

# Anpassung und Reflexionen in der Hochfrequenztechnik

## Definition, Begriffe, Einflüsse und ein Modell für den Techniker

Oft begegnet dem Funkamateurler Begriff Stehwellenverhältnis, mit dem weitere Begriffe im Zusammenhang stehen. Dieser Beitrag zeigt die damit verbundenen technischen Hintergründe, um sich das eine oder andere Detail erklären zu können, sowie ein für den HF-Techniker wichtiges Modell. Neben stehenden Wellen werden auch diverse Fachdefinitionen näher erläutert. Dabei wird auf Praxisbezug geachtet und auf diejenigen Punkte hingewiesen, wo das Stehwellenverhältnis Schwierigkeiten bereitet.

Dieser Beitrag ist somit eine gute Ergänzung und Vertiefung der Artikelserie „Leitungen unter der Lupe“. Dort wurde ja schon darauf hingewiesen, dass der Begriff Stehwelle widersprüchlich ist und man statt vom Stehwellenverhältnis besser von Welligkeit sprechen sollte. International ist der Begriff Standing Wave Ratio (SWR) aber stark etabliert.

### Arten der Anpassung

Es gibt vier Arten der Anpassung. Davon spielt die Rausanpassung für unser Thema keine Rolle. Beschäftigen wir uns also mit Spannungs-, Strom- und Leistungsanpassung!

Ein Spannungserzeuger (z. B. ein HF-Generator) treibt durch einen Lastwiderstand einen Strom, und somit entsteht an ihm eine Leistung. Dabei ist zu beachten, dass jeder reale Spannungserzeuger einen Innenwiderstand besitzt (Bild 1).

Bei *Spannungsanpassung* (Überanpassung) liegt eine möglichst große, annähernd laststromunabhängige Spannung am Lastwiderstand. Der Lastwiderstand ist im Verhältnis zum Innenwiderstand groß und somit liegt an diesem praktisch die Leerlaufspannung. Beispiele hierfür sind Spannungsmessung oder (eingangsseitig) Kollektor- bzw. Drainschaltung.

Anders bei der *Stromanpassung* (Unteranpassung): Hier übt der Lastwiderstand kaum einen Einfluss auf den ihn durchfließenden Strom aus, dieser bleibt damit nahezu konstant. Der Lastwiderstand ist somit gegenüber dem Innenwiderstand sehr klein.

Die *Leistungsanpassung* stellt für die HF-Technik die relevanteste Anpassungsart dar. Sie ermöglicht die größtmögliche Leistungsentnahme aus der Quelle (Bild 2) und besteht, wenn Innen- und Lastwiderstand gleich sind. Somit ist die Spannung an den Quellenklemmen nur halb so groß wie die Leerlaufspannung. Nach der Spannungsteilerregel fällt an jedem Widerstand die halbe Spannung ab.

Nun wollen wir dies bei Hochfrequenz mit ihren spezifischen Eigenschaften etwas komplexer betrachten. Die von der Quelle erzeugte Leistung wird über eine Leitung (Koaxialkabel, Zweidrahtleitung, Microstrip) einem Verbraucher (z. B. Dummyload, Antenne) zugeführt. Entspricht dieser nicht dem Wellenwiderstand, so wird ein Teil der zugeführten Hochfrequenz wieder reflektiert (Bild 3). Auf der Leitung bilden sich durch die Überlagerung der hin- und rücklaufenden Wellen sogenannte stehende Wellen (Stehwellen) aus. Die Abstände zwischen zwei Maxima bzw. Minima sind elektrisch (also unter Berücksichtigung des Verkürzungsfaktors, der sich auf das Vakuum bezieht) eine halbe Wellenlänge voneinander ent-

fernt. Würde der Verbraucher entfallen oder die Leitung am Ende kurzgeschlossen werden, so würde die gesamte eingespeiste Leistung reflektiert werden. Man spricht von Totalreflexion. Diese kann zum Tod von Endstufentransistoren führen, wenn diese nicht ausreichend gegen reflektierte Leistung geschützt sind.

Leistungsanpassung ist üblicher Weise optimal, um hochfrequente Energie zu übertragen.

