

TECHNOLOGIEN UND SCHLÜSSELÜBERLEGUNGEN FÜR DIE ENTWICKLUNG VON BREITBANDIGEN HOCHLEISTUNGS-MIKROWELLENVERSTÄRKERN IN HALBLEITERTECHNIK FÜR GESTRAHLTE STÖRFESTIGKEITSPRÜFUNGEN

N. D. du Toit, R. Thomas, J. H. Smith, F. N. Schirk, J. A. Mogel.

AR RF/Microwave Instrumentation, USA.

Kontakt:

emv GmbH
Wallbergstraße 7
82024 Taufkirchen
089 614171-0
info@emvgmbh.de
www.emvgmbh.de

Anforderungen an HF-Verstärker basierend auf EMV-

Normen

EMV-Normen werden erstellt, um die elektromagnetische Verträglichkeit von elektronischen Geräten zu prüfen. Die Normen müssen nicht nur die Prüfschärfegrade und -anforderungen bestimmen, sondern auch die Anforderungen an den Prüfaufbau und die Messgeräte. In unterschiedlichen Märkten existieren unterschiedliche potentielle HF-Bedrohungen, meist schmalbandige Störer. Angesichts der Vielzahl möglicher Bedrohungen ist es schwierig zu definieren, welche dieser schmalen Bänder geprüft werden müssen. Deshalb definieren die meisten Normen einen breiteren Frequenzbereich, um alle möglichen Störfrequenzen zu erfassen:

- Kommerziell / IEC / EN: 150 kHz bis 6 GHz
- Militär / MIL-STD-461: 10 kHz bis 18 oder 40 GHz
- Luftfahrt elektronik / DO-160: 10 kHz bis 18 GHz
- Telekom / Bell Core GR-1089: 10 kHz bis 10 GHz
- Automobilelektronik: 1 MHz bis 18 GHz

Das nächste Problem bei der Definition der Normen besteht in der Festlegung des Pegels, dem ein Produkt ausgesetzt werden muss. Der Prüfpegel der elektrischen Feldstärke wird in V/m angegeben. Er basiert auf tatsächlichen Feldmessungen, vorangegangenen Ausfällen oder potenziellen zukünftigen Gefahren. Auch auf den Prüfpegel wird, basierend auf der Produkthanwendung und den Umgebungsbedingungen eine Sicherheitsmarge angewandt. Je nach geforderter Feldstärke wird eine bestimmte Leistung benötigt, um mit einer Antenne oder einem Koppelmedium die Anforderungen zu erfüllen.

- Kommerziell / IEC / EN: 30 V/m → 1 kW bei 80 MHz

- Militär / MIL-STD-461: 200 V/m → 10kW bei 10 kHz
- Luftfahrtelektronik / DO-160: 7,2 kV/m gepulst → kW - MWs
- Telekom / Bell Core GR-1089: 8,7 V/m → niedrige 100 Watt
- Automobilelektronik: 600 V/m gepulst → 1 kW

Im obigen Abschnitt sind die grundlegenden Anforderungen für die Prüfungen beschrieben. Es gibt jedoch noch weitere Rahmenbedingungen für die Prüfungen, die berücksichtigt werden müssen. Über die Jahre wurden diese Anforderungen, basierend auf den gemachten Erfahrungen, verfeinert. Fehlervermeidung und verbesserte Reproduzierbarkeit sind hierbei die Hauptziele der Normung und sollten auch die Ziele der Prüfeinrichtung sein. So können beispielsweise die Oberwellen der in den Prüfeinrichtungen verwendeten Leistungsverstärker zu einem Fehler bei der Erzeugung der elektromagnetischen Feldstärke beitragen und so unerwünschte Messfehler verursachen. Neuere Normen fordern eine Einschränkung der Oberwellen bei den verwendeten HF-Leistungsverstärkern.

Eine weitere Anforderung ist die Linearität des Verstärkers. Früher war es vielleicht akzeptabel, einen Verstärker im Grenzbereich der Verstärkerkennlinie zu betreiben, um das erforderliche elektrische Feld zu erreichen. Dies kann den Verstärker in die Kompression treiben. In der Kompression wird das Ausgangssignal verzerrt, was zu einem erhöhten Oberwellenanteil führt. Verzerrungen als Folge der in diesem Verstärkungsbereich nicht linearen Charakteristik verursachten Messergebnisse, die nicht reproduzierbar sind. Aus diesem Grund sollte der Verstärker nur im linearen Bereich verwendet werden.

