

Autor:

Dipl.-Ing. (FH) Peter Mosshammer  
emv GmbH  
Wallbergstraße 7  
D-82024 Taufkirchen

<http://www.emvgmbh.de>  
<mailto:info@emvgmbh.de>

## HF-Breitbandleistungsverstärker

### Auswahlkriterien für Verstärker oberhalb von 30 MHz

Grundsätzlich ist die Auswahl eines Verstärkers immer im Zusammenhang mit seinem späteren Einsatzzweck und den dafür erforderlichen Eigenschaften zu sehen. Betrachtet werden hier vorrangig Verstärker, die bei der Beaufschlagung von Prüflingen/Prüfobjekten mit geleiteten oder gestrahlten elektromagnetischen Größen eingesetzt werden. Die Art und Weise und die Größe dieser Beaufschlagung sind in den anzuwendenden Prüfverfahren der einschlägigen EMV-Normen detailliert beschrieben und bestimmen letztlich, welche Eigenschaften der Verstärker mindestens erfüllen muss. Dennoch gibt es erhebliche Unterschiede zwischen den Verstärkern verschiedener Hersteller, die sich letztlich im Kosten-Nutzen-Verhältnis widerspiegeln.

#### Elektromagnetische Größe zur Beaufschlagung des Prüflings

Prinzipiell muß vor der Auswahl des Verstärkers mindestens überschlägig ermittelt werden, welche HF-Verstärkerleistung erforderlich ist, um den Prüfling mit der gewünschten elektromagnetischen Größe in bestimmter Höhe, gemäß der herangezogenen Prüfvorschrift, zu beaufschlagen. In Betracht kommen hierfür je nach Frequenzbereich elektrische und magnetische Feldgrößen oder auf Leitungen eingekoppelte Spannungen und Ströme.

Diese Leistungsbedarfsabschätzung lässt sich über den physikalischen Zusammenhang, dass das Quadrat der zu erzeugenden, wellenwiderstandsbezogenen elektromagnetischen Größe  $X$ ,  $(\vec{E}, \vec{H}, \vec{U}, \vec{I})$  direkt proportional der dazu erforderlichen HF-Leistung  $P$  ist, durchführen. Auf mathematisch einfache Weise lässt sich dieser Zusammenhang wie folgt ausdrücken:

$$P = X^2 \cdot k$$

Der zwischen HF-Leistung und elektromagnetischer Größe vermittelnde Proportionalitätsfaktor  $k$  beinhaltet dabei sämtliche Koppel- und Übertragungsdämpfungen, Anpassungen, Wellentransformationen, Gewinne etc. Demnach kann  $P$  umso genauer vorhergesagt werden, je exakter  $k$  bekannt ist oder bestimmt werden kann. Leider ist das aber in vielen Fällen, insbesondere für felderzeugende Größen, schwierig bis unmöglich. Es sollte jedoch Klarheit darüber bestehen, dass Fehlabschätzungen von 3 dB je nach dem doppelte oder halbe HF-Leistung bedeuten und somit eine nicht unerhebliche Kostenrelevanz haben.

Am Beispiel der Erzeugung elektrischer Feldstärke soll dies nachfolgend anschaulich dargestellt werden. Unter Fernfeldbedingungen lässt sich die elektrische Feldstärke näherungsweise wie folgt berechnen:

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P \cdot G}}{d}$$

## Kriterien zur Verstärkerauswahl

Darin bedeuten:

- $E$ : Elektrische Feldstärke in einem Feldaufpunkt
- $P$ : HF-Leistung am Antenneneingang
- $G$ : numerischer Gewinn der Antenne im Fernfeld
- $d$ : Abstand des Feldaufpunktes zum Phasenzentrum der Antenne

Die zur Erzeugung der Feldstärke erforderliche Leistung lässt sich daraus, wie oben erwähnt, folgendermaßen ermitteln:

$$P = E^2 \cdot k$$

Um keine anderen Systeme ungewollt mit elektromagnetischer Störstrahlung zu beeinflussen, werden Prüfungen, bei denen der Prüfling gestrahlten elektromagnetischen Größen ausgesetzt wird, in geschirmten und mit Absorbern ausgekleideten Räumen, die oft mit einer leitenden Groundplane versehen sind, durchgeführt. In diesen Räumen treten jedoch physikalische frequenzabhängige Effekte auf, die dazu führen, dass auf bestimmten Frequenzen mehr Leistung zur Erzeugung einer bestimmten Feldstärke benötigt wird und auf anderen Frequenzen weniger. Da die zur Felderzeugung verwendete Antenne auch nicht direkt am Verstärkerausgang angekoppelt ist, ist eine Dämpfung zwischen Verstärkerausgang und Antenneneingang unvermeidbar. Wird das CW-Signal zusätzlich moduliert, ist dafür ebenfalls eine Leistungsreserve vorzuhalten. Die genannten Eigenschaften sind im Proportionalitätsfaktor  $k$  berücksichtigt

$$k = \frac{d^2 \cdot (m + 1)^2 \cdot A \cdot R}{30 \cdot G}$$

Hierin bedeuten:

- $d$ : der Abstand des Feldaufpunktes zum Phasenzentrum der Antenne
- $m$ : Modulationsgrad für Amplitudenmodulation
- $A$ : Dämpfung zwischen Verstärkerausgang und Antenneneingang durch Kabel, Stecker etc.
- $R$ : raumabhängige Regelreserve für die Erzeugung elektrischer Feldstärke innerhalb geschlossener Räume, wahlweise mit und ohne Groundplane
- $G$ : Gewinn der Antenne, gültig für die jeweiligen Umgebungsbedingungen

Eingesetzt in die obige Formel lässt sich die Leistung  $P$  wie folgt errechnen:

$$P = E^2 \cdot \frac{d^2 \cdot (m + 1)^2 \cdot A \cdot R}{30 \cdot G}$$

Folgende wesentliche Schlussfolgerungen lassen sich u.a. aus dieser Formel ziehen:

1. Die zur Erzeugung einer bestimmten Feldstärke erforderliche HF-Leistung ist direkt proportional dem Quadrat der Entfernung in dem diese Feldstärke erzeugt werden soll. Das bedeutet, wenn sich die Entfernung, in dem dieselbe Feldstärke erzeugt werden soll, verdoppelt, ist dazu die vierfache HF-Leistung erforderlich.
2. Für die Erzeugung der doppelten Feldstärke bei gleicher Entfernung ist ebenfalls die vierfache HF-Leistung erforderlich. Anschaulich dargestellt ist dieser Zusammenhang in der nachfolgenden Abbildung.

