

Grundlagen zur Messung der Linearität an Leistungsstufen

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

Vorwort:

Eine Leistungsstufe ist linear, wenn folgende Kriterien erfüllt sind:

1. Eine Vergrößerung der Eingangsspannung führt zur proportionalen Vergrößerung der Ausgangsgröße.
2. Die Addition eines Signals zur Eingangsgröße führt zu einer gleichwertigen Addition in der Ausgangsgröße.

Auf Endstufen angewandt bedeutete Linearität, dass im Ausgangssignal keine Frequenzen vorhanden sind, die nicht auch im Eingangssignal waren.

In der Realität gibt es keine Leistungsstufe die wirklich linear ist, wenn aus Gründen eines hohen

Wirkungsgrades eine Aussteuerung bis zur Grenzkennlinie RiL erfolgen muss.

Was macht nun eine Linearendstufe linear, damit der Ausdruck Linearendstufe überhaupt gerechtfertigt ist?

Leistungsendstufen im KW- und UKW-Bereich mit Röhren haben immer einen ausgangsseitigen Parallelschwingkreis, der auf die Betriebsfrequenz abgestimmt ist. Für alle Frequenzen außerhalb dieser Betriebsfrequenz stellt der Parallelkreis im Idealfall einen Kurzschluss dar. Daher ist die Amplitude der Anodenwechselspannung am Schwingkreis proportional zur der im Anodenwechselstrom enthaltenen Amplitude der Grundschwingung und rein sinusförmig, unabhängig von der Art der Kennlinie.

1. Aussteuerung einer nichtlinearen Kennlinie

Die Aussteuerung nichtlinearer Kennlinien wurde in /2/ ausführlich behandelt. Bei der Aussteuerung bis zur Grenzkennlinie RiL (Leistungsinnenwiderstand) einer Röhre ergab sich mit dem Anodenspitzenstrom Iasp die nicht aussteuerbare Restspannung

$$u_r = U_{ao} - u_a = I_{asp} * RiL \quad (Gl 1)$$

mit U_{ao} als Anodengleichspannung und u_a als Amplitude der Anodenwechselspannung. Wird die Röhre über diesen Bereich hinaus ausgesteuert, dann ist die momentane Anodenwechselspannung kleiner als die Gitterwechselspannung und es fließt Gitterstrom, für einen kurzen Moment. Die Restspannung kann nicht unterschritten werden.

Dieser Gitterstrom ist durch einen vom Hersteller vorgegeben Wert begrenzt und darf nicht überschritten werden, da sonst die filigrane Struktur des Gitters beschädigt wird.

Der Zusammenhang zwischen der Amplitude der Anodenwechselspannung und der Amplitude der Grundschwingung im verzerrten Anodenstrom ist durch die Stromflusswinkelfunktion $f_1(\Theta)$ gegeben /2/

$$i_{a1} = f_1(\Theta) * I_{asp} \quad (Gl 2)$$

bzw. für den von der Aussteuerung abhängigen Anodengleichstrom gilt

$$I_{a_0} = \psi(\Theta) * I_{asp}. \quad (Gl 3)$$

Θ Grad	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	120	150	180
$f_1(\Theta)$	0	0.073	0.146	0.216	0.281	0.340	0.391	0.436	0.471	0.500	0.535	0.521	0.500
$\psi(\Theta)$	0	0.037	0.074	0.111	0.148	0.183	0.218	0.253	0.286	0.318	0.406	0.471	0.500
$f_1(\Theta)/\psi(\Theta)$	2	1.988	1.978	1.946	1.904	1.854	1.794	1.726	1.650	1.570	1.320	1.102	1.00

Tab. 1: Werte der Stromflusswinkelfunktionen als Funktion des Stromflusswinkels Θ für eine Stromkurve des Anodenstromes proportional zur Gitterwechselspannung nach /2/

Die von der Röhre gelieferte Wechselleistung berechnet sich mit den Amplituden von Anodenwechselstrom und Anodenwechselspannung zu

$$P_{\sim} = \frac{1}{2} i_{a1} * u_a \quad (\text{Gl 4})$$

Die zugeführte Gleichleistung im Anodenkreis ist mit (Gl 3)

$$P_{=} = U_{ao} * I_{a=} = U_{ao} * I_{asp} * \psi(\Theta) \quad (\text{Gl 5})$$

Bei der Aussteuerung einer Endstufe wird Gleich- in Wechselleistung gewandelt und sollte mit hohem Wirkungsgrad erfolgen. Der Anodenwirkungsgrad beschreibt daher das Verhältnis von Anodenwechsel- zu eingesetzter Gleichleistung

$$\eta = P_{\sim} / P_{=} \quad (\text{Gl 6})$$

Die Differenz zwischen der Gleich- und Wechselleistung ist die an der Röhre in Wärme umgesetzte Anodenverlustleistung

$$Q_a = P_{=} - P_{\sim} \quad (\text{Gl 7})$$

Wird der Anodenkreis auf Vielfache der Grund-Schwingung abgestimmt, ist Frequenzvervielfachung möglich.

2. Ein-Ton-Aussteuerung einer geradlinig, dynamischen Kennlinie im AB, B - Betrieb

Die Stromflusswinkelfunktionen für beliebige dynamische Kennlinien unterscheiden sich nur geringfügig in den Werten. Daher kann ohne großen Fehler mit einer geradlinigen, dynamischen Kennlinie gerechnet werden [2].

Der im KW-Bereich vorherrschend verwendete SSB-Betrieb reduziert die Nutzbandbreite gegenüber einem AM-Signal um den Faktor 2 und erlaubt eine größere Belegung der ohnehin schmalen Amateurbänder. Zur Vermeidung nichtlinearer Verzerrungen wird der B- oder AB - Betrieb angestrebt [2]. Manchmal wird der AB-Betrieb auch noch unterteilt in AB₁, AB₂ usw. Die mit B, AB₁, AB₂ bezeichneten Arbeitspunkte unterscheiden sich durch die verwendeten Ruhestrome bei fehlender Aussteuerung. Die Arbeitspunkte AB₁, AB₂ liegen zwischen B- und A-Betrieb.

