

Anpassung Wirkungsgrad & Co.

Anpassungszustände auf Leitungen

**Mitteilungen aus dem Institut
für Umwelttechnik
Nonnweiler-Saar
Dr. Schau
DL3LH**

Vorwort

„Anpassung“ ist in der Hochfrequenztechnik, in der Elektronik, in der Datentechnik, bei der Videoübertragung und bei Funkamateuren ein zentrales Thema. Doch, was ist gemeint mit Anpassung? Eigentlich doch eine klare Sache – oder ?

Einige Beispiele:

a.

Unser Lichtnetz hat einen Innenwiderstand von etwa $R_i = 0.01 \Omega$. Das angeschlossene 1000 W Bügeleisen mit einem Warmwiderstand von etwa $R = 48 \Omega$ funktioniert auch ohne Anpassung. Es würde sicherlich auch keiner auf die Idee kommen Anpassung einstellen zu wollen.

b.

Eine Röhrendstufe hat bei Vollaussteuerung bis zur Grenzgraden einen Innenwiderstand $R_i = R_{iL}/f_1(\theta)$. Für einen Wirkungsgrad $\eta > 50 \%$ muss der Lastwiderstand R_a wesentlich größer als der Innenwiderstand R_i gemacht werden - auch hier keine Anpassung, sondern Überanpassung.

c.

Eine resonante Antenne habe ein $R_A = 20 \Omega$. Wird ein 50Ω Koaxkabel als Zuleitung verwendet, ist das VSWR $S = 2.5$. Bei einem als verlustlos angenommenen Kabel ist am Leitungsanfang das VSWR ebenfalls $S = 2.5$. Das Anpassgerät passt die Impedanz des Leitungsanfanges an die Sender-Impedanz, meist 50Ω , an. Trotz eines VSWR $S = 2.5$ besteht Anpassung zwischen Leitung und Anpassnetzwerk.

Wird die gleiche Antenne mit einer 600Ω Zweidrahtleitung betrieben, ist an der Trennstelle zwischen Antenne und Leitung das VSWR $S = 600 / 20 = 30$. Auf der als verlustfrei angenommenen Leitung bleibt das VSWR unverändert und ist am Leitungseingang ebenfalls $S = 30$. Das Anpassnetzwerk transformiert wieder die Impedanz am Eingang der Leitung auf 50Ω , obwohl ein VSWR $S = 30$ vorhanden ist, herrscht Anpassung.

Aus diesen 3 Beispielen wird ersichtlich, dass der Begriff „Anpassung“ mehrdeutig ist und zu einigen Verwirrungen führen kann.

1. Leistungsanpassung

Einer Signalquelle mit sinusförmigen Spannungs- oder Stromverlauf und der komplexen Innenimpedanz $\underline{Z}_i = R_i \pm j X_i$ kann die maximale Leistung entnommen werden, wenn die Lastimpedanz konjugiert komplex zur Innenimpedanz gewählt wird. Diesen speziellen Zustand nennt man Leistungsanpassung. Es gilt

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_i^* \quad (\text{Gl.1})$$

oder anders ausgedrückt die Realteile sind gleich und die Imaginärteile ergänzen sich zu Null.

Da 50 % der Leistung am Innenwiderstand in Wärme umgesetzt wird, ist der Wirkungsgrad dieser Anordnung nur $\eta = 50 \%$ /1/. Will man einen höheren Wirkungsgrad erreichen, muss Überanpassung gewählt werden.

Der Anpasszustand zwischen Quelle und Last \underline{Z}_a kann durch einen Anpassfaktor ρ beschrieben werden. Dieser wird definiert als

$$\rho = (\underline{Z}_a - \underline{Z}_i) / (\underline{Z}_a + \underline{Z}_i) \quad (\text{Gl.2})$$

und beschreibt den Leistungsübergang zwischen Quelle und Last. Bei $\rho = 0$ ist Leistungsanpassung vorhanden und die verfügbare Leistung der Quelle geht auf die Last über. Die verfügbare Leistung ist die maximal einer Quelle entnehmbare Leistung und ist eine Kenngröße einer Zweipolquelle /1/.