Neben diesen Aspekten ist die wichtigste Anforderung an einen HF-Verstärker die Robustheit, und zwar sowohl physisch als auch elektrisch. Der normale EMV-Laborbetrieb ist für den Verstärker verschleißend, da die für die Generierung des E-Feldes erforderlichen Antennen und Lasten erhebliche Fehlanpassungen aufweisen. Diese führen zu hohen Leistungsreflektionen. Ein normaler Verstärker (Klasse AB) wäre nicht in der Lage, diese erhöhte Fehlanpassung ohne Schaden zu verkraften und würde ohne Schutzschaltung ausfallen. Ein Schutzschaltkreis, der bei Fehlanpassung zurückschaltet, ist jedoch im Messbetrieb nicht ideal, wenn ein vorgegebenes elektromagnetisches Feld von der Antenne abgestrahlt werden soll. Ideal ist der Verstärkertyp Klasse A, der nicht zurückregelt und jeglicher Fehlanpassung widerstehen kann. Dadurch wird die nutzbare Leistung des Verstärkers erhöht und der Benutzer spart zusätzliche Kosten, die durch Ausfallzeiten und Reparaturen entstehen würden.

Die Vorteile von Halbleiterverstärkern gegenüber

Röhrenverstärkern

In der Vergangenheit war der Wanderfeldröhrenverstärker (TWT) mit der Fähigkeit, sehr hohe Leistung mit extremer Bandbreite zu einem vernünftigen Preis zu liefern, die Antwort auf die Bedürfnisse der EMV-Prüfingenieure. Noch heute wählen viele Labors TWT-Verstärker für ihre EMV-Prüfplätze, obwohl Halbleiter-Verstärker einen immer größeren Marktanteil eingenommen haben. Über letzten die drei Jahrzehnte wurden die Eigenschaften von Halbleiterverstärkern hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit, Haltbarkeit,

Oberwellenunterdrückung, Linearität und Fehlanpassungstoleranz kontinuierlich verbessert, so dass TWT-Verstärker hier nicht mehr heranreichen.

Transistortechnologien

Seit kurzem stehen Entwicklern von HF- und Mikrowellenverstärkern mehrere neue Transistor-Technologien zur Verfügung, die eine höhere Leistungsdichte und gesteigerte Bandbreite versprechen. Dies geschieht jedoch nicht ohne Einschränkungen. Der folgende Abschnitt gibt eine Übersicht über neue Transistortechnologien mit typischen Leistungsbereichen und Bandbreiten.

Die Entwicklung der drahtlosen Kommunikation hat die Dynamik der Entwicklung von Leistungstransistor-Technologie verändert. Anwendungen mit großen Stückzahlen zogen neues Kapital für die Entwicklung von Transistoren an, die höhere Leistungen mit niedrigeren Kosten verbinden. Die Vorteile für Nicht-Telekom-Anwendungen bestehen nur teilweise, da viele Geräte mit schmalen Bandbreiten und auf die diese gewerblichen Telekom-Systeme zugeschnitten sind.

Die beiden wichtigsten Bereiche bei der Bauteileauswahl sind Technologie und Gehäuse der aktiven Bauteile. Obwohl diese beiden Aspekte mit einander verknüpft sind, kann festgestellt werden, dass die aktive Bauelemente-Technologie den größten Einfluss auf die Gesamtleistungsfähigkeit (Gewinn und Frequenzbereich) und die Gehäusetechnologie wiederum die größte Wirkung auf die Kosten hat. Die Leistungsverträglichkeit wird von beiden Aspekten beeinflusst. Obwohl die Art des Gehäuses je nach beabsichtigtem Frequenzbereich unterschiedlich ist, bestehen die Hauptprobleme bei der Gehäuseentwicklung meist in der Materialauswahl bei der Wärmeübertragung. Bei GHz-Frequenzen bereiten die Gehäuse durch parasitäre Einflüsse Probleme bzgl. der Bandbreite.

Bei der Leistungshalbleitertechnologie sind in der Entwicklung und Applikation Silizium-LDMOS und Siliziumkarbid (SiC) weit verbreitet. Typische Anwendungen für Siliziumkarbid-Transistoren liegen im HF-Frequenzbereich (< 3 GHz) und für Galliumnitrid (GaN) sowie High-Electron-Mobility-Transistoren (HEMTs) im unteren Mikrowellenbereich. LDMOS-Transistoren wurden auf Kosten von doppelpoligen Silizium-Transistoren und MSOFETS immer populärer. GaN HEMTs bieten erheblich höhere Leistungsdichte als Galliumarsenid (GaAs)-Bauelemente bei Frequenzen unter 10 GHz. SiC-Transistoren sind leistungsfähiger im traditionellen Grenzfrequenzbereich zwischen Silizium-Transistoren und GaAs-Transistoren. GaAs pseudomorphe HEMTs (pHEMTs) und Indiumphosphid (InP) HEMTs dominieren weiterhin den Frequenzbereich der höheren Mikrowellen- (10 - 30 GHz) und Millimeter-Wellen (> 30 GHz).