Bei idealem B-Betrieb liegt der Arbeitspunkt im Knick der Eingangskennlinie und im AB-Betrieb etwas darüber. Bei nicht ausgesteuerter Röhre fließt

immer ein Anodenruhestrom, der zu einer Verlustleistung führt.

Der Stromflusswinkel ist im B-Betrieb $\Theta = 90^\circ$, der Ruhestrom Null und nach Tab. 1 $f_1(90^\circ) = 0.5$ bzw. $\psi(90^\circ) = 1/\pi = 0.318$. Der Anodengleichstrom ist mit (Gl 3) (Mittelwert einer sinusförmigen Größe gemittelt über ein halbe Periode)

$$I_{a=} = \psi(\Theta) * I_{asp} = I_{asp} / \pi \quad (\text{Gl 9})$$

und daher die gelieferte Gleichleistung nach (Gl 6)

$$P_{=} = U_{ao} * I_{a=} = U_{ao} * I_{asp} / \pi \quad (\text{Gl 10})$$

und die von der Röhre abgegebene Wechselleistung mit (Gl 4)

$$P_{\sim} = \frac{1}{2} i_{a1} * u_a = \frac{1}{4} I_{asp} u_a \quad (\text{Gl 11})$$

mit u_a als Amplitude der Anodenwechselspannung nach (Gl 1).

Der Anodenwirkungsgrad wird nach (Gl 6) mit (Gl 11, 12)

$$\eta = P_{\sim} / P_{=} = \frac{1}{4} u_a * \pi / U_{ao} \quad (\text{Gl 12})$$

und umso kleiner, je größer die Anodenspannung U_{ao} und umso größer die Amplitude der Anodenwechselspannung ist.

Nach (Gl 7) setzt sich die zugeführte Gleichleistung

$$P_{=} = Q_a + P_{\sim}$$

aus der Anodenverlustleistung und der abgegebenen Wechselleistung zusammen.

Mit (Gl 12) wird

$$\eta = P_{\sim} / P_{=} = P_{\sim} / (Q_a + P_{\sim}) \quad (\text{Gl 13})$$

und daraus die Wechselleistung bei einer vom Hersteller vorgegebener Anodenverlustleistung.

$$P_{\sim} = Q_a * \eta / (1 - \eta) \quad (\text{Gl 14})$$

Die Stromflusswinkelfunktion $f_1(\Theta)$ hat bei einem Winkel von $\Theta = 122^\circ$ ein Maximum in Höhe von $f_1(122^\circ) = 0.535$.

Das absolute Maximum der Wechselleistung wird bei Anpassung $R_a = R_iL$ erreicht und hat den Wert

$$P_{\sim, \text{opt}} = 0.067 U_{ao}^2 / R_iL \quad (\text{Gl 15})$$

Eine größere Wechselleistung als nach (Gl 15) berechnet, kann eine Röhre niemals abgeben.

Dabei muss allerdings überprüft werden, ob die maximale Anodenverlustleistung nicht überschritten wird.

Beispiel 2.1

Eine SSB Endstufe wird mit einer Anodengleichspannung von $U_{ao} = 2150 \text{ V}$ betrieben. Nach Angaben des Herstellers ist der Anodenspitzenstrom $I_{asp} = 2 \text{ A}$. Die Endstufe wird bis zur Grenzkennlinie ausgesteuert, ohne das Gitterstrom fließt. Der Leistungswiderstand ist nach Herstellerangaben $R_{iL} = 150 \text{ } \Omega$ und die Anodenverlustleistung wird mit $Q_a = 300 \text{ W}$ angegeben.

Wir gestalten sich bei einer Ein-Ton-Aussteuerung (nur der Träger oder eine einzige Modulationsfrequenz innerhalb des Nutzbandes) die Leistungsverhältnisse an der Röhre bei idealem B-Betrieb?

Bei B-Betrieb ist der Stromflusswinkel $\Theta = 90^\circ$ und daher nach Tab. 1 $f_1(90^\circ) = 0.5$ und $\psi(90^\circ) = 1/\pi = 0.3183$.

Die Amplitude des Anodenwechselstromes ist nach (Gl 1) $i_{a1} = f_1(\Theta) * I_{asp} = 0.5 * 2 \text{ A} = 1 \text{ A}$ und der Mittelwert des Anodengleichstroms bei Aussteuerung $I_{a-} = \psi(\Theta) * I_{asp} = 2 \text{ A} / \pi = 0.6366 \text{ A}$.

Die Restspannung ist mit (Gl 1) $u_r = R_{iL} * I_{asp} = 150 \text{ } \Omega * 2 \text{ A} = 300 \text{ V}$. Daraus berechnet sich die Amplitude der Anodenwechselspannung zu $u_a = U_{ao} - u_r = 2150 \text{ V} - 300 \text{ V} = 1850 \text{ V}$. Die Anodenwechselspannung pendelt also zwischen $u_r = 300 \text{ V}$ und $u_{amax} = 2150 \text{ V} + 1850 \text{ V} = 4000 \text{ V}$ mit der Betriebsfrequenz.

Die an den Lastwiderstand abgegebene Wechselleistung ist daher $P_{\sim} = \frac{1}{4} I_{asp} u_a = \frac{1}{4} 2 \text{ A} * 1850 \text{ V} = 925 \text{ W}$ und entspricht bei Ein-Ton-Aussteuerung der PEP-Leistung.