Mit P_v als verfügbare Leistung wird die auf die Last übertragene Leistung

$$P_L = P_v (1 - |\rho|^2) \quad (\text{Gl.3})$$

Bei Fehlanpassung geht also nur ein Teil der verfügbaren Leistung auf die Last über.

Beispiel 1.1

Eine Quelle hat einen reellen Innenwiderstand $R_i = 50 \Omega$. Die Lastimpedanz sei $Z_a = (50 + j 50) \Omega$. Daraus berechnet sich nach (Gl 2) der Anpassfaktor zu

$$\rho = (50 + j 50 - 50) / (50 + j 50 + 50) = (j 1) / (2 + j 1) = 0.2 + j 0.4.$$

Das Betragsquadrat wird $\rho^2 = 0.2$ und die Wirkleistung in die reelle Last

$$P_L = P_v (1 - \rho^2) = P_v (1 - 0.2) = 0.8 P_v$$

d. h. durch die Fehlanpassung gehen nur 80 % der verfügbaren Leistung an die Last über.

Mit einer verlustlosen Anpassschaltung wird $\rho = 0$ und $P = P_v$, d.h. 100 % der verfügbaren Leistung geht auf die Last über. Dieses Beispiel zeigt deutlich die Wichtigkeit eines Anpassnetzwerkes oder anders ausgedrückt KW-Betrieb ohne Anpassnetzwerk ist sinnlos, wie wir noch sehen werden.

Beispiel 1.2

Eine Quelle hat einen reellen Innenwiderstand $R_i = 50 \Omega$. Die Lastimpedanz sei reell $R_a = 200 \Omega$. Daraus berechnet sich der Anpassfaktor zu

$$\rho = (200 - 50) / (200 + 50) = 3/5.$$

Das Betragsquadrat wird $\rho^2 = 0.36$ und die Wirkleistung in die reelle Last wird

$$P_L = P_v (1 - \rho^2) = P_v (1 - 0.36) = 0.64 P_v$$

d. h. nur 64 % der verfügbaren (maximal möglichen) Leistung geht an die Last über. Der Transferverlust ist 36 %.

Mit einer verlustlosen Transformationsschaltung von 200Ω reell auf 50Ω reell wird $\rho = 0$ und $P = P_v$, d.h. es gehen 100 % der verfügbaren Leistung auf die Last über.

2. Leitungsanpassung

Eine auf einer homogenen Leitung fortschreitenden Welle wird am Leitungsende teilweise oder vollständig reflektiert, wenn der Abschlusswiderstand nicht mit dem Wellenwiderstand der Leitung übereinstimmt /1/. Nur bei Abschluss der Leitung mit einem Widerstand der exakt dem Wellenwiderstand entspricht, entfällt die rücklaufende Leistung und die gesamte Leistung geht auf den Abschlusswiderstand über. Dieser Zustand heißt **Leitungs-Anpassung am Ende der Leitung**.

Ist eine Leitung mit der komplexen Last Z_L abgeschlossen und ist Z_0 der komplexe Wellenwiderstand der Leitung, so gilt für den Reflexionsfaktor

$$\underline{r} = (Z_L - Z_0) / (Z_L + Z_0) \quad (\text{Gl.4})$$

der bei Leitungsanpassung $\underline{r} = 0$ wird. Das Stehwellenverhältnis, das den Leistungstransport beschreibt, ist

$$S = (1 + |\underline{r}|) / (1 - |\underline{r}|) \quad (\text{Gl.5})$$

und bei Leitungsanpassung $S = 1$

Beispiel 2.1

Eine Leitung mit einem reellen Wellenwiderstand $Z_0 = 600 \Omega$ ist mit 600Ω reell abgeschlossen. Nach (Gl.4) wird $\underline{r} = 0$ und nach (Gl.5) $S = 1$. Es liegt totale Leitungsanpassung vor.

Beispiel 2.2

Eine Leitung mit einem reellen Wellenwiderstand $Z_0 = 600 \Omega$ ist mit $R_L = 100 \Omega$ abgeschlossen. Nach (Gl.4) wird $\underline{r} = -5/7 = -0.714$ und mit (Gl.5) wird $S = 6$.

