichung in Dezibel. Diese Abweichung durch Fehlanpassung (mismatch error) ist bei den Messungen zu berücksichtigen. Sind nur die Beträge der komplexen Größen bekannt, die Reflexionsfaktoren erheblich kleiner als eins und die Dämpfung nicht zu gering, so kann man eine vereinfachte Fehlergleichung angeben.

$$dA = \pm 8.686 * (|S_{11}|r_G + |S_{22}|r_L) \text{ dB} \quad (4)$$

Für die einfache Verbindung zwischen zwei Dämpfungsgliedern gilt:

$$dA = 8.686 * |S_{11}| * |S_{22}| \text{ dB} \quad \Leftrightarrow \quad 200 * |r_{11}| * |r_{22}| \text{ in \% (5)}$$

Nach der Kalibrierung (8752B) ist mit einem effektiven Reflexionsfaktor von weniger als 0.01 (40dB) zu rechnen. Ohne Kalibrierung würde er jedoch nur bei 0.14 (17db) liegen. Genauere Werte stehen in den Tabellen bei "Source Match" und "Load Match".

Die Linearität des 8753B liegt bei typisch 0.01dB.

Nach der Kalibrierung (TRL-Offset/8510) ist mit einem effektiven Reflexionsfaktor von weniger als 0.008 (42dB) zu rechnen. Mit Broadband-Kalibrierung würde er bei 0.018 (35db) liegen. Genauere Werte stehen in den Tabellen bei "Source Match" und "Load Match".

Die Linearität des 8510B liegt bei typisch 0.015dB.

Zur Berechnung des Meßergebnisses und Bestimmung der Meßunsicherheit wird die Modellgleichung benötigt.

Es gelten die folgenden Abkürzungen:

- D_P : Dämpfungswert des des Prüflings; Ergebnis der Messung mit Berechnung
- D_{Nx} : Dämpfungswert des(r) Normals(e); diese Variable beinhaltet auch die eigene Meßunsicherheit des Normals.
- A_N : Anzeigewert des Normals bei der Messung
- A_P : Anzeigewert des Prüflings bei der Messung
- δA_N : Reflexions-Unsicherheit für das Normal nach Gl.4
- δA_V : Reflexions-Unsicherheit für die Verbindungsstelle (Normal) nach Gl.5
- δA_P : Reflexions-Unsicherheit für den Prüfling nach Gl.4
- δA_L : Linearitätsfehler des Meßsystems
- δA_{RUE} : Unsicherheit durch Übersprechen und Rauschen (GL.8)
- δA_D : Unsicherheit durch Drift und Interpolation (teils)
- δA_K : Unsicherheit durch Kabeinflüsse
- c : Sensitivitätskoeffizient (Ableitung der Modellgleichung nach allen Veränderlichen)

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (9)$$

Für die Modellfunktion in dB gilt:

$$D_P = A_P - A_N + D_{N1} + D_{N2} + \delta A_N + \delta A_P + \delta A_V + \delta A_L + \delta A_{RUE} + \delta A_D + \delta A_K \quad (10)$$

Für die Reflexionswerte werden die Meßwerte mit den dazu gehörigen Meßunsicherheiten quadratisch addiert und so in den weiteren Gleichungen 4 und 5 verarbeitet.

$$|r_x| = \sqrt{|r_x|^2 + |\delta r_x|^2} \quad (11)$$

Für die Bestimmung der Sensitivitätskoeffizienten (c) muß die Gleichung (10) nach allen veränderlichen Variablen abgeleitet werden. Bei allen Ableitungen ergibt dies einen Betrag von 1.

$$\text{z.B.: } \frac{\partial D_P}{\partial A_P} = \frac{\partial D_P}{\partial A_P} = 1 \quad (12)$$

Aus sechs Messungen für einen Frequenzpunkt (6 GHz) wurden die folgenden Werte ermittelt:

Nr.	A_N	A_P
1	39,705 dB	40,113 dB
2	39,709 dB	40,108 dB
3	39,713 dB	40,115 dB
4	39,707 dB	40,118 dB
5	39,711 dB	40,100 dB
6	39,717 dB	40,105 dB
Mittelwert:	39,710 dB	40,109 dB
rel. Std.abw.:	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$

Der Dämpfungswerte der Normale betragen:

$D_{N1}=29,89$ dB und $D_{N2}=9,82$ dB mit einer erweiterten Meßunsicherheit von $U_{Kal1}=0,03$ dB und $U_{Kal2}=0,02$ dB.

Größe (X_i)	Schätzwert (x_i)	Standardmeßunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u_i(y)$
A_P	40,110 dB	$1,7 \cdot 10^{-4}/\sqrt{6} \cdot 40,1$ dB	Normal	$c_1 = 1,0$	0,00278 dB
A_N	39,710 dB	$1,1 \cdot 10^{-4}/\sqrt{6} \cdot 39,7$ dB	Normal	$c_2 = -1,0$	-0,00178 dB
D_{N1}	29,89 dB	0,03dB/2	Normal	$c_3 = 1,0$	0,015 dB
D_{N2}	9,82 dB	0,02dB/2	Normal	$c_4 = 1,0$	0,01 dB
δA_N	0	0,0125dB/ $\sqrt{2}$	U-Form	$c_5 = 1,0$	0,00884 dB
δA_V	0	0,02dB/ $\sqrt{2}$	U-Form	$c_6 = 1,0$	0,014 dB
δA_P	0	0,0125dB/ $\sqrt{2}$	U-Form	$c_7 = 1,0$	0,00884 dB
δA_L	0	0,015dB/ $\sqrt{3}$	Recht.	$c_8 = 1,0$	0,00866 dB
δA_{RUE}	0	0,007dB/ $\sqrt{3}$	Recht.	$c_9 = 1,0$	0,00404 dB
δA_D	0	0,005dB/ $\sqrt{3}$	Recht.	$c_{10} = 1,0$	0,00289 dB
δA_K	0	0,005dB/ $\sqrt{3}$	Recht.	$c_{11} = 1,0$	0,00289 dB
D_P	40,110 dB	-	-	-	0,0284 dB

$$U = k \cdot \sqrt{\sum u_i^2(y)} \quad (17)$$

Erweiterte Meßunsicherheit mit $k=2$: $U=2 \cdot 0,0284$ dB=0,0568 dB

Vollständiges Meßergebnis: $D_P=(40,110 \pm 0,0568)$ dB.