Bei HF-Frequenzen ermöglichen Silizium-LDMOS-Transistoren eine revolutionäre Veränderung im Bereich des Gehäuses. Die Gerätestruktur sieht vor, dass sich die Anschlüsse auf der Rückseite befinden und das Gehäuse mechanisch mit der Masse verbunden werden kann. Durch eine geschickte Auswahl der Materialien und Herstellungsprozesse wurde es möglich, in manchen Fällen einen fast reinen Kupfer-Flansch zu verwenden und so im Vergleich zu traditionellen Geräten erhebliche Verbesserungen der Wärmeableitung zu erreichen. Bei traditionellen Transistoren werden isolierende Keramik und ein weniger leitfähiger Flansch zwischen dem

Transistorgehäuse und dem Kühlkörper angebracht. Aus Plastik gegossene Gehäuse stellen für die mit den LDMOS-Geräten verbundenen Volumen-Märkte eine wirtschaftliche Alternative dar und ersetzen Keramik-Gehäuse, wodurch die Kosten deutlich gesenkt werden können.

Verbesserungen an Gehäusen der Transistoren ohne LDMOS-Technologie waren eher evolutionärer Natur. Es handelt sich größtenteils um eine geringe Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit der Flanschmaterialien und Verbesserungen für höhere Frequenzbereiche.

Im Bereich der niedrigeren Mikrowellen hat die Entwicklung von GaN HEMTs es ermöglicht, die bisherigen Grenzen der Leistungsdichte zu überschreiten (Abbildung 1). Dabei konnten Störeffekte, die normalerweise bei großen GaAs-Geräten entstehen, reduziert werden und viele Probleme, die mit der Breitbandanpassung von Hochleistungstransistoren einhergehen, behoben werden. Diese Erhöhung der verfügbaren Leistung führt zu einer Steigerung der Komplexität der Entwicklung von Leistungsverstärkern. Typische Problemzonen sind das Wärmemanagement und die Großsignal-Transistor-Charakterisierung. Grund hierfür ist, dass es nur selten möglich ist, GaN HEMTs in der Betriebsart Klasse A unter Vorspannung zu setzen, ohne die Wärmebeschränkungen zu überschreiten oder den Transistor zu beschädigen oder zu schwächen. Eine Generation lang konnten sich Mikrowellen-Ingenieure auf das klassische Transistor-Kleinsignal-Design verlassen und S-Parameter und lineare Simulatoren für die Entwicklung von GaAs-basierten Breitbandverstärkern der Klasse A verwenden. Vielen fällt es nun schwer, komplexes nicht lineares Verhalten und Großsignal-Designtechniken zu verstehen. Diese werden benötigt, um den größtmöglichen Strom vom GaN HEMT auf sichere und effiziente Weise zu extrahieren und zugleich die Haltbarkeit und die Lasttoleranz zu erreichen, die man von den entsprechenden GaAs gewohnt war.