## Kriterien zur Verstärkerauswahl

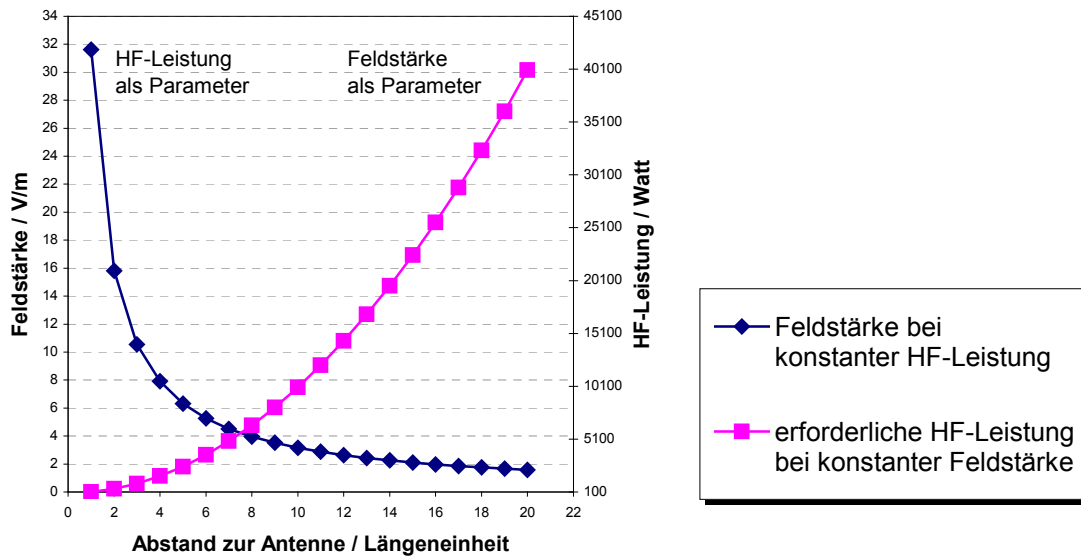


Abbildung 1: HF-Leistung und Feldstärke in Abhängigkeit von der Entfernung

- Die HF-Leistung verhält sich umgekehrt proportional zum Gewinn der felderzeugenden Antenne. Je mehr Gewinn die Antenne hat, desto weniger Leistung wird logischerweise zur Erzeugung derselben Feldstärke benötigt. Um jedoch Leistung gemäß der ersten Schlussfolgerung zu sparen, wird oft in unmittelbarer Nähe der Antenne geprüft, um ausreichend hohe Feldstärken zur Verfügung zu haben. Leider steht dies im Widerspruch zu den Antenneneigenschaften, da Antennen üblicherweise im Nahfeld nicht den für das Fernfeld angegebenen Gewinn erreichen und somit wieder mehr HF-Leistung des Verstärkers erfordern. Selten gibt es genaue Angaben der Antennenhersteller über den Gewinn ihrer Antennen im Nahfeldbereich. Eine Reduzierung des Antennengewinns im Nahfeld gegenüber Fernfeldbedingungen um 3 dB ist nicht unrealistisch.
- Dämpfungen und raumabhängige Regelreserve sind lineare Faktoren, deren Änderung eine Änderung an HF-Leistung um denselben Wert nach sich zieht. Diesen Zusammenhang zu berücksichtigen bedeutet, für möglichst geringste Dämpfungen zwischen Verstärker und Antenne zu sorgen. Die Regelreserve in Absorberräumen klein zu halten bedeutet, die Verhinderung jeglicher Raumresonanzen und Reflexionen sowie die Entfernung aller unnötigen Objekte aus dem Absorberraum. Für Dämpfungen und Regelreserve müssen nicht selten 3 dB veranschlagt werden.
- Üblicherweise werden viele Prüfungen mit der dem Prüfling gegenüber „aggressiven“ 80 % AM-Modulation durchgeführt. Für die bei der Modulation erforderliche höhere Spitzenspannung, wie in *Abbildung 1* zu sehen ist, bedarf es ebenfalls einer höheren HF-Leistung des Verstärkers, die sich wie nachfolgend angegeben ermitteln lässt. Der Modulationsgrad ist definiert als:

$$m = \frac{(U_{\max} - U_c)}{U_c}$$

Hierin sind:

- $U_c$ : der Spitzenwert des unmodulierten Trägers  
 $U_{\max}$ : die Spitzenspannung des modulierten Trägers

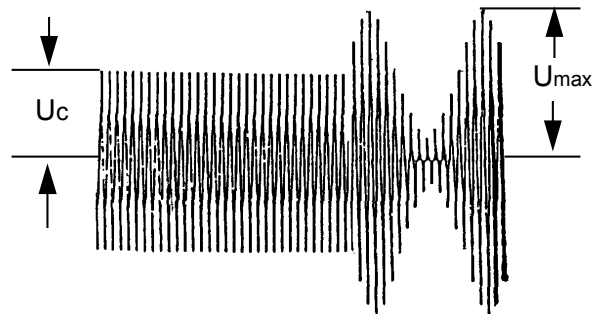


Abbildung 2: AM-Modulation - Definition von  $U_c$  und  $U_{max}$

Folglich nimmt bei 80 % AM-Modulation  $U_{max}$  den 1,8-fachen Wert der unmodulierten HF-Spannung an, nämlich  $(m + 1) \cdot U_c$ . Da die Spannung gemäß nachfolgender Formel

$$P = \frac{U^2}{R}$$

mit dem Quadrat ihres Wertes mit der Leistung verkoppelt ist, wird für 80% AM-Modulation nicht der 1,8-fache Wert, sondern das Quadrat der 1,8-fachen, also die 3,24-fache HF-Leistung, das sind umgerechnet 5,1 dB, mehr benötigt.

### Welche Kriterien spielen nun für die Auswahl eines Breitbandleistungsverstärkers eine Rolle?

#### Verwendbarkeit für mehrere Prüfverfahren

Vor dem Hintergrund einer möglichst hohen Kosten- und Zeiteffizienz, welche heutzutage bei vielen Anschaffungen immer deutlicher in Erscheinung treten, ist ein nicht unwesentliches Auswahlkriterium, dass der Verstärker für verschiedene Prüfverfahren gleichermaßen geeignet ist. Diese Forderung findet sich in den später betrachteten Kriterien Frequenzbereich, Leistung, und Modulationsarten wieder. Unterstützt durch automatisierte Prüfverfahren und -aufbauten ist es eben sinnvoll, wenn sowohl der Signalgenerator, als auch der Verstärker mehreren Prüfverfahren zur Verfügung steht. Eine Integration in fest installierte Prüfaufbauten verschiedenster Art lässt sich mittels geeigneter HF-Umschaltung leicht realisieren. Dies führt gleichermaßen zu einem deutlichen Zeitgewinn und trägt zur Reduzierung möglicher Fehlerquellen beim sonst notwendigen Umbau bei.