Die zugeführte Gleichleistung ist im B-Betrieb mit (Gl 10) $P_{=} = U_{ao} * I_{asp} / \pi = 2150 \text{ V} * 2 \text{ A} / \pi = 1368.73 \text{ W}$.

Die wichtige Anodenverlustleistung ist die Differenz zwischen der Gleich- und Wechselleistung und daher $Q_a = 1368.73 \text{ W} - 925 \text{ W} = 443.73 \text{ W}$. Diese überschreitet den vom Hersteller vorgegeben Wert.

Der Anodenwirkungsgrad ist $\eta = 925 \text{ W} / 1368.73 \text{ W} = 0.675$ oder 67.58% .

Das Verhältnis von abgegebener Wechselleistung zu Anodenverlustleistung berechnet sich zu $\xi = 925 \text{ W} / 443.73 \text{ W} = 2.08$.

Die maximal mögliche Ausgangsleistung wird bei Anpassung erreicht und ist nach (Gl 8) $P_{-opt} = 0.067 U_{ao}^2 / R_{iL} = 0.067 (2150 \text{ V})^2 / 150 \text{ } \Omega = 2064.71 \text{ W}$, allerdings mit schlechtem Wirkungsgrad von nur 50% . Die Hälfte der zugeführten Gleichleistung wird am Innenwiderstand in Wärme gewandelt.

3. Aussteuerung einer nicht-linearen Kennlinie mit zwei Frequenzen gleicher Amplitude

Bei Sprachaussteuerung eines Senders wird ein Frequenzband von etwa 100 Hz bis 2500 Hz übertragen. Zur Prüfung der Linearität einer Kennlinie erfolgt die Aussteuerung stellvertretend für dieses Sammelsurium von Frequenzen mit 2 unterschiedlichen Frequenzen beliebiger Phasenlage f_1 und f_2 , die in keinem gradzahligen Verhältnis stehen sollten.

Bei rein sinusförmiger Ansteuerung enthält der Anodenstrom Intermodulationsprodukte auf den Frequenzen

$$f(m + n) = m f_1 \pm n f_2 \quad (\text{Gl 16})$$

wobei m und n natürliche Zahlen sind und deren Summe die Ordnung angibt.

Von besonderer Bedeutung sind die Mischfrequenzen 3., 5. und 7. Ordnung. Diese sind $2f_1 - f_2$, $2f_2 - f_1$ und $3f_1 - 2f_2$, $3f_2 - 2f_1$ sowie $4f_1 - 3f_2$, $4f_2 - 3f_1$, die in den Nutzfrequenzbereich oder in deren unmittelbaren Nähe fallen und mit Filtern schwer oder überhaupt nicht ausgefiltert werden können.

Produkte höherer Ordnung sind meist in der Amplitude stark gedämpft oder lassen sich durch den weiten Abstand von der Nutzfrequenz leicht herausfiltern bzw. absenken.

Die Amplituden der Intermodulationsprodukte sind abhängig von den Impedanzen, die bei diesen Frequenzen auftreten, dabei kann es zu weiteren Rückmischeffekten kommen. Ströme und Spannungen von Intermodulationsprodukten, die in den Nutzbereich fallen, finden ähnliche Impedanzbedingungen vor wie die Nutzfrequenzen und können mathematisch durch eine symmetrische Konversionsmatrix beschrieben werden.

Beispiel 3.1

Ein SSB Sender mit unterdrücktem Träger im oberen Seitenband ist auf der Frequenz $f_0 = 3600 \text{ KHz}$ abgestimmt. Das Nutzband ist in etwa $\Delta f = 100 \text{ Hz}$ bis 2.5 KHz und ist je nach Qualität der Seitenbandfilter im Sender in etwa von $f = 3600.1 \text{ KHz}$ bis 3602.5 KHz . Die beiden Modulationsfrequenzen seien $f_{mod1} = 500 \text{ Hz}$ und $f_{mod2} = 1200 \text{ Hz}$ mit einem Frequenzabstand von $\Delta f = 700 \text{ Hz}$. Die nichtlineare Kennlinie der Röhrendstufe wird folglich mit den beiden Frequenzen $f_1 = 3600.5 \text{ KHz}$ und $f_2 = 3601.2 \text{ KHz}$ ausgesteuert. Intermodulationsprodukte 3. Ordnung sind: $2f_1 - f_2 = 3599.8 \text{ KHz}$, entsprechend einem

Abstand von 200 Hz unterhalb der Trägerfrequenz. Mit $2f_2 - f_1 = 3601.9$ KHz, liegt dieses Intermodulationsprodukt mit $+ 1.9$ KHz im Nutzband. Die Produkte 5. Ordnung $3f_1 - 2f_2 = 3599.1$ KHz, entsprechend 900 Hz unterhalb des Trägers und $3f_2 - 2f_1 = 3602.6$ KHz, entsprechend 2.6 KHz oberhalb des Trägers.

Die Produkte 7. Ordnung sind: $4f_1 - 3f_2 = 3594.5$ KHz

und $4f_2 - 3f_1 = 3608.50$ KHz und somit außerhalb der Filterbandbreite. Die gleichen Intermodulationsprodukte ergeben sich natürlich auch mit $f_1 = 3601.2$ KHz, $f_2 = 3600.5$ KHz und daher die Frequenzen 3. Ordnung: $2f_1 - f_2 = 3601.9$ KHz, $2f_2 - f_1 = 3599.8$ KHz und die Frequenzen 5. Ordnung $3f_1 - 2f_2 = 3602.6$ KHz, $3f_2 - 2f_1 = 3599.1$ KHz usw.

3.1 Aussteuerung mit dem Träger und einer zusätzlichen Modulationsfrequenz

Anstelle einer zweiten Modulationsfrequenz wird oftmals der Träger genutzt. Die Aussteuerung der Kennlinie erfolgt dann mit der Trägerfrequenz und nur einer zusätzlichen Modulationsfrequenz.

