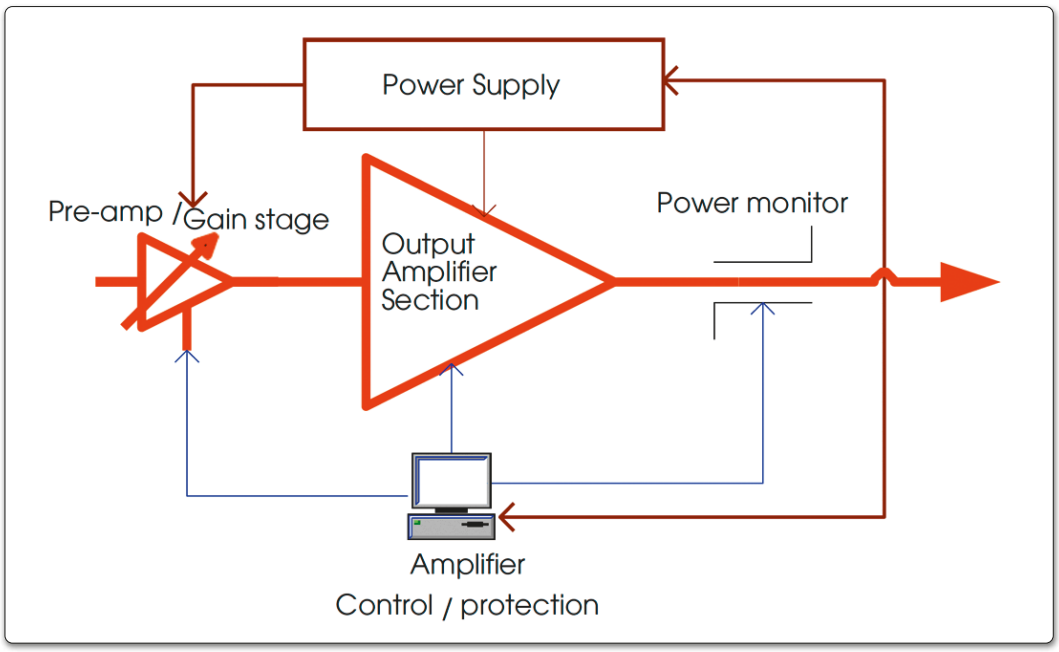
Verstärker für EMV-Tests richtig auswählen

Die richtige Auswahl des EMV-Verstärkers ist ein wichtiger Schritt, um die geforderten HF-Pegel in guter Qualität zu erreichen.



Es sollte beachtet werden, dass Qualität und Support bei der Auswahl eines Verstärkers ebenso wichtig sind wie seine spezifizierten Eigenschaften.

Weitere Überlegungen

Elektromagnetische Beeinträchtigungen für ein System können sowohl natürlich als auch vom Menschen verursacht sein und lassen sich in vier Haupttypen von Tests eingliedern: gestrahlte Störfestigkeit, gestrahlte Emissionen, leitungsgebundene Störfestigkeit und leitungsgebundene Emissionen. Die Grenzwerte und Werte, die für diese Tests verwendet werden, sind in verschiedenen Normen definiert und wurden von verschiedenen Organisationen angenommen. Die Produkte müssen die Anforderungen dieser Normen erfüllen.

In vielen Fällen ist die Norm ausschlaggebend für die Auswahl des Verstärkers. Darüber hinaus hat der Endnutzer oft besondere Anforderungen. Die Überlegungen des Endbenutzers können genauso wichtig sein wie die Industrienormen, welche in Bereichen wie Militär, Luftfahrt, Automobil und Verbraucher verwendet werden. Beispiele:

• gestrahlte Störfestigkeit

IEC 61000-4-3: kommerziell, ISO 11451, ISO 11452-2: Kraftfahrzeuge

• gestrahlte Emissionen

CISPR 11, 22, 25, 32: kommerziell, MIL-STD-461, RE102: militärische Komponenten

• geleitete Störfestigkeit

IEC 61000-4-6: kommerziell, ISO 11452-4: Automobilindustrie

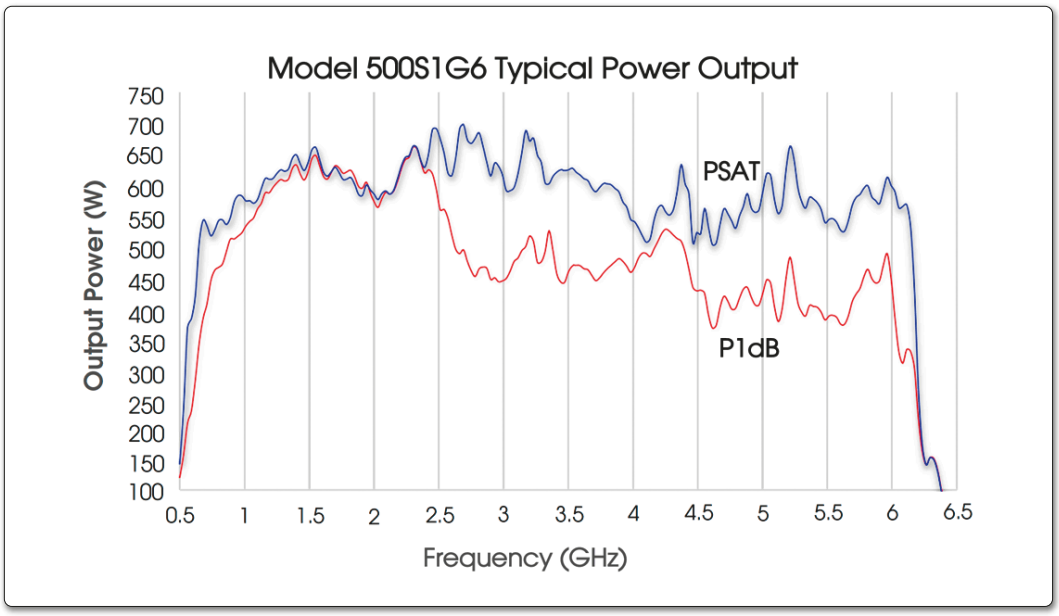


Bild 1: Beispiel für die Ausgangsleistung eines 6-GHz-Festkörperverstärkers im Frequenzbereich

Quelle: Selecting RF/Microwave Power Amplifiers for EMC Testing AR RF/Microwave Instrumentation, https://arworld.us/

frei übersetzt und gekürzt von FS

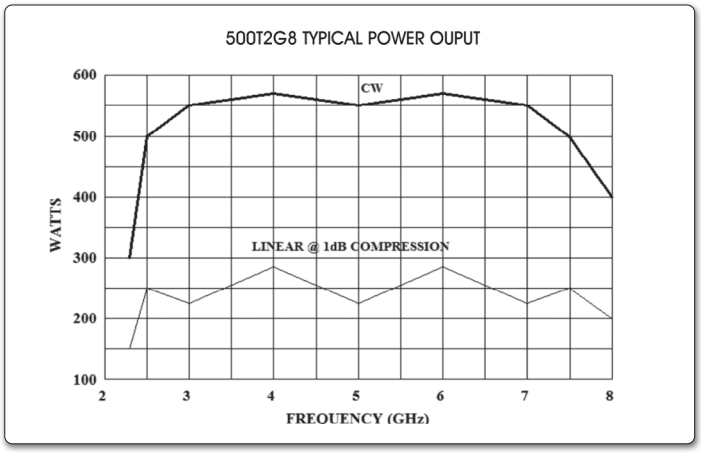


Bild 2: Frequenzverhalten eines 8-GHz-TWTAs

• geleitete Emissionen

CISPR 11, 22, 25, 32: kommerziell, MIL-STD-461, CE101, CE102: militärische Komponenten

Definitionen von Verstärkerspezifikationen

• Frequenzbereich

Verstärker sind nur spezifiziert für den Betrieb innerhalb eines definierten Frequenzbereichs. Einige Halbleiterverstärker arbeiten knapp außerhalb dieses Bereichs mit erheblicher Leistungsreduktion (Bild 1), während TWT-Verstärker bereits vor Erreichen der oberen spezifizierten Frequenzgrenze nachlassen und darüber einen viel härteren Cutoff aufgrund des Wellenleiters aufweisen (Bild 2).

• Lineare Ausgangsleistung

Die maximale lineare Ausgangsleistung setzt keine Kompression voraus. Sie entsteht an der Grenze zum Einsatz der Kompression.