#### Frequenzbereich

Die Abdeckung eines bestimmten Frequenzbereichs durch den Verstärker ist mindestens durch das anzuwendende Prüfverfahren vorgegeben. Die Verstärkerhersteller haben ihre Produktlinien an diesen Vorgaben orientiert. Einige Hersteller, wie zum Beispiel Amplifier Research, sind jedoch immer bestrebt, mit ihren Produkten einen möglichst weiten Frequenzbereich abzudecken. Dazu passend sind oftmals entsprechend breitbandige Antennen verfügbar. Insbesondere im Zusammenhang mit der immer mehr an Bedeutung gewinnenden Messergonomie ist dieser Aspekt nicht zu unterschätzen. Rechnet man den Zeitaufwand für Messumrüstungen, Antennenwechsel etc. über die Lebensdauer des Verstärkers hoch, wird deutlich, dass sich die Mehrkosten im Anschaffungspreis eines Verstärkers mit größerer Bandbreite durch die eingesparten Prüfzeiten sehr schnell amortisieren werden.

Die Abdeckung eines möglichst großen Frequenzbereichs ist also ein wichtiges Kriterium bei der Auswahl eines Verstärkers. Breitbandigere Verstärker sind daher aufwendigeren Mehrbandlösungen, bei denen außerdem auch eine höhere Ausfallwahrscheinlichkeit gegeben ist, vorzuziehen. Selbstverständlich gibt es technisch sinnvolle Grenzen, an denen ein Verstärkerwechsel unumgänglich ist.

Neben der Eignung der Verstärker für mehrere Prüfverfahren durch die Abdeckung eines großen Frequenzbereiches bei möglichst flachem Amplitudengang gibt es weitere, nicht weniger wichtige Anforderungen, die moderne Breitbandleistungsverstärker erfüllen sollten.

### Verhalten bei Fehlanpassung

Darunter ist die Verträglichkeit des Verstärkers bei Fehlanpassung an seinem Ausgang zu verstehen. Diese Frage ist von praktischer Bedeutung, da die verwendeten Übertragungsmedien, wie Antennen, Koppelzangen und Stripline, oft schon konstruktionsbedingt beim Anschluß an ein ideales 50-Ohm-System immer eine gewisse Fehlanpassung aufweisen. Das heißt, ein Teil der HF-Ausgangsleistung des Verstärkers wird von den nachgeschalteten Komponenten zurück an den Ausgang des Verstärkers reflektiert. Stehwellenverhältnisse von  $> 6:1$  sind dabei nicht ungewöhnlich.

In diese Fällen steigt die Verlustleistung in den Endstufen der Verstärker deutlich an. Daher müssen sie, um bei einem schlechteren VSWR nicht zerstört zu werden, eine hohe Leistungsverträglichkeit besitzen. Dieser Forderung können Klasse-A-Verstärker im Gegensatz zu Klasse-AB-Verstärkern konstruktionsbedingt entsprechen und eignen sich daher besonders als Breitbandverstärker, auch wenn keine optimalen Anpassungsverhältnisse zu erwarten sind. Nachteilig ist jedoch ihr geringerer Wirkungsgrad, weshalb Klasse A-Verstärker zur Erzeugung gleicher Ausgangsleistung bei optimaler Anpassung teurer sind als Klasse AB-Verstärker. Klasse AB-Verstärker dagegen, nach dem Gegentaktprinzip arbeitend, müssen zusätzlich mit Schutzschaltungen für den fehlangepassten Betrieb erweitert werden, die die Ausgangsleistung des Verstärkers zurückregeln, um sie vor Zerstörung zu schützen.

Letztlich äußert sich das Verhalten des Verstärkers bei Fehlanpassung in seiner Lasttoleranz. Sie ist wie folgt definiert:

$$\text{Lasttoleranz} / \% = \frac{P_v}{P_n} \cdot 100$$

$P_v$ : Vorwärtsleistung bei 100% Reflexion

$P_n$ : Nennleistung

Wünschenswert ist, dass der Verstärker nach Möglichkeit unabhängig vom VSWR an seinem Ausgang trotzdem in der Lage ist, seine spezifizierte Vorwärtsleistung abzugeben. Eine Lasttoleranz von 100% bedeutet, dass der Verstärker bei einem VSWR gegen  $\infty$  dennoch die spezifizierte Ausgangsleistung liefert.