### Begriffe definiert und erläutert

**Stehwellenverhältnis  $s$**  (auch SWR, VSWR, Welligkeit oder Welligkeitsfaktor)

Setzt man die maximale Spannung mit der minimalen Spannung auf einer Leitung ins Verhältnis, so ergibt sich das Stehwellenverhältnis. Daraus kann man auf die Impedanz des Verbrauchers schließen, allerdings nicht eindeutig: Stets ergeben sich zwei Werte, und es ist nicht immer einfach, festzustellen, ob der Verbraucher über- oder unterangepasst ist. Beispiel:  $R_1 = 50 \text{ Ohm}$ ,  $R_2 = 25$  oder  $100 \text{ Ohm}$ . Da sich die Spannungen wie die Widerstände verhalten, können wir auch mit diesen statt der Spannungen rechnen. Der größere Widerstand gehört dabei natürlich über den Bruchstrich. Und siehe da, in beiden Fällen ergibt sich ein  $s$  von 2. Eine echte Impedanzbestimmung ist somit nur mit einer Impedanzmessbrücke oder einem vektoriellem Netzwerkanalyzer möglich. Ist jedoch bekannt, dass der Verbraucherwiderstand nur größer bzw. kleiner als der Wellenwiderstand sein kann, so ließe er sich auch über  $s$  eindeutig bestimmen.

**Anpassungsfaktor  $m$**  nennt man den Kehrwert von  $s$ .

Dieser findet sich jedoch wesentlich seltener in Angaben und Datenblättern. Das ist auch gut

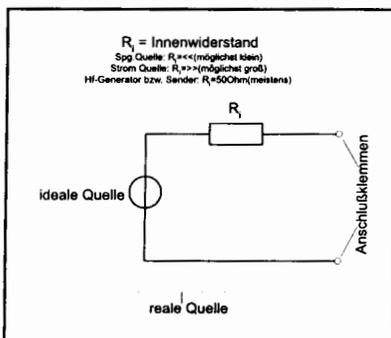


Bild 1: Ersatzschaltbild einer Spannungsquelle.

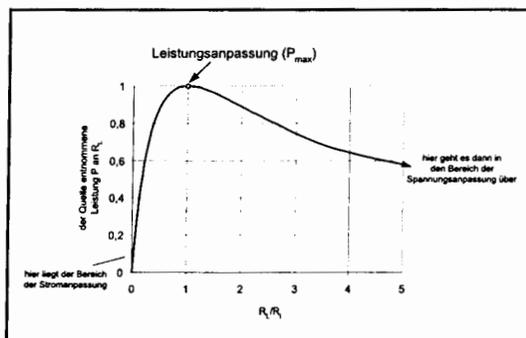


Bild 2: Anpassung und übertragene Leistung.

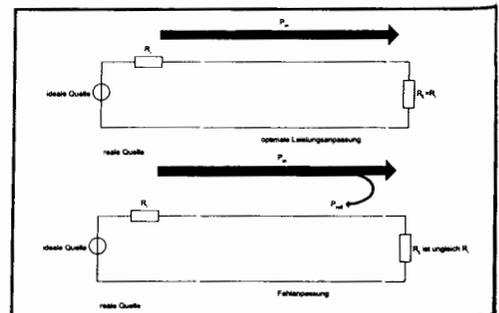
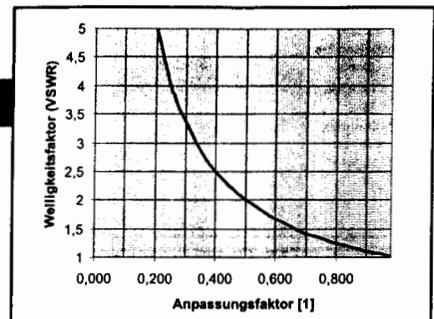


Bild 3: Verhalten bei wellenwiderstandsrichtigem und nicht wellenwiderstandsrichtigem Abschluss.

**Tabelle 1: Zusammenhänge**

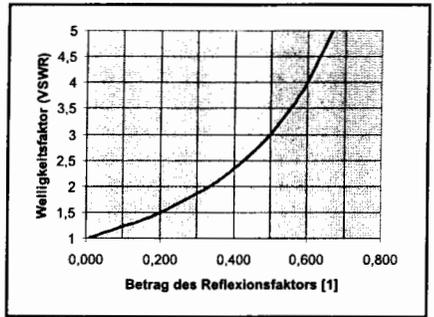
SWR	Anpassungsfaktor	Reflexionsfaktor	Leistungsreflexionsfaktor	Rückflussdämpfung	Fehlpassungsdämpfung
1,02	0,98	0,01	0,01 %	40,09 dB	0 dB
1,05	0,952	0,024	0,06 %	32,26 dB	0 dB
1,1	0,909	0,048	0,23 %	26,44 dB	0,01 dB
1,2	0,833	0,091	0,83 %	20,83 dB	0,04 dB
1,3	0,769	0,13	1,7 %	17,69 dB	0,07 dB
1,5	0,667	0,2	4 %	13,98 dB	0,18 dB
2	0,5	0,333	11,11 %	9,54 dB	0,51 dB
2,5	0,4	0,429	18,3 %	7,36 dB	0,88 dB
3	0,333	0,5	25 %	6,02 dB	1,25 dB
3,5	0,286	0,556	30,86 %	5,11 dB	1,6 dB
4	0,25	0,6	36 %	4,44 dB	1,94 dB
5	0,2	0,667	44,44 %	3,52 dB	2,55 dB