Beispiel 3.2

Ein auf die Frequenz $f_0 = 3600$ KHz abgestimmter SSB Sender sendet den normalerweise unterdrückten Träger und wird zusätzlich mit einer Frequenz f_{mod} moduliert. Die sich ergebenden Intermodulationsprodukte sind in Tab. 2 zusammengefasst.

Frequenz KHz	Frequenz KHz	Frequenz Hz	3. Ordng.	3. Ordng.	5. Ordng.	5. Ordng.	7. Ordng.	7. Ordng.
F_1	F_2	f_{mod}	$2F_2 - F_1$	$2F_1 - F_2$	$3F_2 - 2F_1$	$3F_1 - 2F_2$	$4F_1 - 3F_2$	$4F_2 - 3F_1$
3600	3600.50	500	3601,00	3599,50	3601,50	3599,00	3598,50	3602,00
3600	3601.00	1000	3602,00	3599,00	3603,00	3598,00	3597,00	3604,00
3600	3601.50	1500	3603,00	3598,50	3604,50	3597,00	3595,50	3606,00
3600	3602.00	2000	3604,00	3598,00	3606,00	3596,00	3594,00	3608,00
3600	3602.50	2500	3605,00	3597,50	3607,50	3595,00	3592,50	3610,00
3610	3611	1000	3612,00	3609,00	3613,00	3608,00	3607,00	3614,00

Tab. 2 Intermodulationsprodukte 3. bis 7. Ordnung bei Verwendung des Trägers $f_0 = 3600$ KHz

Gewöhnlich wird der Sender mit einem Sprachfrequenzband von etwa 100 Hz bis 2.4 KHz ausgesteuert. Dabei treten viele Kombinationsfrequenzen auf, für deren Berechnung ein normaler PC schon mal einige Wochen braucht. Die Intermodulationsprodukte können mit einem selektiven Voltmeter oder mit einem Spektrumanalyzer erfasst werden. Dabei ist zu beachten, dass die Wobelfrequenz so gewählt wird, dass die Filter einschwingen können. Die Intermodulationsabstände können dann direkt in dB abgelesen werden.

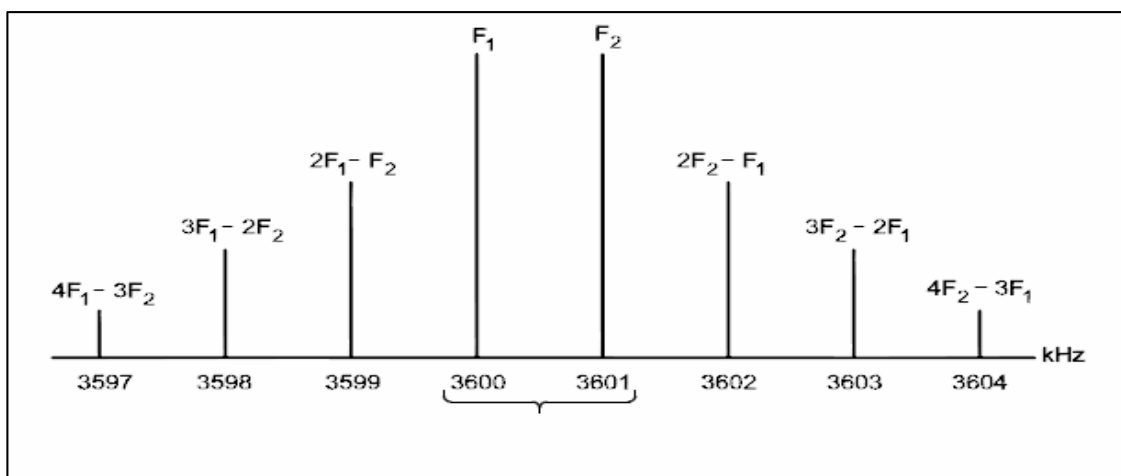


Bild 1: Intermodulationsprodukte 3. bis 7. Ordnung, $F_1 = 3600$ KHz und $F_2 = 3601$ KHz

4. Leistungsumsatz bei Ein- und Mehrtonaussteuerung

Bei einer Sender-Endstufe ist der Ausgangskreis immer auf Resonanz abgestimmt. Für die Mittenfrequenz (Resonanzfrequenz) ist ein reeller Lastwiderstand R_L vorhanden. Werden weitere Modulationsfrequenzen zur Prüfung der Linearität innerhalb der Bandbreite des Ausgangskreises verwendet, kann einfacherweise davon ausgegangen werden, dass auch für diese Frequenzen näherungsweise ein reeller Lastwiderstand vorhanden ist. Bei einer Mehrtonaussteuerung mit unterschiedlichen Frequenzen gleicher Amplitude wird die Röhre je nach Phasenlage der Schwingungen von diesen bis zur Grenzgeraden RiL ausgesteuert.

Die im Maximum vorhandene Hüllkurvenspitzenleistung, die sogenannte PEP-Leistung (Peak Envelope Power) bezeichnet die mittlere hochfrequente Wirkleistung am Ausgang einer Senderendstufe während das modulierende Signal seinen Spitzenwert hat. Die PEP-Leistung ist also der Effektivwert der Leistung am höchsten Punkt der Hüllkurve. Die Messung erfolgt mit einem Oszillografen. Erreicht der Spitzenwert der Hüllkurve die RiL-Gerade, ist die Sender-Endstufe maximal ausgesteuert. Bei Vergrößerung der Ansteuerung wird die Endstufe übersteuert und zieht Gitterstrom.