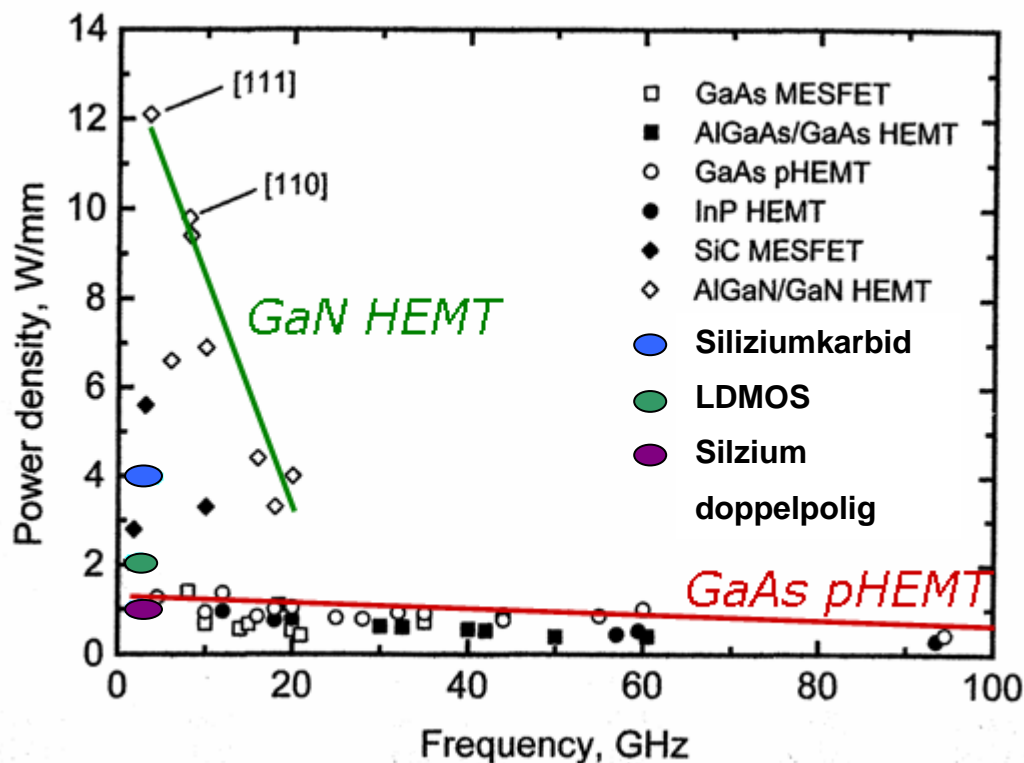


Abbildung 1 – Ausgangs-Leistungsdichte in Abhängigkeit vom Frequenzbereich¹ für verschiedene Feldeffekttransistor(FET)-Technologien.

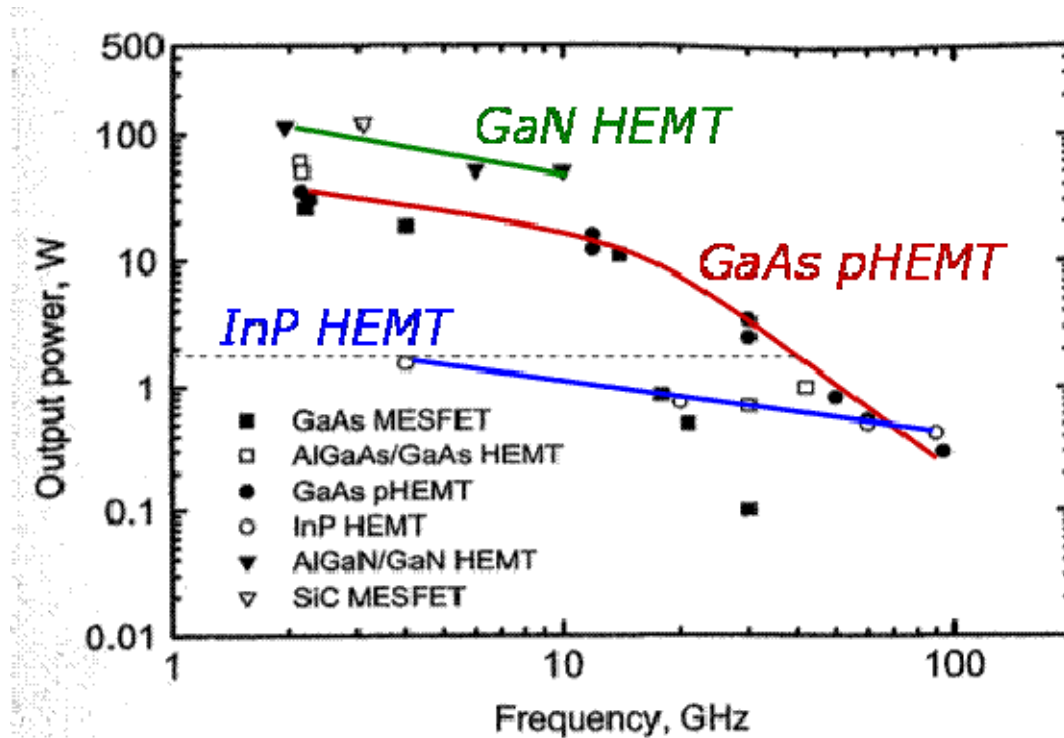


Abbildung 2 - Ausgangsleistung in Abhängigkeit von der Frequenz¹ für verschiedene Transistor (FET)-Technologien.