• Ausgangsleistung @ 1 dB Komprimierung

Die vom Verstärker erzeugte Leistung am 1-dB-Kompressionspunkt liegt immer mehr oder weniger über der Nennleistung, s. Bild 3. Wenn Sie zum Beispiel eine bestimmte lineare Leistung benötigen und der Hersteller für seine Verstärker die Leistung bei P1dB angibt, müssen Sie Ihren Verstärker entsprechend der P1dB-Spezifikation einschätzen.

• Nennleistung

Die Definition variiert je nach Hersteller. Einige Hersteller definieren sie als die Ausgangsleistung für eine bestimmte Eingangsleistung über den Betriebsfrequenzbereich, andere definieren sie als die gesättigte Ausgangsleistung des Verstärkers. Denn der 1-dB-Kompressionspunkt kann als das obere Ende der linearen Leistung betrachtet werden. Zudem geben einige Hersteller die Nennleistung bei P1dB an, weil es auch Anwendungen gibt, bei denen die Linearität nicht kritisch ist.

• Verzerrungen durch Oberschwingungen

Als Verhältnis der Summe der Leistungen aller harmonischen Komponenten zur Leistung der Grundfrequenz verlangen viele Testspezifikationen mindestens -6 dBc. Es ist wichtig, dass der ausgewählte Verstärker nicht mehr harmonische Verzerrung als von der Norm gefordert hat. Die harmonischen Verzerrungen sind eine wichtige Leistungsangabe für Anwendungen, für die strenge Linearitätsanforderungen gelten (IEC/EN). Bild 4 zeigt mögliche Verläufe für 2nd und 3nd Harmonics.

• Verstärkung

Nennwert, Minimal- und Maximalwert sind denkbar. Die Verstärkung wird in der S-Parameter-Terminologie S21 genannt.

• Ebenheit (Flatness)

Schwankungen in der Ebenheit der Verstärkung über der Frequenz können bei breitbandigen Signalen zu Verzerrungen und bei schmalbandigen Signalen zu Abweichungen von der erwarteten Ausgangsleistung führen.

• Wirkungsgrad

Dies ist das Verhältnis zwischen der Leistung des Ausgangs und der Gesamtleistungsaufnahme (Signaleingangsleistung plus Versorgungsleistung). Obwohl Klasse-A-Verstärker von Natur aus weniger effizient als andere Verstärkerklassen sind, können bestimmte Techniken die Effizienz des Verstärkers verbessern. Hocheffiziente Verstärker sind nicht nur sparsam, sondern auch relativ klein.

• Impulsfähigkeiten

Maßstäbe sind die Begrenzungen der Impulsbreite, der Impulsrate und des Tastverhältnisses eines periodischen Signals. Gepulste SSPAs und TWTs erzeugen eine höhere Spitzenleistung als CW-Leistung, aber sie können nur eine begrenzte Menge an HF-Leistungsstrom durch den Verstärker leiten.

• Modulation (AM, FM, PM)

Es gibt zwar eine Vielzahl von HF-Modulationen, die in der Kommunikationswelt verwendet werden, jedoch gibt es nur ein paar spezifische Modulationen, die von EMC-Testnormen verwendet werden, um die realen Bedrohungen nachzubilden, wie z.B. Pulsmodulation (PM) und Amplitudenmodulation (AM). Es ist zwingend erforderlich, dass der Verstärker bei der Prüfung in der Lage ist, die erforderliche Modulation originalgetreu zu reproduzieren, also ohne Veränderung und ohne fremde Verzerrungen hinzuzufügen.

• Toleranz der Anpassung

Hier geht es insbesondere um die Fähigkeit eines Verstärkers, mit nicht korrekt angepassten Lasten und damit auch mit unterschiedlichen Mengen an reflektierter Leistung umzugehen. Bei EMV-Anwendungen kann es zu einer sehr schlechten Anpassung