4.1 Ein-Ton-Aussteuerung einer Sender-Endstufe

Bei der Ein-Ton-Aussteuerung mit einer Frequenz f_1 hat die Amplitude der Anodenwechselspannung nur eine Komponente, u_{a1} . Die mittlere Leistung am reellen Lastwiderstand ist

$$P_m = \frac{1}{2} (u_{a1})^2 / R_L \quad (\text{Gl 17})$$

und die Hüllkurvenleistung

$$P_{EP} = \frac{1}{2} (u_{a1})^2 / R_L \quad (\text{Gl 18})$$

Aus dem Vergleich von (Gl 17) mit (Gl 18) folgt, dass bei der Ein-Ton-Aussteuerung die mittlere Leistung gleich der PEP-Leistung ist. Wir merken uns: $P_{mittel} = PEP$ bei Eintonaussteuerung.

Beispiel 4.1

Bei einem SSB Sender wird bei Ein-Ton-Aussteuerung wird an $R_L = 50 \Omega$ eine sinusförmige Spitzenspannung von $u_{a1} = 60 \text{ V}$ gemessen. Nach (Gl 17) ist die mittlere Leistung $P_m = (60 \text{ V}/\sqrt{2})^2 / 50 \Omega = 36 \text{ W}$. Nach (Gl 18) berechnet sich der gleiche Wert und wir erhalten $P_m = PEP$.

Die mittlere Leistung P_m kann mit einem handelsüblichen Wattmeter gemessen werden.

4.2 Zwei-Ton-Aussteuerung der Endstufe

Bei der Zwei-Ton-Aussteuerung mit den Frequenzen f_1 und f_2 gleicher Amplitude hat die Anodenwechselspannung zwei Anteile u_{a1} und u_{a2} .

Die mittlere Leistung am reellen Lastwiderstand R_L ist dann

$$P_{m_{ges}} = P_{m1} + P_{m2} \quad (\text{Gl 19})$$

$$P_{m_{ges}} = \frac{1}{2} (u_{a1})^2 / R_L + \frac{1}{2} (u_{a2})^2 / R_L \quad (\text{Gl 20})$$

und bei gleichen Amplituden $u_{a1} = u_{a2} = u_a$ folgt

$$P_{m_{ges}} = (u_a)^2 / R_L \quad (\text{Gl 21})$$

Die maximale Summenspannung bei zwei unabhängigen Spannungen u_{a1} und u_{a2} ist $u_s = u_{a1} + u_{a2}$. Die Spitzenleistung in der Hüllkurvenleistung ist daher

$$P_{EP} = \frac{1}{2} (u_{a1} + u_{a2})^2 / R_L \quad (\text{Gl 22})$$

und bei gleichen Amplituden $u_{a1} = u_{a2} = u_a$ folgt daraus

$$P_{EP} = 2 (u_a)^2 / R_L \quad (\text{Gl 23})$$

Das Verhältnis von (Gl 23) und (Gl 21) ist

$$P_{EP} / P_{m_{ges}} = 2 \quad (\text{Gl 24})$$

oder auch

$$P_{EP} = 2 * P_{m_{ges}} \quad (\text{Gl 25})$$

und zeigt, dass bei der Zwei-Ton-Aussteuerung die mittlere Leistung gleich der Hälfte der Hüllkurvenspitzenleistung PEP-Leistung ist.

Wird die mittlere Leistung P_m mit einem Wattmeter gemessen, dann ist die PEP-Leistung um den Faktor 2 größer.

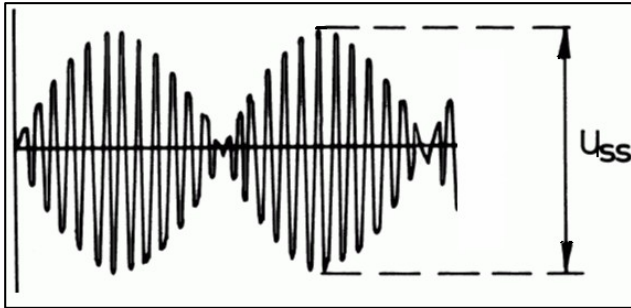


Bild 2: Hüllkurve bei einer Zwei-Ton-Aussteuerung einer Senderendstufe

Beispiel 4.2

Ein SSB Sender wird mit 2 Frequenzen innerhalb des Nutzbandes mit je einer sinusförmigen Amplitude von $u_a = 60\text{V}$ angesteuert. Welche Leistung P_m und PEP kann einen realen $50\ \Omega$ Widerstand gemessen werden?

Nach (Gl 20) berechnet sich die mittlere Leistung $P_{m_{ges}} = 2 * (60\text{ V}/\sqrt{2})^2 / 50\ \Omega = 72\text{ W}$ und hat den doppelten Wert nach Beispiel 4.1.

Die PEP-Spitzenleistung bei dieser Zwei-Ton-Aussteuerung ist nach (Gl 22) $PEP = (60\text{ V}/\sqrt{2} + 60\text{ V}/\sqrt{2})^2 / 50\ \Omega = 144\text{ W}$. Das Verhältnis von PEP Leistung zu mittlere Leistung ist wie oben berechnet natürlich $PEP/P_m = 2$.

Beispiel 4.3

Ein SSB Sender wird mit 2 Frequenzen innerhalb des Nutzbandes mit je einer sinusförmigen Amplitude von der Hälfte nach Beispiel 4.2 $u_a = 30\text{ V}$ angesteuert. Welche mittlere Leistung P_m und Hüllkurvenleistung PEP kann jetzt an einen $50\ \Omega$ Lastwiderstand gemessen werden? Nach (Gl 20) berechnet sich die mittlere Leistung $P_{m_{ges}} = 2 * (30\text{ V}/\sqrt{2})^2 / 50\ \Omega = 18\text{ W}$. Die PEP-Spitzenleistung bei dieser Zwei-Ton-Aussteuerung ist nach (Gl 22) $PEP = (30\text{ V}/\sqrt{2} + 30\text{ V}/\sqrt{2})^2 / 50\ \Omega = 36\text{ W}$ und natürlich identisch mit der Ein-Ton-Aussteuerung nach Beispiel 4.1, den die Summenspannung ist $u_{ges} = 2 * 30\text{ V} = 60\text{ V}$.