### Definition der minimalen Ausgangsleistung

Aufgrund der unterschiedlichen Lasttoleranzen der verschiedenen Verstärkertypen ist es wichtig, ein eindeutiges Kriterium zu haben, um die Verstärker bezüglich ihres Verhaltens bei Fehlanpassung und der daraus resultierenden Ausgangsleistung zu vergleichen.

Hierzu wurde die minimale Ausgangsleistung (Minimum Available Power *MAP*) definiert. In einem Diagramm wird dazu die Nennleistung über der reflektierten Leistung bzw. dem VSWR gemäß *Abbildung 3* aufgetragen. Die MAP gibt eine eindeutige Aussage über das Leistungsvermögen eines Verstärkers in Abhängigkeit vom anstehenden VSWR. Ein Hersteller, der nicht in der Lage ist, dieses Diagramm zu liefern, kann über die tatsächliche Leistungsfähigkeit seiner Verstärker gar keine Aussage machen.

Deshalb ist bei der Auswahl der Verstärker eine genaue Bewertung der technischen Eigenschaften in Verbindung mit deren Kosten notwendig. Bei einem offensichtlich günstigen Verstärkerpreis kann unter Umständen die Verstärkerleistung ohne Berücksichtigung der MAP und der Lasttoleranz teuer erkaufte werden.

## Kriterien zur Verstärkerauswahl

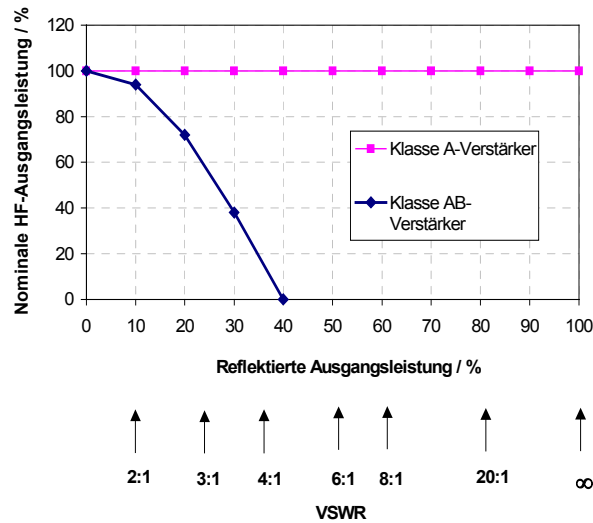


Abbildung 3 Minimal verfügbare HF-Ausgangsleistung in Abhängigkeit von der reflektierten Ausgangsleistung bzw. VSWR

Der Preis eines Klasse-AB-Verstärkers liegt ca. 30% unter dem eines Klasse-A-Verstärkers. Dabei werden Eigenschaften bezüglich Frequenzbereich, HF-Ausgangsleistung, Verstärkung und Linearität als gleichwertig vorausgesetzt. Diese Betrachtungsweise geht aber von idealen Bedingungen aus, d. h., daß das VSWR  $< 2:1$  ist. Wie bereits erwähnt, kann das VSWR eines Prüfaufbaus aber durchaus  $4:1$ ,  $6:1$  oder sogar  $10:1$  betragen. Ein Verstärker, der nicht auf Verträglichkeit dieser Fehlanpassung konstruiert ist, regelt zurück oder schaltet sogar ab. Folglich muß ein Verstärker höherer Ausgangsleistung ausgewählt werden, um trotz eines schlechten VSWR die benötigte HF-Leistung zu liefern. Um zum Beispiel noch 100 W tatsächlicher Ausgangsleistung bei einem VSWR von  $4:1$  zu erhalten, muß ein AB-Verstärker bei idealer Anpassung eine Leistung von mindestens 500 Watt liefern. Wie in Abbildung 4 dargestellt, liegen die Kosten für einen 500-Watt-Verstärker jedoch um ca. 140 % über denen eines Klasse-A-Verstärkers, der 100 Watt bei einer Lasttoleranz von 100% liefert. Ein günstiger Preis ohne Berücksichtigung der Lasttoleranz kann daher in der Praxis zu großen Überraschungen führen, wenn die geforderte Feldstärke nicht erreicht wird.