Bei reellem Abschluss kann das VSWR auch direkt aus dem Widerstandsverhältnis berechnet werden. Es ist in diesem Fall $S = 600/100 = 6$.

Die Leistung an den Lastwiderstand $R_L = 100 \Omega$ wird $P_L = P_v (1 - \underline{r}^2) = P_v 4 S / (1 + S^2)$. Mit $S = 6$ wird $P_L = 0.487 P_v$, d.h. es gehen nur 48.7 % der möglichen Leistung an die Last über.

Beispiel 2.3

Eine Leitung mit einem reellen Wellenwiderstand $Z_0 = 600 \Omega$ ist mit $R_L = 1200 \Omega$ abgeschlossen. Nach (Gl.4) wird $\underline{r} = 1/3$ und mit (Gl.5) $S = 2$. Bei reellem Abschluss kann das VSWR auch direkt aus dem Widerstandsverhältnis berechnet werden. Es ist in diesem Fall $S = 1200/600 = 2$. Die Leistung an den Lastwiderstand $R_L = 1200 \Omega$ wird $P_L = P_v (1 - \underline{r}^2) = P_v 4 S / (1 + S^2)$. Mit $S = 2$ wird $P_L = 0.888 P_v$, d.h. es gehen 88.8 % der möglichen Leistung an die Last über. Der Transmission-Loss wird $T_{LL} = 0.51$ dB.

Im Allgemeinen ist die Antennenzuleitung mit einer beliebigen Impedanz der Antenne $\underline{Z} = R \pm j X$ abgeschlossen. Nur bei Resonanz tritt an den Klemmen der Antenne ein reeller Widerstand auf. Je nach Länge und Wellenwiderstand tritt am Eingang der Leitung eine transformierte Impedanz mit induktiven oder kapazitiven Anteil auf. Diese muss mit einem Koppelsystem an die Impedanz des Senders angepasst werden.

Je nach Abschlussimpedanz am antennenseitigen Ende der Leitung und Wellenwiderstand ist das VSWR auf der Leitung erheblich und verursacht zusätzliche Verluste durch stehende Wellen, dennoch haben wir Leistungsanpassung „oben“ an der Antenne und Leistungsanpassung „unten“ zwischen Anpassschaltung und Antennenzuleitung, aber keine Leitungsanpassung, weder „oben“ an der Antenne oder „unten“ an der Anpassschaltung.

Die Impedanzen die auf einer Leitung auftreten können, wenn die Abschlussimpedanz und der Wellenwiderstand bekannt sind, können leicht im Smith-Chart übersehen werden. Bei einer verlustlosen Leitung ist der Reflexionsfaktor \underline{r} eine Konstante und beschreibt als Funktion der Leitungslänge einen Kreis. Alle Impedanzen auf der Leitung liegen immer auf diesem Kreis. Den Zusammenhang zeigt Bild 1.

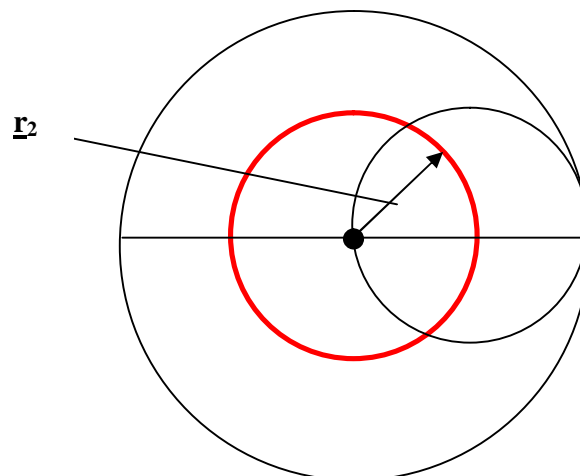


Bild 1: Mögliche Impedanzen auf einer Leitung bei antennenseitigen Reflexionsfaktor \underline{r}_2 und deren Darstellung im Leitungs-Diagramm.