Merke:

Bei gleicher Summenspannung wird die gleiche PEP-Hüllkurveneffektiv-Leistung erhalten. Dieser Zusammenhang erleichtert uns die Rechnung wesentlich. Kennen wir durch Messung mit einem Oszilloskop die Spitzenspannung der Hüllkurve, können wir so tun als würde eine Ein-Ton-Aussteuerung vorliegen. Daraus kann die PEP Leistung und P_m -Leistung sehr einfach berechnet werden.

Beispiel 4.4

Bei einem SSB-Sender wurde bei der Zwei-Ton-Aussteuerung mit einem Oszilloskop an einer $50\text{-}\Omega$ -Last ein Spitzenwert der Hüllkurve von $u_a = 200\text{ V}$ gemessen ($U_{ss} = 400\text{ V}$). Wie groß ist die effektive Leistung in der Hüllkurve PEP?

Die PEP-Leistung ist nach (Gl 18) $PEP = \frac{1}{2} (u_{a1})^2 / R_L = \frac{1}{2} (200\text{ V})^2 / 50\ \Omega = 400\text{ W}$. Da mittlere Leistung bei der Zwei-Ton-Aussteuerung ist die Hälfte der Spitzeneffektivleistung und daher $P_m = 200\text{ W}$.

4.3 Drei -Ton-Aussteuerung der Endstufe

Bei der Drei-Ton-Aussteuerung mit den Frequenzen f_1 , f_2 und f_3 gleicher Amplitude hat die Anodenwechselspannung drei Anteile u_{a1} , u_{a2} und u_{a3} . Die mittlere Leistung am realen Lastwiderstand R_L ist dann

$$P_{m_{ges}} = P_{m1} + P_{m2} + P_{m3} \quad (\text{Gl 26})$$

$$P_{m_{ges}} = \frac{1}{2} (u_{a1})^2 / R_L + \frac{1}{2} (u_{a2})^2 / R_L + \frac{1}{2} (u_{a3})^2 / R_L \quad (\text{Gl 27})$$

und bei gleichen Amplituden $u_{a1} = u_{a2} = u_a$ folgt

$$P_{m_{ges}} = (3/2) (u_a)^2 / R_L \quad (\text{Gl 28})$$

Die maximale Summenspannung bei drei unabhängigen Spannungen u_{a1} , u_{a2} und u_{a3} ist $u_s = u_{a1} + u_{a2} + u_{a3}$. Die Spitzenleistung in der Hüllkurvenleistung ist daher

$$P_{EP} = \frac{1}{2} (u_{a1} + u_{a2} + u_{a3})^2 / R_L \quad (\text{Gl 29})$$

und bei gleichen Amplituden $u_{a1} = u_{a2} = u_{a3} = u_a$

$$P_{EP} = \frac{1}{2} (u_{a1} + u_{a2} + u_{a3})^2 / R_L = 9/2 (u_a)^2 / R_L \quad (\text{Gl 30})$$

Das Verhältnis von (Gl 28) und (Gl 31) ist

$$P_{EP} / P_{m_{ges}} = 3 \quad (\text{Gl 31})$$

oder auch

$$P_{EP} = 3 * P_{m_{ges}} \quad (\text{Gl 32})$$

und zeigt, dass bei der Drei-Ton-Aussteuerung die mittlere Leistung gleich ein Drittel der Hüllkurven-Spitzenleistung PEP ist.

Wird die mittlere Leistung $P_{m_{ges}}$ mit einem Wattmeter gemessen, dann ist die PEP-Leistung 3 mal größer als diese mittlere Leistung. Entsprechend gilt bei der Vier-Ton-Aussteuerung der Faktor 4 usw.

Beispiel 4.5

Ein SSB Sender wird mit 3 Frequenzen innerhalb des Nutzbandes mit je einer sinusförmigen Amplitude von $u_a = 20 \text{ V}$ ausgesteuert.

Welche Leistung P_m und PEP kann einen $50 \text{ } \Omega$ gemessen werden?

Nach (Gl 28) berechnet sich die mittlere Leistung

$$P_{m_{ges}} = 3/2 * (20 \text{ V})^2 / 50 \text{ } \Omega = 12 \text{ W.}$$

Die PEP-Spitzenleistung bei dieser Drei-Ton-Aussteuerung ist nach (Gl 30) $PEP = 9/2 (20 \text{ V})^2 / 50 \text{ } \Omega = 36 \text{ W}$ und natürlich identisch mit der Ein-Ton-Aussteuerung nach Beispiel 4.1, denn die Summenspannung ist $u_{ges} = 3 * 20 \text{ V} = 60 \text{ V}$. Bei gleicher Summenspannung wird immer die gleiche PEP-Leistung erhalten.

Beispiel 4.6

Bei Ein-Ton-Aussteuerung mit $u_a = 60 \text{ V}$ an $50 \text{ } \Omega$ wird eine $PEP = 36 \text{ W}$ erhalten. Die gleiche PEP-Leistung wird in der Zwei-Ton-Aussteuerung mit $u_a = 60 \text{ V} / 2 = 30 \text{ V}$ und in der Drei-Ton-Aussteuerung mit $u_a = 60 \text{ V} / 3 = 20 \text{ V}$ erhalten.

Diese einfachen Zusammenhänge erleichtern die Übersicht bei einer Messung mit Wattmeter oder Oszillograf.