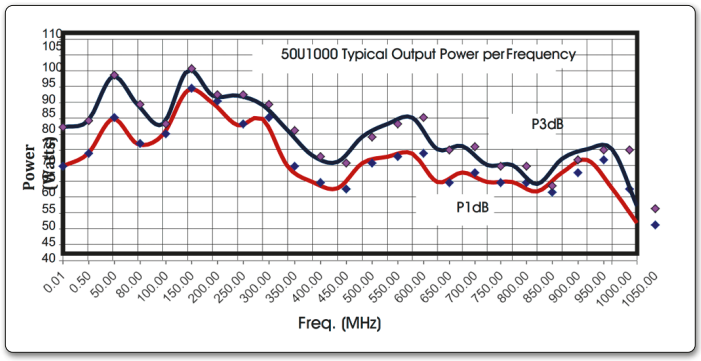


Bild 3: Verläufe komprimierter Leistung

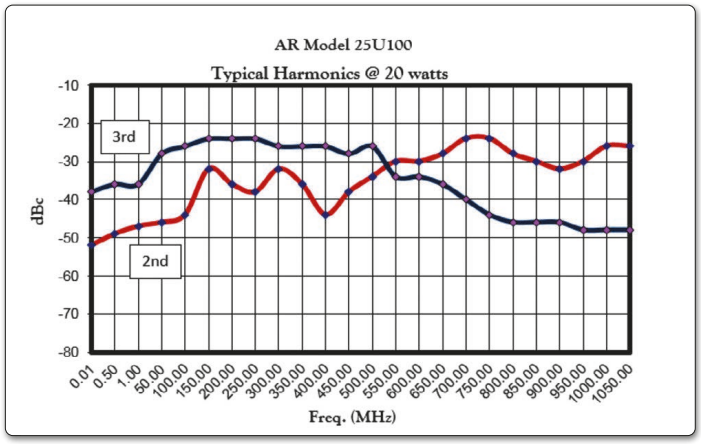


Bild 4: Verläufe für die Oberwellen-Unterdrückung

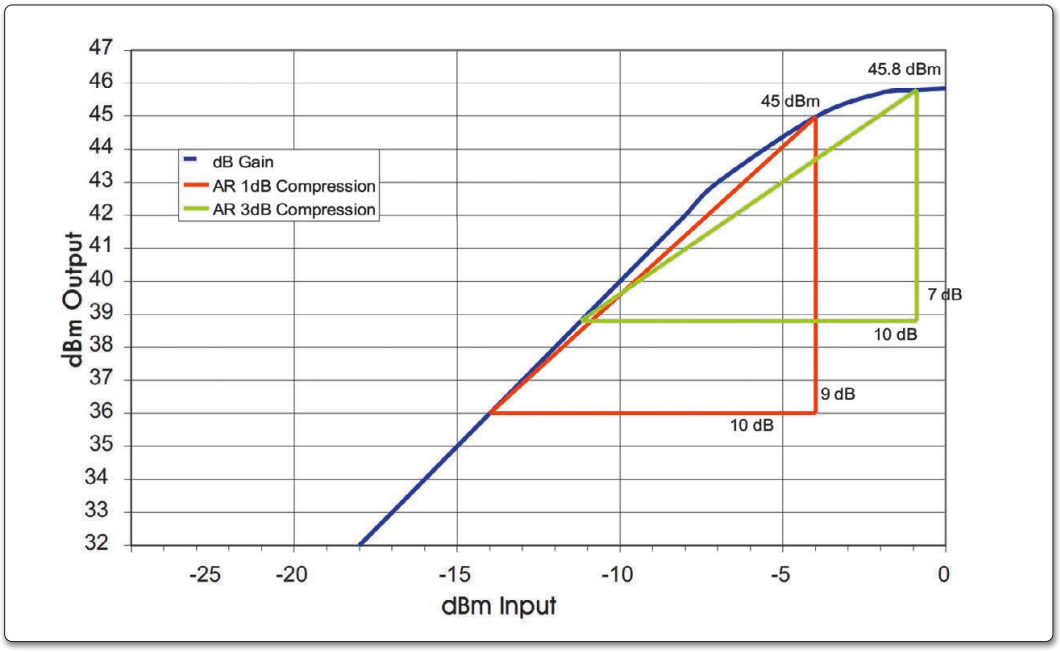


Bild 5: Verläufe von Nennverstärkung und Verstärkung für 1 und 3 dB Kompression

an 50 Ohm kommen. Während der Tests ist es dann wichtig, den Verstärker vor Schäden durch reflektierte Leistung zu schützen.