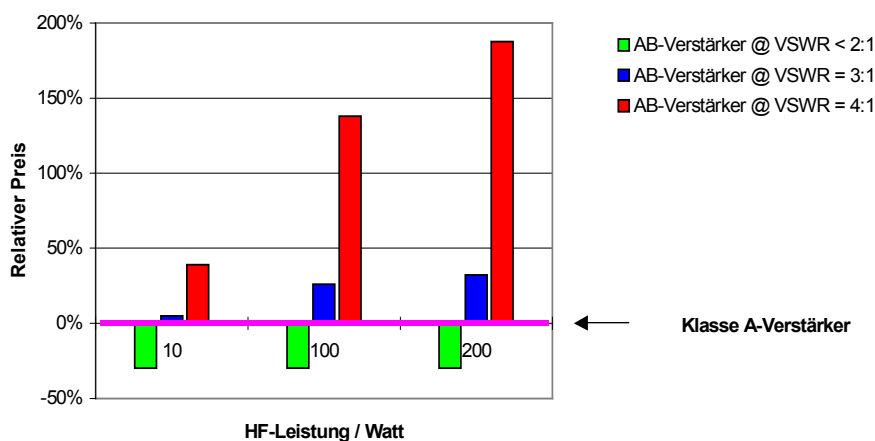


Abbildung 4 relativer Preis eines Klasse AB-Verstärkers in Abhängigkeit des VSWR bezogen auf einen Klasse A-Verstärker gleicher Leistung

### Nichtlinearitäten

Bei der Verwendung von Leistungsbreitbandverstärkern ist es unumgänglich, auch deren Linearitätseigenschaften vor der Auswahl mit zu berücksichtigen. Es ist leicht einsehbar, dass bei der Beaufschlagung mit einer elektromagnetischen Größe eines Prüflings gemäß der Prüfvorschrift lediglich auf der gerade eingestellten Frequenz geprüft werden soll, um reproduzierbare Aussagen über das Verhalten des Prüflings bei dieser Frequenz zu bekommen. Daher ist eine wesentliche Anforderung an die eingesetzten Verstärker, die Generierung von Oberschwingungen ausreichend zu unterdrücken und dennoch die angegebene Nennleistung im gesamten spezifizierten Frequenzbereich zu erreichen.

Kenngrößen, die das Linearitätsverhalten der Verstärker eindeutig beschreiben, sind die Leistung im 1-dB-Kompressionspunkt sowie der Intercept Point IP2 und IP3, die den jeweiligen Abstand der 1. und 2. Harmonischen zur Grundschwingung (Carrier), ausgedrückt in dBc, angeben. Jeder Hersteller von Breitbandverstärkern muss diese Kenngrößen angeben können. Die bloße Angabe einer Nennleistung alleine reicht als Leistungsangabe und Entscheidungsgrundlage für den Einsatz eines Verstärkers nicht aus.

Gefordert ist die Angabe der Ausgangsleistung im 1-dB-Kompressionspunkt. Das ist die Ausgangsleistung, bei welcher der Verstärker seine lineare Arbeitskennlinie verlässt und in die Sättigung gerät. Das bedeutet, dass die Ausgangsleistung nicht mehr proportional zur Eingangsleistung zunimmt. Seine Verstärkung ist an diesem Punkt um 1 dB kleiner als im linearen Bereich. Im gleichen Maß nehmen die Verzerrungen beim Verlassen des linearen Bereichs zu.

Eine Angabe von x Watt Ausgangsleistung bei typisch 1 dB Kompression ist deshalb unzureichend für den Anwender, da sie auch die Möglichkeit einer höheren Kompression als nur 1 dB zulässt und somit die Tatsache verschleiert, dass die spezifizierte Nennleistung nicht über den gesamten Frequenzbereich bei der 1-dB-Kompressionsleistung erreicht wird. Eine Angabe von **mindestens** x Watt bei 1 dB-Kompression hingegen bedeutet, dass der Verstärker in der Lage ist, diese Ausgangsleistung über den gesamten Frequenzbereich bei maximal 1-dB-Kompression zu liefern. Der Anwender kann somit sicher sein, dass sein Verstärker auch tatsächlich in der Lage ist, die angegebene Leistung zu liefern.