Bei einer realen Leitung ist der Betrag des Reflexionsfaktors keine Konstante, sondern verkleinert sich durch die Dämpfung der Leitung in Richtung Sender. Der Kreis wird zur Spirale, die sich um den Mittelpunkt (Anpassung) wickelt. Alle Impedanzen liegen dann immer innerhalb des roten Kreises nach Bild 1. Bei sehr langer Zuleitung ist daher immer Leitungsanpassung am Eingang einer Leitung vor. Alle Impedanzen die auf der roten Linie liegen, führen zu gleichen Verlusten durch stehende Wellen. Je kleiner der Kreis, umso geringer sind die Verluste /1/ (Gl.2.0).

Beispiel 2.4

Als Beispiel für komplexe Lastimpedanzen nehmen wir eine 80 m Antenne mit 2×19.5 m in 10 m Höhe über realem Grund. Die Impedanzen am Fußpunkt der Antenne bei verschiedenen Frequenzen im 80 m Band sind:

Frequenzen MHz	Impedanzen Ohm	Gewinn dBi	Bemerkung
3.5	$29 - j 53$	8.10	unterhalb Resonanz
3.6	$33 + j 0$	8.14	Resonanz
3.7	$37 + j 50$	8.18	oberhalb Resonanz
3.8	$42 + j 102$	8.21	oberhalb Resonanz

Tab. 1

Wie Tab. 1 zeigt wechseln die Abschlusszustände je nach Frequenz zwischen Abschluss der Zuleitung mit einem reellen Widerstand oder mit einer komplexen Impedanz – induktiv oder kapazitiv.

(Diese Betrachtungen gelten nur für den reinen Gegentaktbetrieb, da sich der Wellenwiderstand und die Impedanzverhältnisse für Gleichtakt- und Gegentaktbetrieb unterscheiden).

Mit den Antennenimpedanzen der Tab. 1 berechnen wir die Impedanzen am Eingang der 15 m langen 600Ω Leitung und das Stehwellenverhältnis.

Frequenz MHz	Impedanzen Ω	Betrag von Z/Ω	S_{600} Last	S_{600} Eingang	Verlust dB	Verlust %
3.5	$150 + j 1186$	1196	20.79	20.05	0.223	5
3.6	$300 + j 1645$	1672	18.18	17.60	0.177	4
3.7	$721 + j 2446$	2550	16.36	15.88	0.143	3.2
3.8	$2724 + j 3968$	4813	14.75	14.36	0.113	2.6

Tab. 2 Impedanzen am Eingang der Leitung und das VSWR am Eingang und der Last

Aus der Impedanz am Fußpunkt der Antenne berechnet sich der Reflexionsfaktor an der Antenne und daraus das VSWR, das bei der Frequenz $f = 3.5$ MHz nach Tab. 2 bspw. $S = 20.79$ ist. Wir haben also „oben“ an der Antenne eine erhebliche Fehlanpassung und stehende Wellen. Diese führen, neben der Dämpfung der Leitung, zu zusätzlichen Verlusten /1/.

Die Impedanzen nach Tab. 2, Spalte 2 sind die Lastimpedanzen der Anpassschaltung, die auf die Impedanz des Senders/Transceivers transformiert werden. Das Stehwellenverhältnis „unten“ auf der Leitung ist $S = 20.05$. Auch hier „unten“ haben wir wieder erhebliche Fehlanpassung und stehende Wellen, die durch die Dämpfung der Leitung reduziert wurden.

Wie sieht es aber aus mit dem Verlust durch Übertragung nach Abschnitt 1? Wir erreichen durch eine Anpassschaltung Leistungsanpassung zwischen APN und Antennenzuleitung und gleichzeitig Leistungsanpassung „oben“ an der Antenne.

Eine Anpassschaltung zwischen Sender und Antennenzuleitung führt zur Leistungsanpassung zwischen Sender u. Anpassnetzwerk, zwischen Anpassnetzwerk u. Antennenzuleitung und zur Leistungsanpassung „oben“ an der Antenne. Verluste durch Leistungsfehlanpassung nach (Gl.3) treten bei Anwendung eines Anpassnetzwerkes nicht auf. Die mangelhafte Leitungsanpassung führt zu zusätzlichen Verlusten durch stehende Wellen /1/.