Entsprechendes gilt bei der Aussteuerung mit 4 oder mehr Frequenzen zur Prüfung der Linearität der Endstufe. Wird die Endstufe mit einer Amplitude u_{a1} ausgesteuert und jetzt eine weitere Frequenz mit einer Amplitude u_{a2} addiert, ohne die Amplitude u_{a1} zu reduzieren, dann verdoppelt sich die PEP-Leistung, wenn beide Spitzenwerte gleiche Amplitude haben. Bei ungleichen Amplituden der Sinusschwingungen kann mit (Gl 20) bzw. (Gl 29) die PEP-Leistung ermittelt werden.

Allgemein gilt $PEP = n * P_{mittel}$, wobei n die Anzahl der verwendeten Modulationsfrequenzen ist. Da sich die mittlere Leistung P_m aus der Summe Einzelleistungen pro verwendeter Modulationsfrequenz ergibt, ist $P_m = n P_{Tone}$ und daher $PEP = n^2 P_{Tone}$. Wird ein Sprachfrequenzband mit vielen Frequenzen übertragen, kann daher die PEP-Leistung sehr schnell erreicht oder überschritten werden. Am einfachsten kann eine Prüfung der Übersteuerung durch einen Funk-Kollegen aus der Umgebung erfolgen oder über Websdr in Twente.

5. Zwei -Ton-Aussteuerung einer geradlinig, dynamischen Kennlinie im B- Betrieb

Bei idealem B-Betrieb liegt der Arbeitspunkt im Knick der Eingangskennlinie. Bei nicht ausgesteuerter Röhre fließt im Idealfall kein Anodenruhestrom. Der Stromflusswinkel ist im B-Betrieb $\theta = 90^\circ$ und nach Tab. 1, $f_1(90^\circ) = 0.5$ bzw. $\psi(90^\circ) = 1/\pi = 0.318$.

Bei Zwei-Ton-Betrieb wird die Röhre mit 2 gleichen Amplituden unterschiedlicher, nahe beieinander liegender Frequenzen bis zur Grenzgeraden R_{iL} ausgesteuert. Dabei kann die Restspannung $u_r = R_{iL} * I_{asp}$ nicht unterschritten werden,

Die Amplitude der Einzelschwingung ist die Hälfte der Amplitude bei der Ein-Ton-Aussteuerung u_a ,

Der Anodengleichstrom bei Zwei-Ton-Aussteuerung mit 2 gleichen Amplitude $u_{a1} = u_{a2} = u_a / 2$ ist

$$I_{a-2} = I_{asp} / \pi \quad (Gl 33)$$

und gleich dem Anodenstrom bei der Ein-Ton-Aussteuerung im B-Betrieb, weil die Amplitude der Einzelschwingung die Hälfte beträgt.

Die Gleichleistung wird mit (Gl 33)

$$P_- = U_{ao} * I_{a-2} = U_{ao} * I_{asp} * / \pi \quad (Gl 34)$$

Die von der Röhre abgegebene Wechselleistung ist bei zwei gleichen Amplituden im Anodenwechselstrom

$$P_{\sim} = 1/2 i_{a1} * u_{a1} + 1/2 i_{a2} * u_{a2} = 1/4 I_{asp} * 1/2 u_a \quad (Gl 35)$$

mit u_a als Gesamtamplitude der Anodenwechselspannung für eine Frequenz nach (Gl 1).

Der Anodenwirkungsgrad wird mit (Gl 34, 35)

$$\eta = P_{\sim} / P_- = \pi/8 * u_a * / U_{ao} \quad (Gl 36)$$

Die PEP-Leistung, als momentane Effektiv-Leistung der Hüllkurve ist abhängig von der Anzahl der verwendeten Frequenzen und Amplituden und ist mit (Gl 35) bei 2 Frequenzen

$$PEP = 1/4 * I_{asp} * u_a \quad (Gl 37)$$

und der doppelte Wert der mittleren Leistung nach (Gl 35).

Die zugeführte Gleichleistung ist die Summe aus der Anodenverlustleistung und der abgegebenen Wechselleistung nach (Gl 18)

$$P_{\Sigma} = Q_a + P_{\Sigma} \quad (\text{Gl 38})$$

Mit (Gl 19) wird

$$\eta = P_{\Sigma} / P_{\Sigma} = P_{\Sigma} / (Q_a + P_{\Sigma}) \quad (\text{Gl 39})$$

und daraus die Wechselleistung bei einer vom Hersteller vorgegebener Anodenverlustleistung.

$$P_{\Sigma} = Q_a * \eta / (1 - \eta) \quad (\text{Gl 40})$$

Beispiel 5.1

Die SSB Endstufe nach Beispiel 2.1 mit $U_{ao} = 2150$ V betrieben und dem Anodenspitzenstrom $I_{asp} = 2$ A wird mit zwei Frequenzen gleicher Amplitude erreicht. Wie gestalten sich bei idealem B-Betrieb einer Zwei-Ton-Aussteuerung der Röhre deren Leistungsverhältnisse?

Bei B-Betrieb ist der Stromflusswinkel $\Theta = 90^\circ$ und daher nach Tab. 1 $f_1(90^\circ) = 0.5$ und $\psi(90^\circ) = 1/\pi = 0.3183$. Die Hüllkurve steuert die Röhre nur während einer halben Periode aus.

Die Restspannung ist mit (Gl 1) $u_r = R_i L * I_{asp} = 150 \Omega * 2 \text{ A} = 300 \text{ V}$. Daraus berechnet sich die Amplitude der Anodenwechselspannung zu $u_a = U_{ao} - u_r = 2150 \text{ V} - 300 \text{ V} = 1850 \text{ V}$.

Der Anodengleichstrom bei voller Aussteuerung nach (Gl 33) $I_{a-2} = I_{a-2} = I_{asp} / \pi = 2 \text{ A} / \pi = 0.636 \text{ A}$.