Erfordernisse an Ein- und Ausgang

Wieviel Eingangsleistung erforderlich ist, um die volle Ausgangsleistung zu erreichen, ist eine häufige Frage bei der Auswahl eines Verstärkers. Einige Hersteller haben eine Eingangsleistung von 1 mW angegeben. In diesen Fällen ist zwar die Nenneingangsleistung zu 1 mW definiert, jedoch liefern die meisten dieser Verstärker ihre Nennausgangsleistung mit weniger als 1 mW Eingangsleistung. Achten Sie auf die maximale Eingangsleistung eines Verstärkers. Sie variiert je nach Hersteller und möglicherweise je nach Modellfamilie. Die Stärke des Eingangssignals hat einen großen Einfluss auf das Ausgangssignal. Sie bestimmt den Betriebsbereich und damit den Grad der Komprimierung des Verstärkerausgangs. Sofern sie nicht im extremen linearen Bereich betrieben werden, verzerren Verstärker das Signal bis zu einem gewissen Grad. Je höher die Amplitude des Eingangssignals, desto größer ist das Risiko der Ausgangskompression. Am 1-dB-Kompressionspunkt kommt es zu einer leichten Abflachung am oberen und unteren Ende eines Sinussignals auftreten.

Wird der Verstärker weiter in die Sättigung getrieben, nimmt die Verzerrung zu und schließlich nähert sich das CW-Eingangssignal einer Rechteckwelle an. Die 1- und 3-dB-Kompressionspunkte sind in Bild 5 dargestellt.

Durch die Verzerrung entstehen unerwünschte Signale bei harmonischen Frequenzen, die ein Spektrumanalysator aufdeckt. Bild 6 zeigt die Auswirkung der Sättigung eines TWT-Verstärkers, wobei die Oberschwingung nur eine etwas geringere Amplitude hat als das Grundtonsignal. Diese Situation verursacht unnötige Probleme für den Prüfingenieur. Wenn unter diesem Szenario das EUT während der Störfestigkeitsprüfung ausfällt, weiß der Prüfingenieur nicht, ob die Ursache des Ausfalls auf die Grundschwingung oder die Oberschwingung zurückzuführen ist. Wenn zusätzliche Oberschwingungen hohe Amplituden aufweisen, muss der Prüfer alle Oberschwingungen auswerten, um die Ursache des Ausfalls zu bestimmen. Es ist auch möglich, dass weder die Grundschwingung noch eine einzelne Oberschwingung einen Ausfall verursacht, sondern eine Kombination aus der Grundschwingung und der Oberschwingung oder mehreren Oberschwingungen.

Die am häufigsten verwendeten Leistungsmessgeräte und Feldsonden sind breitbandig, also anfällig auf obiges Szenario. Dies kann die Messung der Verstärkerausgangsleistung oder des erzeugten Feldes zusätzlich erschweren.

Von Typen und Klassen

Bei EMV-Verstärkern gibt es verschiedene Typen, z.B. Solid State (SS), TWT, CW, Pulse. Diese arbeiten in verschiedenen Betriebsklassen, wie Klasse A und Klasse AB. Klasse-A- und Klasse-AB-Verstärker haben jeweils ihre Stärken und Schwächen. Verstärker der Klasse A sind die am robustesten. Sie