**Bild 4: SWR und Anpassungsfaktor.**

**Tabelle 2: Anpassung diverser Koaxialkomponenten**

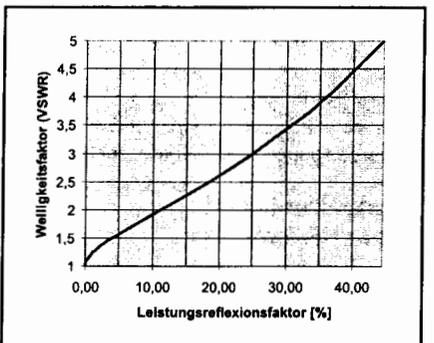
Typ	Art	Frequenz [GHz]	VSWR (SII) [I]	Bemerkung
SMA	Stecker	0,435	1,11	1)
SMA	Stecker	5,7	1,17	1)
N	Stecker	0,435	1,05	1)
N	Stecker	5,7	1,1	1)
N auf SMA	Übergang	0,435	1,06	2)
N auf SMA	Übergang	5,7	1,14	2)
SMA	Abschlusswid. 1 W	0,435	1,01	2)
SMA	Abschlusswid. 1 W	5,7	1,07	2)
N	Abschlusswid. 1 W	0,435	1,04	2)
N	Abschlusswid. 1 W	5,7	1,25	2)
	Empfängereingang	0,001-0,03	2,5(!)	3)
	Diode-Leistungsmessköpfe	0,01-18	1,2	4)
	Thermistor-Leistungsmessköpfe	0,01-18	1,3	4)
	Richtkoppler	0,0003-0,05	1,2	5)
	Richtkoppler	0,001-2	1,6	5)



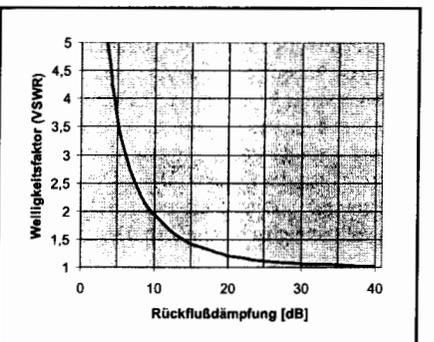
**Bild 5: SWR und Betrag des Reflexionsfaktors.**

**Bemerkungen:**

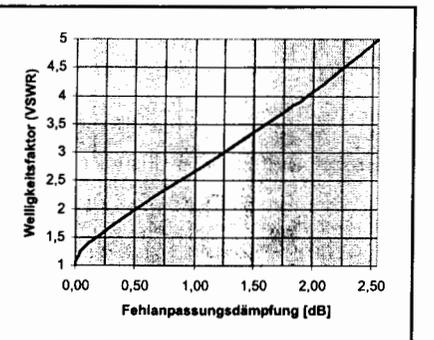
- 1) Richtwerte, da von vielen Faktoren abhängig, insbesondere der Montage
- 2) Richtwerte für hochwertige Standardkomponenten
- 3) Ein empfindlicher Eingangsmischer lässt sich über einen weiten Frequenzbereich kaum besser anpassen.
- 4) Messkopffarten in präzisen Powermetern
- 5) z. B. in SWR-Messbrücken



**Bild 6: SWR und Leistungsreflexionsfaktor.**



**Bild 7: SWR und Rückflussdämpfung.**



**Bild 8: SWR und Fehlpassungsdämpfung.**

so, denn auch sein Name führt in die Irre: Anpassung ist auch bei  $m$  ungleich 1 möglich.

**Reflexionsfaktor  $r$**  nennt sich eine weitere Angabe, welche darüber informiert, wie hoch Spannung bzw. Strom der reflektierten Welle gegenüber der ankommenden ist und ob bei der Reflexion Spannungs- oder Strominversion (Phasenumkehr) erfolgt – letztes verschweigen  $s$  und  $m$ . Somit ist keine Zweideutigkeit mehr gegeben, der Betrag des Reflexionsfaktors (ohne Vorzeichen) lässt sich jedoch wiederum unmittelbar von  $s$  ableiten.