Das Stehwellenverhältnis zwischen Sender und Anpassgerät kann mittels VSWR-Meter überprüft werden. Der angezeigte S-Wert ist nicht nur Indikator für die Leistungsanpassung auf dieser Leitung, sondern auch für die richtige Leistungsanpassung zwischen Anpassnetzwerk und Antennen-Zuleitung. Ist das VSWR $S = 1$ zwischen Sender und APN, ist Leistungsanpassung am Ausgang der Anpassschaltung gegeben. Wird nicht exakt $S = 1$ erreicht oder kann $S = 1$ nicht eingestellt werden, ist das ein sicheres Zeichen für eine falsche Dimensionierung der Anpassschaltung. Der häufige Fall eines relativen Minimum des S-Wertes hat Anpassungsverluste zwischen Sender und Zuleitung und ebenfalls zwischen Zuleitung und Antenne zur Folge.

Ein VSWR $S = 1$ zwischen Sender und APN ist der Indikator für exakte Leistungsanpassung im gesamten Antennensystem, nicht aber ein Maßstab für gute Leitungsanpassung. Aus einem guten Stehwellenverhältnis zwischen Sender und Anpassnetzwerk kann auch nicht auf geringe Verluste geschlossen werden. Es kann also vorkommen, dass zwar $S = 1$ gemessen wird, jedoch der Großteil der Leistung in der Anpassschaltung in Wärme gewandelt wird wie beim T- Glied /7/. Der Extremfall ist das Dummy-Load, $S = 1$ und keine Leistungsabgabe.

Die fehlende Leitungsanpassung am Fußpunkt der Antenne erzeugt stehende Wellen mit entsprechenden Verlusten auf der Leitung /1/, die für das Beispiel 3.1 die Tab. 2 zeigt. In Tab. 3 sind die Gesamtverluste des Systems berechnet.

Frequenz MHz	Gesamtverluste inkl. LC-Anpassung dB	L uH	C pF	I_{Lmax} A	U_{maxeff} V
3.5	1.00	28.62	109.6	4.5	2821
3.6	0.93	27.59	96.5	4.5	2798
3.7	0.87	26.51	85.6	4.5	2736
3.8	0.80	25.61	76.5	4.5	2694

Tab. 3 Gesamtverluste der 600 Ω Antennenanlage

Das Beispiel 2.4 zeigt die Notwendigkeit eines Anpassnetzwerkes zwischen Antennenzuleitung und Sender. Natürlich würde kein OM auf die Idee kommen den Sender direkt an der Zuleitung zu betreiben, doch manchmal hört man schon: „Ich habe ein SWR von $S = 2.5$, besser geht es leider nicht“.

Rechnen wir doch mal mit $S = 2.5$ den Verlust durch Fehlanpassung. Dieser wird immerhin rund 20 % und entspricht bei einer Rechenleistung von 1000 W rund 200 W, die verschenkt werden.

Nochmals sein betont, dass bei Verwendung eines Anpassnetzwerkes, trotz eines hohen Stehwellenverhältnis von $S = 17.6$ am Eingang und $S = 18.18$ „oben“ an der Antenne - also ein hoher Grad an Fehlanpassung auf der Leitung - im gesamten System **Leistungsanpassung** herrscht und die maximal mögliche Leistung zur Antenne übertragen wird. Deshalb ist es auch nicht notwendig, dass eine Antenne in Resonanz betrieben werden muss /6/.

Beispiel 2.5

Zum Vergleich betreiben wir die 80 m Antenne über RG 213 Koaxkabel gleicher Länge (15 m).

Frequenz MHz	Impedanzen Eingang der Leitung Ω	S_{50} Load	S_{50} Eingang	Verlust Leitung dB	Gesamtverlust dB	Gesamtwirkungsgrad %
3.5	25.6 + j 41.8	3.89	3.63	0.527	0.59	87.3
3.6	72 - j 10	1.52	1.49	0.183	0.22	95.1
3.7	19.9 - 21.7	3.18	3.01	0.181	0.29	93.5
3.8	8.3 - j 8.4	7.04	6.16	0.437	0.60	87.1

Tab. 4 Vergleichswerte einer 50 Ω Antennenanlage

In diesem speziellen Fall sind die Verluste mit Koaxkabel geringer, weil die Impedanzen der Antenne nach Tab. 1 in der Nähe des Wellenwiderstandes der unsymmetrischen Leitung liegen.