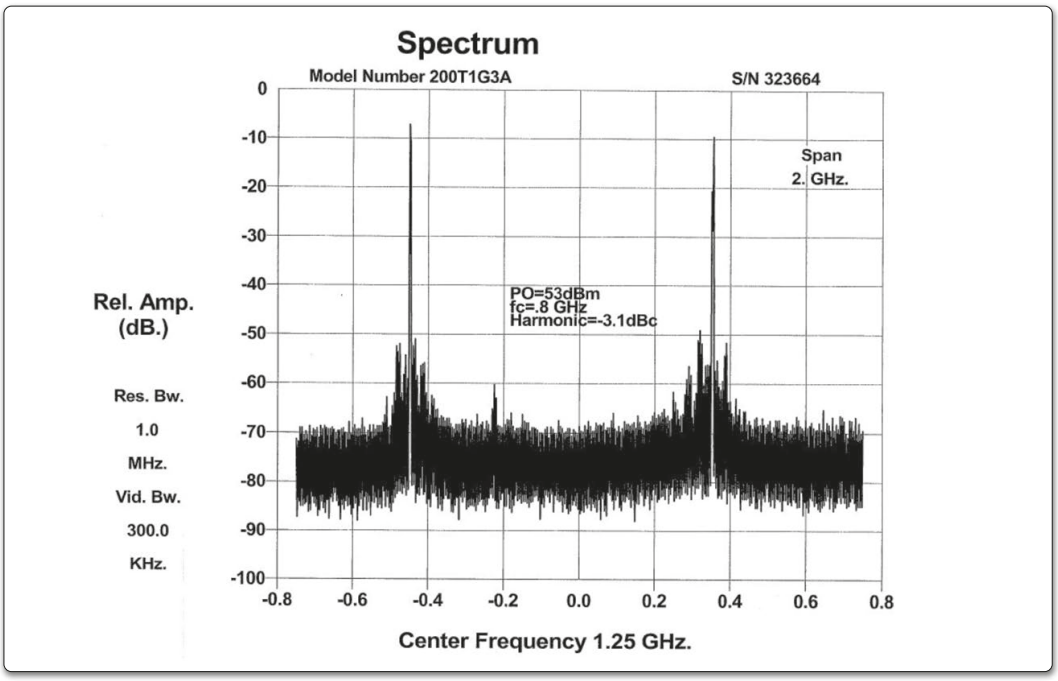


Bild 6: Auswirkung der Sättigung eines TWT-Verstärkers, s. Text

Merkmale	Klasse A	Klasse AB
Ausgangsverzerrung	geringe Verzerrung, höchste Linearität	größere Verzerrung, geringere Linearität
Kosten	teurer	billiger
elektrische Robustheit	Verstärker wird sicher arbeiten unabhängig von Last-Fehlanpassung	Verstärker reagiert empfindlicher auf Last-Fehlanpassung, Leistungsbegrenzung sinnvoll
Größe/Gewicht	größer/schwerer	kleiner/leichter
Konstruktion	mehr Komponenten erforderlich, um die Wärme abzuleiten	weniger Komponenten erforderlich, um die Wärme abzuleiten
Wirkungsgrad	weniger effizient	effizienter
Bias-Schema	Ausgangsstrom fließt über 360° des Eingangssignals	Ausgangsstrom fließt irgendwo zwischen 180° und 360° des Eingangssignals

Tabelle 1: Unterschiede zwischen Verstärkern der Klasse A und der Klasse AB

bieten das höchste Maß an Fehlanpassungstoleranz, die erforderlich ist, wenn erhebliche HF-Pegel in den Verstärker reflektiert werden, ein häufiger Effekt bei vielen EMV-Antennen und anderen Wandlern. Außerdem sind Linearität und somit harmonische Verzerrungen bei Klasse-A-Verstärkern am besten.

Verstärker der Klasse AB kosten im Allgemeinen weniger und sind dank höherer Effizienz kleiner. Diese Verstärker sind auch viel besser für den Einsatz mit angepassten Lasten geeignet. Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Unterschiede zwischen Verstärkern der Klasse A und der Klasse AB.

Viele Jahre lang waren Wanderfeldröhren-Verstärker (Traveling Wave Amplifier, TWTA) die einzigen, die bei der EMV-Empfindlichkeitsprüfung eine breite Frequenzabdeckung und hohe Leistung boten. TWTAs sind in den meisten Fällen kostengünstigere Lösungen, aber sie haben auch Nachteile. Aufgrund ihrer einzigartigen Eigenschaften können sie in einem gepulsten Modus verwendet werden. Dadurch kann die erforderliche Durchschnittsleistung gesenkt und die Spitzenleistung maximiert werden, was zu einer weiteren Kostensenkung führt. Allerdings erzeugen TWTAs hohe Oberwellen, haben ein stärkeres Grundrauschen, längere Beschaffungszeiten, längere Reparaturzeiten und eine geringere Zuverlässigkeit als Festkörperverstärker. Einige fortschrittliche TWTAs kombinieren mehrere Röhren miteinander, um den Oberwellengehalt zu reduzieren und die Gesamtleistung zu erhöhen.

Eine weitere Lösung, um Oberwellen zu reduzieren, ist die Verwendung von Filtern am Verstärkerausgang. Es ist aber wichtig, zu bedenken, dass mit Filtern immer Verluste verbunden sind, die bei der Festlegung der Verstärkerleistung berücksichtigt werden müssen. Das SWR in Verbindung mit Filtern ist eine weitere Überlegung.