Diese Effekte können am Ausgang der Leitung und zusätzlich am Eingang der Leitung erfolgen – hier jedoch ist die ankommende die bereits am Ausgang reflektierte Welle, welche nun zum zweiten Mal reflektiert wird. Infolgedessen unterscheidet man zwischen Ein- und Ausgangs-Reflexionsfaktor. Die Formeln lauten:

$$r_E = (R_L - Z_w) / (R_L + Z_w) \text{ und}$$

$$r_A = (R_L - Z_w) / (R_L + Z_w)$$

Das Ergebnis kann somit zwischen  $-1$  und  $+1$  liegen, wobei  $0$  Anpassung, also keine Reflexion, und  $\pm 1$  Totalreflexion bedeuten. Negative Werte bedeuten Spannungs-, positive Strominversion.

**Leistungsreflexionsfaktor** Er gibt analog zum Reflexionsfaktor an, wie viel der Leistung reflektiert wird, und zwar in Prozent. Diese Art der Darstellung wird vor allem dort verwendet, wo die Größe der reflektierten Leistung visualisiert werden soll, weil Prozentangaben anschaulicher wirken als Dezibelangaben, mit denen vorwiegend der Techniker in Kontakt steht.

**Rückflussdämpfung  $a$**  (auch Reflexionsdämpfung)

Wenn vom Stehwellenverhältnis gesprochen wird, so denkt der Funkamateure wohl als erstes an seine Antennenanlage. Anpassung ist jedoch nicht nur bei Antennen notwendig, sondern auch

bei vielen anderen Komponenten in der HF-Technik, wo z. T. noch eine wesentlich genauere Bestimmung dieser nötig ist. Jeder Steckverbinder, Abschlusswiderstand, Empfänger- oder Messgeräteeingang oder auch Koaxialübergang kann bei normgerechtem Abschluss nennenswert reflektieren. Besonders im Zusammenhang mit diesen Objekten tritt der Begriff Rückflussdämpfung in Erscheinung. Sie gibt an um wie viel dB die reflektierte Leistung (also der Rückfluss) gegenüber der eingespeisten kleiner ist. Somit beschreibt eine Größe, welche sich besonders zur Charakterisierung bei relativ guter Anpassung bzw. geringer Reflexion eignet. Z. B. weisen selbst hochwertige Koaxialsteckverbinder meist keine größere Rückflussdämpfung als 20 dB auf!

**Fehlpassungsdämpfung** Sie gibt an, um wie viel dB der aus der Quelle entnommene Pegel bei Fehlpassung kleiner ist als bei optimalem Abschluss. Man könnte somit auch definieren, es ist jener Teil, der durch Reflexion zurückgeschickt wird und somit dem Verbraucher nicht mehr zur Verfügung steht. Voraussetzung für eine richtige Angabe ist allerdings, dass die Quelle auch bei Fehlabschluss konstante Leistung generiert. Moderne Senderstufen regeln z. B. je nach Grad der Fehlpassung die Ausgangsleistung unterschiedlich stark zurück, um sie vor Überhitzung zu schützen. Also eine gezielte Maßnahme, die somit nichts mit dem Begriff der Fehlpassungsdämpfung zu tun hat. Dieser Ausdruck wird selten verwendet.

Wir sehen: Alle angeführten Begriffe stehen in (meist unmittelbarem) Zusammenhang und lassen sich oft ineinander umrechnen. Es handelt sich also weitgehend um bloße Definitionen ohne weiteren physikalischen Hintergrund. Sie geben somit Auskunft über das Maß an Reflexion(en), nicht aber darüber, ob Leistungsanpassung (z. B.

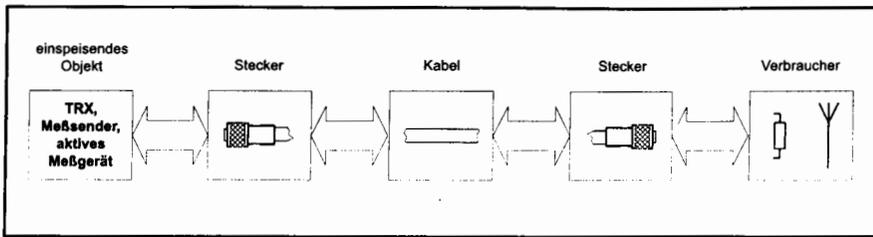


Bild 9: Typische HF-Übertragungsstrecke.

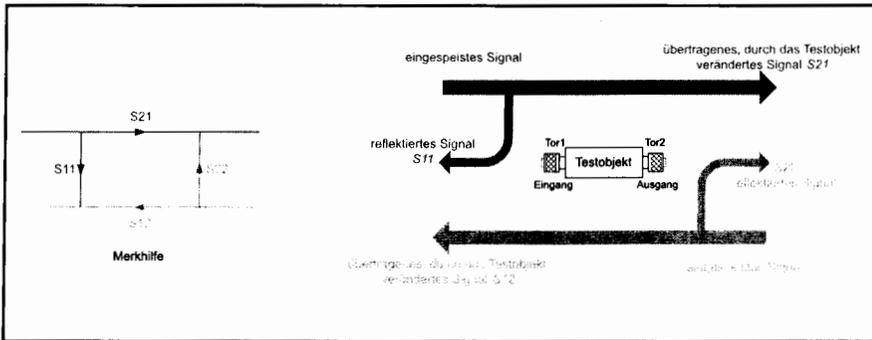


Bild 10: Veranschaulichung des S-Parameter-Modells.

im Fall  $R_i$  ist ungleich  $Z_w = R_i$ ) vorliegt oder nicht. Dies wird oft nicht klar gesehen.