Die zugeführte Gleichleistung ist nach (Gl 34)

$P_{\Sigma} = U_{ao} * I_{a-2} = U_{ao} * I_{asp} * / \pi = 1/\pi * 2150 \text{ V} * 2 \text{ A} = 1368.73 \text{ W}$. (oder auch $P_{\Sigma} = 0.6366 \text{ A} * 2150 \text{ V}$) und die Wechselleistung nach (Gl 35)

$P_{\Sigma} = 1/8 * I_{asp} * u_a = 1/8 * 2 \text{ A} * 1850 \text{ V} = 462.50 \text{ W}$ und natürlich die Hälfte der Leistung nach Beispiel 2.1, weil zwei Töne gleicher Amplitude verwendet werden.

Die PEP-Hüllkurvenspitzenleistung ist nach (Gl 37) $PEP = 1/4 * I_{asp} * u_a = 1/4 * 2 \text{ A} * 1850 \text{ V} = 925 \text{ W}$ und natürlich identisch mit dem Leistungswert nach Beispiel 2.1 für Eintonaussteuerung. (siehe auch Beispiele 4.1 bis 4.6). Die Anodenverlustleistung ist die Differenz zwischen Gleich- und PEP-Leistung und daher $Q_a = 1368.73 \text{ W} - 925 \text{ W} = 443.73 \text{ W}$ und überschreitet den vom Hersteller vorgegeben Wert.

Der Anodenwirkungsgrad ist $\eta = 925 \text{ W} / 1368.73 \text{ W} = 0.6758$ oder 67.58 %, wie bei der Ein-Ton-Aussteuerung. Das Verhältnis von abgegebener PEP-Wechselleistung zur Anodenverlustleistung berechnet sich zu $\xi = 925 \text{ W} / 433.73 \text{ W} = 2.13$, also ungefähr der Faktor 2.

6. Der Intermodulationsabstand und der Intercept-Point

Der Intermodulationsabstand ist der logarithmische Abstand zwischen dem Nutzsignal und dem Intermodulationsprodukt. Man kennzeichnet den IM durch IM_2 bzw. IM_3 , wobei die Zahl die Ordnung bezeichnet.

Mit zunehmender Aussteuerung einer nichtlinearen Kennlinie verringert sich der Intermodulationsabstand. Die Eingangsleistung, bei der der Intermodulationsabstand Null dB wird, ist der Intercept-Point. Ist der I-Point bekannt, lässt sich der IM berechnen. Es gilt

$$IM_3(P_1) = 2 (Ip_3 - P_1). \quad (\text{Gl 41})$$

Bei praktischen Sendeendstufen wird der Intercept-Point nicht erreicht, weil vorher das Ausgangssignal in die Sättigung geht oder zu hoher Gitterstrom fließt und die Gitterverlustleistung überschritten wird.

Zur Charakterisierung dient dann der 1dB Kompressionspunkt mit einer Eingangsleistung bei der die theoretische Ausgangsleistung 1dB unter der theoretisch zu erwartenden Leistung bleibt.

Von besonderer Bedeutung ist der IM_3 , weil Produkte 3. Ordnung ($2f_1 - f_2$ oder $2f_2 - f_1$) im Nutzband oder ganz in Nähe des Nutzbandes liegen (Beispiel 3.1).

Die Messung des IM gestaltet sich sehr einfach. Bei Aussteuerung der nichtlinearen Kennlinie mit zwei unabhängigen Innband-Frequenzen gleicher Amplitude wird mit einem Spektrum-Analyser der logarithmische Abstand zwischen Nutzsignal und Intermodulationsprodukt bestimmt.



Dr. Schau, DL3LH

wa-schau@t-online.de

www.heide-holst.de

Die Stromflusswinkelfunktionen für eine geradlinige, dynamische Kennlinie /2/.

$$f_1(\Theta) = \frac{\Theta - \cos \Theta * \sin \Theta}{\pi (1 - \cos \Theta)} \quad (\text{Gl A}_1)$$

$$f_2(\theta) = \frac{2 \sin^3 \Theta}{3\pi (1 - \cos \Theta)}$$

$$\psi (\theta) = \sin \Theta - \Theta \cos \Theta / \pi (1 - \cos \Theta) \quad (\text{Gl A}_2)$$

Die berechneten Werte für verschiedene Winkel sind aus Tab. 1 ersichtlich.

Beispiel A₁:

Berechnung der Stromflusswinkelfunktion $f_1(90^\circ)$ und $\psi (90^\circ)$. Bei $\theta = 90^\circ$ oder im Bogenmaß $\pi/2$, ist $\cos 90^\circ = 0$. Wir erhalten nach (Gl A₁) $f_1(\Theta) = (\pi / 2) : \pi = 1/2$. Für die Stromflusswinkelfunktion ψ nach

(Gl A₂) wird $\psi (90^\circ) = 1/\pi$, was sofort verständlich wird, denn es ist der Mittelwert einer sinusförmigen Größe über eine halbe Schwingungsdauer. Die entsprechenden Integrale siehe unter /2/.

Literatur auf www.3610Khz.de

1. Zinke / Brunswig, Lehrbuch der Hochfrequenztechnik, Springer Verlag, Berlin, Göttingen/Heidelberg/New York
2. Leistungsendstufen mit Röhren und Transistoren, DL3LH
3. Die Antenne macht die Musik, DL3LH
4. Anpassung, Wirkungsgrad und Co., DL3LH
5. Gegentakt- und Gleichtaktbetrieb auf symmetrischen Leitungen, DL3LH
6. Das Collins-Filter mit Verlusten in Leistungsendstufen, DL3LH
7. CQ DL 12/04, DARC, Verluste auf dem Weg zur Antenne Teil 1, DL3LH
8. CQ DL 1/05, DARC, Verluste auf dem Weg zur Antenne Teil 2, DL3LH
9. CQ DL 1/05, Varianten von Anpassnetzwerken, 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.