Die Schwierigkeiten, die mit Impuls-TWT-Verstärkern verbunden sind, können durch eine Alternative umgangen werden: Festkörper-Impulsverstärker bieten hohe HF-Leistungspegel, die mit denen von TWTAs konkurrieren können. Moderne Festkörper-Pulsverstärker bedienen verschiedene Frequenzbereiche und Ausgangsleistungen, um verschiedene Normen und Benutzeranforderungen zu erfüllen. Diese Festkörper-Pulsverstärker bieten höhere Zuverlässigkeit, bessere Fehlanpassungstoleranz, eine viel bessere harmonische Verzerrung und eine bessere MTBF (Mean Time Between Failure) als TWTAs.

Wenn ein Einbandverstärker für das gewünschte Frequenzband nicht verfügbar ist, kann ein Zweibandverstärker eine attraktive Lösung sein. Ein Zweibandverstärker besteht aus zwei Verstärkern, die in einer Box kombiniert sind bei einer einzigen E/A-Schnittstelle, einem HF-Eingang und -Ausgang und zwei Bandbreiten, die den beiden Verstärkern entsprechen (Bild 7). ◄

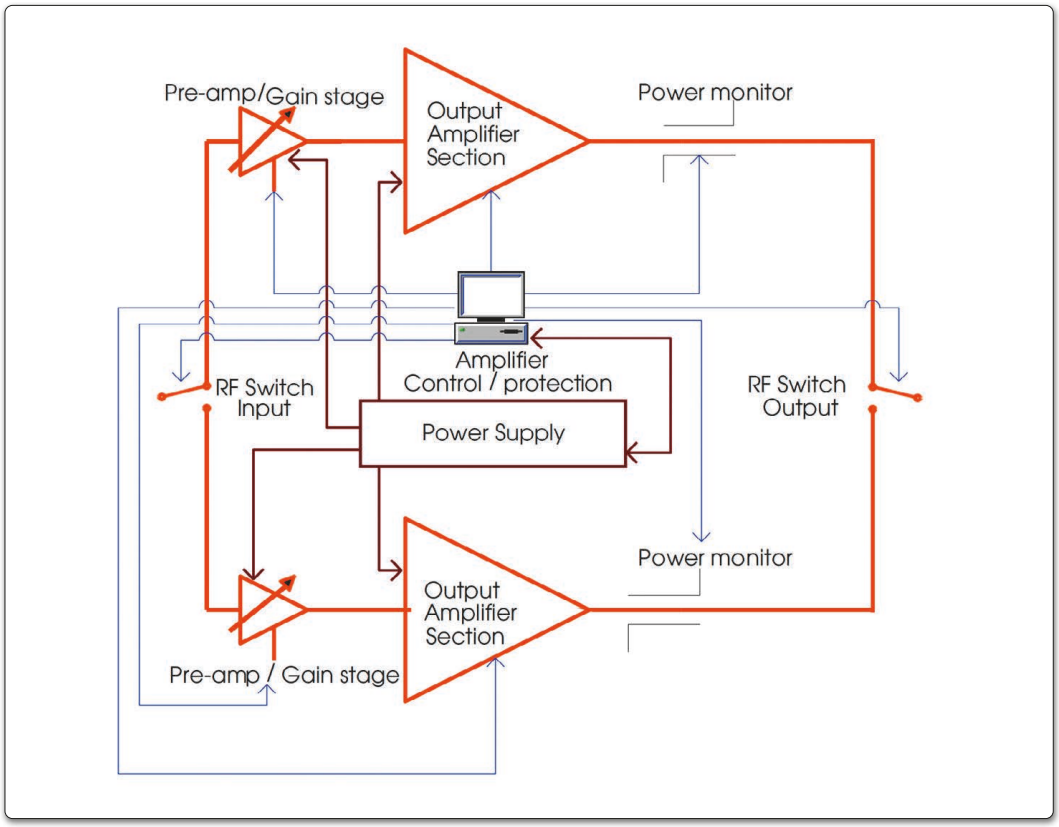


Bild 7: Struktur eines Zweibandverstärkers