Um die Zusammenhänge der einzelnen Begriffe darzustellen und als kleine Hilfe, um sich Umrechnungen zu ersparen, dienen die Diagramme (Bild 4 bis 8) sowie Tabelle 1. Diese Diagramme wurden vom Autor auf das im Amateurfunk so populäre VSWR ausgerichtet.

### Ein wichtiges Modell für den HF-Techniker

Nachdem nun hoffentlich sämtliche vielleicht suspekten Ausdrücke rund um das SWR geklärt wurden, können wir uns mit ungewollten Einflüssen der Welligkeit auf verschiedene Anordnungen befassen.

Dazu soll zunächst das **S-Parameter-Modell** (Streuparameter-Modell) näher vorgestellt werden.

Um ein Messobjekt (Ein-, Zwei- oder Mehrtor) bezüglich seiner Reflexions- und Übertragungseigenschaften charakterisieren zu können, bedient man sich der S-Parameter. Dabei wird versucht, das HF-Verhalten des Objekts (DUT, Device under Test) mit Hilfe von vier Parametern (S11, S21, S12, S22) vollständig zu beschreiben. Das eigentliche

Testobjekt wird dabei als „Blackbox“ betrachtet und kann vom Abschlusswiderstand über einen einzelnen Transistor oder ein komplexes Filternetzwerk bis zum fertig aufgebauten Verstärker so ziemlich alles sein. Bild 9 zeigt eine HF-Übertragungsstrecke.

Bei einer großen Zahl von HF-Bauelementen findet man in den Datenblättern S-Parameter angegeben, üblicherweise in dB. Diese zeigen das Verhalten der Bauteile bei verschiedenen Frequenzen. Schlussendlich können solche Angaben z. B. in Simulationsprogramme übernommen und dort weiterverarbeitet werden. Die messtechnische Ermittlung der Werte über einen definierten Frequenzbereich erfolgt neben anderen Möglichkeiten am zweckmäßigsten mit einem Netzwerkanalyzer.

Nun aber zur Bedeutung dieser vier, besonders im Mikrowellenbereich sehr oft verwendeten Parameter (Bild 10):

S11 ist die Reflexion am Tor 1, wenn Tor 2 reflexionsfrei abgeschlossen ist. Wird Tor 1 als Eingang und Tor 2 als Ausgang des DUT verwendet, so ist S11 gleichzeitig die Eingangs-Rückflussdämpfung.

S12 beschreibt die an Tor 1 auftretende Welle, wenn nur am Tor 2 ein Signal zugeführt wird. Wird Tor 1 als Eingang und Tor 2 als Ausgang

Tabelle 3: Umrechnung einer Abweichung in % vom Leistungsmesswert in dB

%	dB
+/- 1,5	-0,066/+0,065
+/- 2	-0,088/+0,086
+/- 3	-0,132/+0,128
+/- 4	-0,177/+0,170
+/- 5	-0,223/+0,212
+/- 6	-0,269/+0,253
+/- 7	-0,315/+0,294
+/- 10	-0,458/+0,414
+/- 15	-0,706/+0,607
+/- 20	-0,969/+0,792

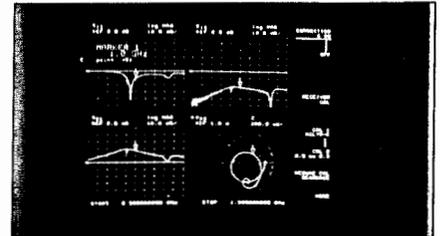


Bild 11: Messung der S-Parameter in der Praxis.

des DUT verwendet, so ist S12 die Rückwirkung des Ausgangs auf den Eingang.

S21 gibt die Veränderung an, die dem an Tor 1 eingespeisten Signal beim „Durchlauf“ durch das Testobjekt in Richtung von Tor 1 nach Tor 2 widerfährt. Wird ein Verstärker beschrieben, so ist S21 dessen Verstärkung. Bei einem Dämpfungsglied oder Adapter ist S21 die Dämpfung in der angegebenen Richtung.