Angenommen wir würden die 50 Ω Antennenanlage ohne Anpassschaltung betreiben und der 500 Watt Sender habe bei der Frequenz $f = 3.5$ MHz eine Systemimpedanz von 50 Ω . Am Zuleitungseingang haben wir lt. Tab. 4 ein VSWR $S = 3.63$ und der Anpassfaktor wird $\rho = 2.63 / 4.63 = 0.5580$ und daraus $\rho^2 = 0.3226$. Die Leistung in die Antennenzuleitung berechnet sich zu $P = 500 \text{ W} (1 - 0.3226) = 338.66 \text{ W}$. Bei Verwendung der Anpassschaltung deren Verlust nur (Tab. 4) $L = (0.59 - 0.527) \text{ dB} = 0.063 \text{ dB}$ ist, wäre die Leistung in die Antennenzuleitung $P_{in} = 492.27 \text{ W}$.

Wir haben also trotz Verlust in der Anpassschaltung ein Leistungszuwachs von $\Delta P = (492.72 - 338.66) \text{ W} = 154.14 \text{ W}$. Auch hier sieht man die Notwendigkeit eines Anpassnetzwerkes. Mit der Anpassschaltung ist nach Tab. 4 der Gesamtverlust $L = 0.59 \text{ dB}$, entsprechend einem Faktor von $k = 1.1455$. Die Leistung oben an der Antenne berechnet sich damit zu $P = 500 \text{ W} / 1.1455 = 436.48 \text{ W}$.

Koaxkabel hat nur messtechnisch den Vorteil, dass ein unsymmetrisches VSWR - Meter zwischen Anpassschaltung und ein Weiteres in der Antennenleitung betrieben werden kann. Dadurch ist man in der Lage die Leistungsverhältnisse zu studieren. Auch bei koaxialer Speisung besteht Leistungsanpassung am Koppler und Leistungsanpassung an der Antenne, aber keine Leitungsanpassung. Das VSWR-Meter zwischen Sender und Koppler zeigt bei richtiger Abstimmung $S = 1$ und ist Indikator für richtige Leistungsanpassung, auch im koaxialen System.

3. Zusammenfassung

Wird der Begriff „Anpassung“ in Zusammenhang mit Leitungen verwendet, muss man unterscheiden ob man **Leitungsanpassung** oder **Leistungsanpassung** meint. Nur eine richtig dimensionierte und abgestimmte Anpassschaltung zwischen Sender und Antennenzuleitung bedingt Leistungsanpassung im gesamten Antennensystem. Ein Anpassnetzwerk (APN) ist also immer erforderlich.

Besondere Aufmerksamkeit gilt der Anpassung zwischen Sender und Anpassnetzwerk. Hier muss exakt $S = 1$ einstellbar – d.h. keine rücklaufende Leistung. Kann $S = 1$ nicht eingestellt werden, besteht relative Anpassung mit entsprechenden Verlusten durch fehlende Leistungsanpassung. Der durch die Antennenimpedanz in Bezug auf den Wellenwiderstand der Zuleitung definierte Reflexionsfaktor bestimmt die zusätzliche Dämpfung durch stehende Wellen. Diese Zusatzdämpfung kann nur durch Verkleinerung des antennenseitigen Reflexionsfaktors verringert werden /1/.

DL3LH, Walter

wa-schau@t-online.de

dl3lh@gmx.de

www.heide-holst.de

<https://lc-koppler.jimdo.com/dl3lh-s-download-sammlung>

<http://www.baeckerei-heitmann.de/DF1BT>

Literatur

- /1/ „Die Antenne macht die Musik“, DL3LH
- /2/ „Antennenmesstechnik I-VII“, DL3LH
- /3/ Mythos „Balun“, DL3LH
- /4/ Mythos „Resonante Antenne“, DL3LH
- /5/ „T-Koppler“, DL3LH
- /6/ „Das Pi-Filter mit Verlusten“
- /7/ „Passive Netzwerke zur Anpassung“, DL3LH

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.