### Bauweise und Bauform

Vor dem Hintergrund der Kosteneinsparung spielen letztlich auch immer Eigenschaften wie die Größe, die Kühlungsart sowie die Bauart (Halbleiter- oder Röhrenverstärker) eine nicht zu vernachlässigende Rolle bei der Entscheidung für einen bestimmten Verstärker. Es liegt auf der Hand, dass sehr leistungsstarke Verstärker relativ viel Platz benötigen, der dementsprechend vorgehalten werden muß und Kosten verursacht. Insbesondere wenn bestehende System aufgerüstet werden sollen, müssen neue Verstärker mit in denselben Räumen untergebracht werden, in denen sich die bereits vorhandene Technik befindet. Somit ist auch die Wärmeabgabe der hinzukommenden Verstärker bei der Berechnung der erforderlichen Kühlleistung einzubeziehen. Unter Umständen reicht die bestehende Klimatisierung dann nicht mehr aus, um die entstehende Wärme abzuführen, so dass bspw. eine aufwendigere Wasserkühlung zusätzlich installiert werden muß, die schon auf Grund des erhöhten Installationsaufwands deutlich teurer ist als eine Luftkühlung.

Sowohl die Wärme-Verlustleistung je Watt HF-Leistung als auch die Größe des Verstärkers reduzieren sich deutlich mit dem Übergang von Röhrenverstärkern zu Halbleiterverstärkern. Wo es möglich ist, werden, wie zum Beispiel im Frequenzbereich bis 1 GHz, praktisch keine Röhrenverstärker als Breitbandleistungsverstärker mehr verkauft. Die Verstärkerhersteller arbeiten intensiv daran, auch im GHz-Bereich (bis 20 GHz) starke Leistungsverstärker auf Halbleiterbasis zu entwickeln und zu produzieren. Denn neben dem Nachteil der Größe und der höheren Wärmeverlustleistung haben die Röhrenverstärker, die in diesem Frequenzbereich eingesetzt werden, zusätzlich den Nachteil, dass sie auf Grund der geringeren Lebensdauer der Röhren und deren erforderlichen Austauschs höhere Kosten im Langzeitbetrieb verursachen.

## Kriterien zur Verstärkerauswahl

### Zusammenfassung

Letztlich ist die Entscheidung für einen Verstärker immer von zwei hauptsächlichen Kriterien getrieben, nämlich

1. ein Maximum an HF-Leistung,
2. bei einem Minimum an Kostenaufwand zu erreichen.

Beide Punkte stehen konträr zueinander. Daher obliegt es demjenigen, der darüber zu entscheiden hat, welcher Verstärker beschafft wird, hier einen vernünftigen Kompromiß zwischen technischer Maximalforderung und einer sinnvollen, langfristig kostengünstigen und technisch sauberen Lösung zu finden.

Zur Ermittlung der benötigten Verstärkerleistung müssen alle Einflußgrößen wie Messabstand, Wanderung des Phasenzentrums der Antenne, Antennengewinn, Leitungsverluste, erforderliche Modulation, Einflüsse durch die Umgebung und vom Prüfling sowie das Gesamt-VSWR betrachtet werden. Ausreichende Leistungsreserven sind entsprechend zu berücksichtigen. Klasse-A-Verstärker sind Klasse-AB-Verstärkern deutlich vom Preis-/Leistungsverhältnis überlegen. Nur eine genaue Bewertung des Frequenzbereichs, der minimal verfügbaren Leistung, der Lasttoleranz und des linearen Verhaltens des Verstärkers ermöglichen eine klare Aussage, ob ein Verstärker zur Erzeugung von elektromagnetischen Größen mit den geforderten Werten geeignet ist. Erst die Betrachtung all dieser technischen Parameter unter Berücksichtigung kostenrelevanter Parameter wie Bauweise und Bauform des Verstärkers ergeben ein objektives Bild über die Eigenschaften und Tauglichkeit eines Verstärkers für den jeweiligen Aufgabenzweck.

### Literatur

- [1] Sutter/Gerstner, EMV Einstrahlungs- und Störfestigkeitsmeßtechnik, Franzis Verlag
- [2] Amplifier Research, Broadband Note, 17.05.1994
- [3] Amplifier Research, Application Note #127
- [4] Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, Meinke Gundlach, Springer-Verlag 1992
- [5] IEC 801 Teil 3 Kriterien für die Auswahl von Verstärkern, Gerhard Wahrmann, HF-Report 1994