S22 ist die Reflexion am Tor 2, wenn Tor 1 reflexionsfrei und somit impedanzrichtig abgeschlossen ist. Wird Tor 1 als Eingang und Tor 2 als Ausgang des DUT verwendet, so ist S22 gleichzeitig die Ausgangs-Rückflussdämpfung.

Die S-Parameter können nicht nur die Übertragungs- und Reflexionsbeträge des Messobjektes charakterisieren, sondern auch deren Phasenverhalten, welches wiederum vorwiegend durch Laufzeiten im Testobjekt bestimmt wird.

Bild 11 zeigt z. B. eine S-Parameter-Bestimmung mit einem vektorzielen Netzwerkanalysator für einen Kleinsignalverstärker mit Anpassnetzwerken über 0,5 bis 1,5 GHz (Display-Bilder von l. o. nach r. u. S11, S12, S21, S22). Bei den ersten drei Bildern ist auf der X-Achse die Frequenz und auf der Y-Achse das Amplitudenverhältnis in dB

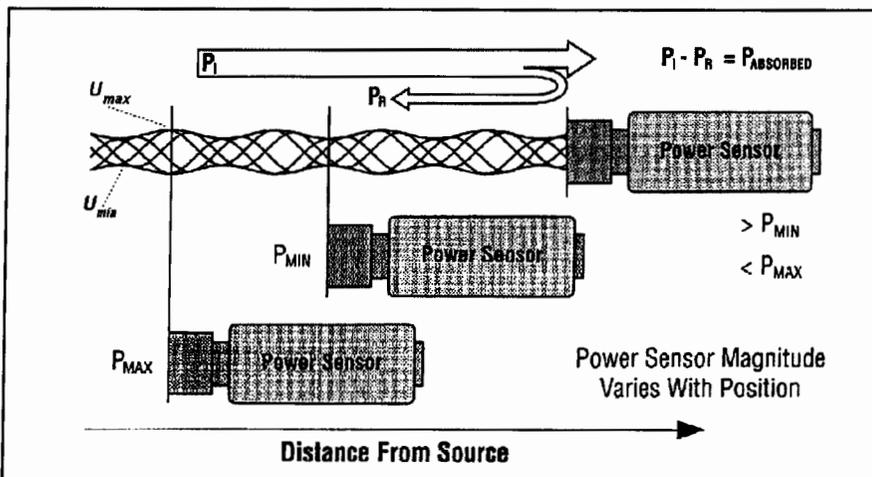


Bild 12: Leistungsmessung an unterschiedlichen Stellen entlang der Leitung.

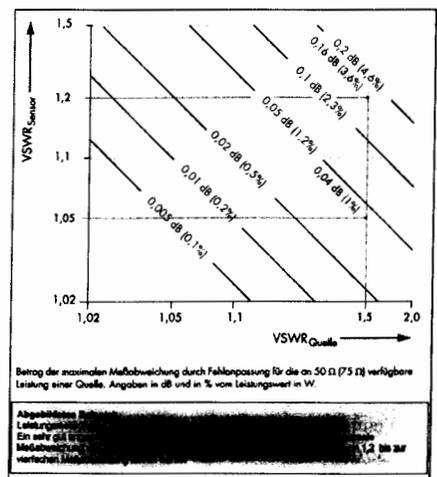
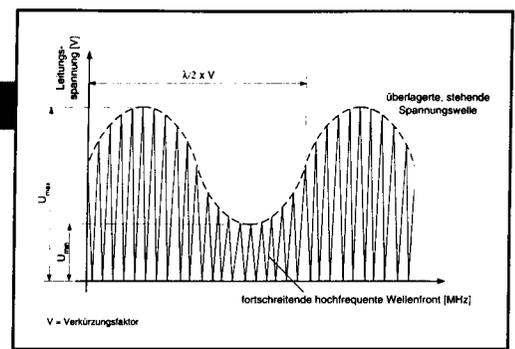
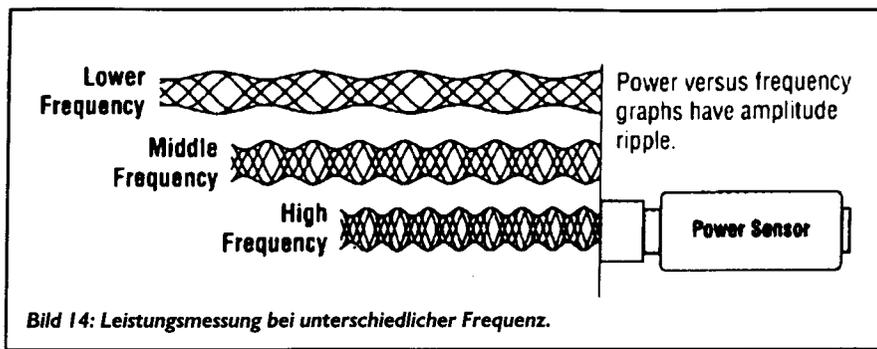


Bild 13: Ein hilfreiches Diagramm.



aufgetragen. Für S22 wurde die Darstellung mit Smith-Diagramm gewählt, so lassen sich dann auch gleich vorteilhaft reelle und imaginäre Impedanzanteile ablesen. Deutlich ist das bestmögliche Verhalten des Verstärkers (ordentliche Eingangs-Rückflussdämpfung, maximale Verstärkung) etwas unter 1 GHz festzustellen.