16.4.2 Dämpfungsmessung mit dem Meßempfänger

Bei der Reihenschaltung von Generator, Prüfling und Empfänger ohne Entkopplung sind Reflexionsfaktoren von 0.12 (18.5dB) vom dem Empfänger und 0.2 (14dB) vom HF-Generator zu erwarten.

Die Linearität des Empfängers liegt bei typisch 0.008dB/2dB.

Da die Reflexionsfaktoren von Generator und Empfänger nicht gering genug für die gewünschten Meßunsicherheiten sind, werden diese beiden Ports mit Dämpfungsgliedern entkoppelt.

Um den Empfängerbereich voll auszunutzen (0dBm) ist bei einer maximalen Generatorleistung von 16 dBm eine Gesamtentkopplung von 16dB möglich. Verwendet werden hierzu Präzisionsdämpfungsglieder der Firma Genrad, auch wenn dann auf der Meßseite ein Übergang von GR900 zu APC-7 nötig wird. Nur diese Dämpfungsglieder haben einen sehr kleinen Reflexionsfaktor (<0.01 bis 3GHz), was entscheidend für die Wirkung der Entkopplung ist. Mit der Gleichung (7) läßt sich der neue Reflexionsfaktor für die beiden Fälle bestimmen.

$$r_k = S_{11} + r * (S_{12} * S_{21}) / (1 - S_{22} * r) \quad (7)$$

S_{11} und S_{22} sind die Reflexionsfaktoren des Dämpfungsglieds und $S_{12}=S_{21}$ die Dämpfung. r entspricht dem alten und r_k dem entkoppelten Reflexionsfaktor.

Für den Empfänger verbessert sich der Reflexionsfaktor von 0.12 auf 0.04 mit einem 6dB(0.5) Dämpfungsglied. Für den Generator ergibt sich eine Verbesserung von 0.2 auf 0.03 bei 10dB(0.32) Entkopplung. Die Referenzmessung von 0dB erfolgt mit den Entkopplungsdämpfungsgliedern.

Ein zusätzlicher Unsicherheitsanteil, der bei Dämpfungsmessungen über 60 dB zu betrachten ist, nennt sich Übersprechen (Leakage) und kann mit Gleichung (8) bestimmt werden.

$$du = 8.686 * 10^{-(140-A)/20} \text{ dB} \quad (8)$$

Die Gleichung gilt für ein Übersprechen von 140dB mit A für den gemessenen Dämpfungswert.

Die Reflexionsunsicherheit bei der 0dB-Referenzmessung gilt nach Gleichung (5):

$$u_0 = 8.686 * (0.04 * 0.03) = 0.010 \text{ dB}$$

Dieser Wert wird in der Gesamtunsicherheitsformel als zusätzlicher u-Term eingesetzt.

Es gilt dieselbe Modellgleichung wie beim Netzwerkanalysator. Hier werden 60dB Dämpfung bei 1GHz kalibriert.

Größe (X _i)	Schätzwert (x _i)	Standardmeßunsicherheit u(x _i)	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c _i	Unsicherheitsbeitrag u _i (y)
A _P	60,02 dB	$2 * 10^{-4} / \sqrt{6} * 60,0 \text{ dB}$	Normal	c ₁ = 1,0	0,0049 dB
A _N	59,28 dB	$1,5 * 10^{-4} / \sqrt{6} * 59,3 \text{ dB}$	Normal	c ₂ = -1,0	-0,0037 dB
D _{N1}	29,79 dB	0,03dB/2	Normal	c ₃ = 1,0	0,0150 dB
D _{N2}	29,50 dB	0,03dB/2	Normal	c ₄ = 1,0	0,0150 dB
δA _N	0	0,024dB/√2	U-Form	c ₅ = 1,0	0,0170 dB
δA _V	0	0,014dB/√2	U-Form	c ₆ = 1,0	0,0099 dB
δA _P	0	0,024dB/√2	U-Form	c ₇ = 1,0	0,0170 dB
δA _L	0	0,008dB/√3	Recht.	c ₈ = 1,0	0,0046 dB
δA _{RUE}	0	0,005dB/√3	Recht.	c ₉ = 1,0	0,0029 dB
δA _D	0	0,005dB/√3	Recht.	c ₁₀ = 1,0	0,0029 dB
δA _K	0	0,005dB/√3	Recht.	c ₁₁ = 1,0	0,0029 dB
D_P	60,03 dB	-	-	-	0,0347 dB

Mit einer relativer Standardabweichung bei 6 Messungen: A_P=2*10⁻⁴ ; A_N=1,5*10⁻⁴

Erweiterte Meßunsicherheit mit k=2: U=2*0,0347dB=0,0694 dB.

Vollständiges Meßergebnis: D_P=(60,03 ± 0,069) dB.