Sollen die Eigenschaften eines Eintors (z. B. Abschlusswiderstands) mit Hilfe der S-Parameter beschrieben werden, so kann natürlich nur das Eingangsverhalten angegeben werden.

### Wo misst man das SWR?

Oftmals erschallt auf den Bändern die Frage, wo denn das SWR-Meter eingeschleift werden solle? Gleich nach dem Transceiver oder unmittelbar bei der Antenne?

Nun, bis jetzt sind wir von einer idealen Übertragungstrecke ausgegangen. Eine Annahme, von welcher man sich lösen sollte. Denn die Kabeldämpfung muss – besonders bei langer Leitung und hohen Frequenzen – beachtet werden, und der Wellenwiderstand kann tolerieren bzw. sich örtlich leicht ändern.

Aus diesem Grunde soll jetzt ein reales System näher betrachtet werden. Voraussetzung seien einheitliche Widerstände (z. B. unsere bekannten 50 Ohm). Abgesehen vom nicht wellenwiderstandsrichtigen Anschluss der Quelle bewirkt jeder Übergang auf einen anderen Widerstandswert eine Reflexion. Kein Stecker kann wirklich den Wellenwiderstand, für welchen er gebaut wurde, genau einhalten, gleiches gilt für Kabel und insbesondere deren Dämpfung. Jeder Ausgang und jeder Eingang eines Geräts ist praktisch mehr oder weniger gut angepasst, und selbst das verwendete Messgerät bringt meist zusätzliche Reflexionen.

a) Für gröbere Messungen mit verhältnismäßig kleiner Rückflussdämpfung, wie sie der Funkamateurer üblicherweise mit einem einfacheren SWR-Meter beim Abgleich der Antenne durchführt, ist wohl die Kabeldämpfung die größte Fehlerquelle. Wird das Messgerät unmittelbar nach dem TRX eingeschleift, so durchläuft das vom Transceiver kommende Signal dieses und wird je nach Kabeltyp und -länge sowie Frequenz beim Durchlaufen des Antennenkabels gedämpft. An dessen Ende werde ein Teil der Leistung vom Verbraucher absorbiert und der Rest wieder reflektiert. Dieser Teil durchläuft jetzt abermals das Antennenkabel, wobei er wiederum gedämpft wird, um anschließend zum SWR-Messgerät zu gelangen. Dort werden ja vor- und rücklaufende Welle ins Verhältnis gesetzt. Doch wird dabei die vorlaufende Welle mit voller Leistung detektiert, jedoch die rücklaufende um die doppelte Kabeldämpfung (hin und zurück!) reduziert. Ist das Stehwellenverhältnis jetzt verfälscht? Na, das ist eher eine

Frage der Betrachtungsweise. Wenn mich die Anpassung meiner Antenne interessiert, so sollte wohl eher, besonders auf höheren Frequenzen, unmittelbar an der Antenne gemessen werden, da dann beide Signale nur einmal der Kabeldämpfung unterliegen. Somit ergibt sich an der Antenne immer ein höheres SWR als am Transceiver.

Will ich aber wissen, ob die Senderendstufe durch Fehlanpassung beschädigt werden kann, so ist die Messung nach dem TRX in Ordnung, da ja eben dieses SWR am „Antennenkabeingang“ von Interesse ist. Für diese Betrachtung stimmt also der angezeigte Wert, denn genau dieser interessiert hier.

Die Frage, wo denn das SWR gemessen werden solle, kann somit eigentlich nur mit einer Gegenfrage beantwortet werden: Zu welchem Zweck will man denn das Stehwellenverhältnis überhaupt feststellen? Besteht darüber Gewissheit, dann ist auch klar, wo die Messbrücke einzuschleifen ist.

b) Für qualifizierte Vorhaben ist die genaue Bestimmung der Reflexionseigenschaften nötig, um z. B. die Güte von coaxialen Komponenten zu bestimmen oder deren Spezifikationen nachzuweisen. Da hier prinzipbedingt schon wesentlich kleinere Werte ausgewertet werden müssen, fallen auch die Reflexionen von Steckverbindern und der anderen, am Beginn dieses Abschnittes aufgeführten Teile stark ins Gewicht. Um sinnvolle Messungen dieser Art mit brauchbarer Genauigkeit durchführen zu können, ist es notwendig, entweder nur solche Bestandteile im Messaufbau zu verwenden, welche von Haus aus eine wesentlich bessere Rückflussdämpfung aufweisen als das DUT (mindestens 10 dB Unterschied). Eine Angelegenheit, die sich vor allem in finanzieller Hinsicht recht schnell negativ bemerkbar macht und bei welcher auch durchaus an die Grenzen des am Markt verfügbaren Equipments gestoßen wird.

Professionelle, dem Stand der Technik entsprechende Messgeräte bieten zu solchen Zwecken die Möglichkeit, durch unterschiedliche vorgeschriebene Vorgänge den Messaufbau bis zum DUT zu kalibrieren. Anschließend wird durch intern ablaufende Routinen während der Messung der durch den Aufbau verursachte Fehler herausgerechnet. Somit ist es dann auch möglich, brauchbare Messwerte zu erhalten.

Um ein Gefühl für die Qualität, besonders die Anpassung, verschiedener Teile, welche in hochfrequenten Systemen vorkommen, zu erhalten, wurde Tabelle 2 zusammengestellt. Die angegebenen Werte sind typisch für höherwertige Standardkomponenten, natürlich müssen im Endeffekt die genauen Daten der Hersteller betrachtet werden.

### Leistungsmessung bei Fehlanpassung

Bei der Bestimmung hochfrequenter Leistung kommt der Anpassung insofern eine besondere Bedeutung zu, als sich diese in der Messgenauigkeit

bemerkbar macht. Wenn wir Bild 12 dazu etwas näher betrachten, so wird das damit verbundene Problem schnell klar. Wie wir bereits wissen, steigt der Wert der maximalen Spannung  $U_{max}$  und sinkt der Wert der minimalen Spannung  $U_{min}$  auf einer Leitung mindestens mit der Größe des Fehlabchlusses am Ende. Abhängig vom Messort auf der Leitung, respektive von der Entfernung zur Quelle ist es nun möglich, ein Maxima, ein Minima oder einen beliebigen Zwischenwert mit dem Messkopf zu erfassen. Es resultiert also eine Fehlmessung. Die Höhe der maximalen Messabweichung infolge eines beiderseitigen Fehlabchlusses an Quelle und Messkopf ist nun im Diagramm Bild 13 ersichtlich. Deutlich ist daraus auch zu sehen, dass es schon genügt, eine der beiden Seiten möglichst gut wellenwiderstandsmäßig abzuschließen, um den Fehler zu minimieren. Mehrfachreflexionen werden ja dadurch stark gedämpft bzw. fast eliminiert.

Nun drängt sich noch die Frage auf, was passiert, wenn die Messfrequenz verändert wird? Es verändert sich natürlich auch die Wellenlänge und somit ändern sich die Strom- und Spannungsverhältnisse am Messort. Dies verdeutlicht Bild 14.

Wie wir sehen, hält sich, solange  $S11$  von Last und Quelle unter  $SWR=1,5$  bleibt, für amateurspezifische Anwendungen die mögliche Messabweichung allemal in Grenzen. Allerdings zeigt sich auch deutlich, wie wenig Sinn es selbst mit hochwertiger Messtechnik macht, sich um Zehntel Dezibel Absolutgenauigkeit zu bemühen und wie schwierig es ist, genaue und vor allem reproduzierbare Messungen durchzuführen.

Nicht irritieren sollten in der HF-Technik Angaben über prozentuelle Messabweichungen, da diese umgerechnet in Dezibel Darstellung meist eher geringe Werte ergeben und bei der Hochfrequenz alles unter 1 dB absoluten Fehler bis dato als sehr gut angesehen werden darf (professionelle Messtechnik zumeist mit eingeschlossen). Aufschluss über den Zusammenhang gibt Tabelle 3.

Ralf Rudersdorfer, OE3RAA

### Literatur

- [1] Dieter Nährmann: Das große Werkbuch Elektronik, Franzis-Verlag, ISBN 3-7723-6546-9
- [2] diverse Applikationsbroschüren der Hersteller Anritsu/Wiltron und Rohde & Schwarz
- [3] Wolf Dieter Schleifer: Hochfrequenz- und Mikrowellenmesstechnik in der Praxis, Dr. Alfred Hüthig Verlag, ISBN 3-7785-0675-7
- [4] Fachkunde Informationstechnik und Industrielektronik, 5. Auflage, Verlag Europa Lehrmittel, ISBN 3-8085-3245-9

Anzeige

Tisch- & Mobil-Mikrofone U.S.A.  
ab nur € 82,- bei: [www.mega.com.de](http://www.mega.com.de)