Moderne Transistorentwicklungen schließen fast immer eine Erhöhung der Leistungsdichte mit ein. Dies wird normalerweise als Verbesserung herausgestellt, da es mit einer verkleinerten Abmessung einhergeht, welche den Betrieb bei höherer Frequenz und bei höherer Leistung ermöglicht. Es kann sich jedoch für Anwendungen mit sehr hohen Leistungen, welche die Wärmefähigkeiten der Geräte überschreiten, auch als Nachteil erweisen. In diesem Fall geht es darum, einen Weg zu finden, wie man mehr Wärme von einer kleineren Fläche ableiten kann. Dies kann unter anderem durch verbesserte Kühlkörpertechnologie erreicht werden, was jedoch oft mit kostspieliger Hardware verbunden ist. Für manche Anwendungen sind Flüssigkeitskühlungen eine effektivere und kostengünstigere Alternative.

Hauptüberlegungen bei der Entwicklung von Verstärkern

Da die mit dem Verstärker verbundenen Antennen im EMV-Prüfumfeld oft hohe VSWR-Werte haben, müssen bei der Entwicklung von Verstärkern für EMV-Prüfanwendungen einige Besonderheiten beachtet werden. Die Verstärker müssen in der Lage sein, die volle Leistung in eine Last einzuspeisen unabhängig vom VSWR, vom Kurzschluss bis hin zum Leerlauf. Meist ist es dieser Aspekt, der dem Ingenieur ernsthafte Probleme bereitet, da die Bandbreite des Verstärkers üblicherweise viel zu groß ist, um die Anwendung von Zirkulatoren oder

anderen Schutzgeräten in Betracht zu ziehen. Das Problem wird von den neuen Transistor-Technologien zusätzlich verschärft. Deren Beschränkungen im maximalen Temperaturbereich hindern den Ingenieur daran, die Transistoren so mit einer Vorspannung zu beaufschlagen, wie es für eine maximale Fehlanpassung am idealsten wäre.

Jeder Transistor hat charakteristische Eingangs- und Ausgangsimpedanzen, die sowohl durch das verwendete Material als auch durch dessen Struktur bestimmt werden. Hinzu kommen der unerwünschte Störleitwert und Blindleitwert, bedingt durch die nötigen Verbindungen auf dem Chip, und das den Chip umschließende Gehäuse. Diese Werte summieren sich zu einer Gesamteingangs- und Ausgangsimpedanz, die je nach Frequenz, Vorspannung und Betriebsbedingungen variiert. Diese Betriebsparameter müssen bei allen Frequenzen gut an die gegebene Vorspannungs- und Betriebsbedingungen angepasst werden. Ist die richtige Vorspannung für den Einsatz in einem Produkt gefunden, so besteht die Verantwortung des Entwicklers darin, eine Schaltung so zu entwerfen, dass ein optimaler Impedanzabgleich für den Eingang und Ausgang des Transistors erreicht wird. Hierdurch wird die maximale Leistungsübertragung durch die Kontrolle von Spannung, Stromstärke und relativer Phase ermöglicht.

Traditionell wird dies durch die Messung der S-Parameter des entwickelten Produkts erreicht. Diese setzen sich aus den vorwärts und rückwärts laufenden Spannungs- und Stromwellen eines Messsignals kleiner Leistung der Geräteein- und -ausgänge zusammen. Einfache mathematische Kalkulationen ermöglichen es, den Betrag und die Phase der Wellenformen zur charakteristischen Gesamtipedanz des Geräts in Abhängigkeit von Frequenz mit vorgegebener Betriebsvorspannung zu berechnen.

Mit dem charakteristischen Verhalten der gebräuchlichen HF- und Mikrowellen-Transistoren funktionierte dieses Verfahren recht gut, da sie ein deutlich nicht-lineares Ansprechverhalten aufweisen. Bei kleinen Signalen bis nahe an die Gerätehöchstleistung verhalten sich diese Transistoren sehr linear, bevor sie dann scharf in die Sättigung übergehen. Jahrelang mussten nur HF- und Mikrowellen-Ingenieure, die hoch-effiziente Leistungsverstärker entwarfen, nicht-lineare Effekte besonders berücksichtigen. Selbst hier war ein auf S-Parametern basierendes Design meist ausreichend.

Leider weisen viele hier beschriebene Geräte eine "geringe Nichtlinearität" auf. Dies bedeutet, dass der Transistor langsam von einem linearen Verhalten bei kleinen Signalen zur Sättigung übergeht, unter den unterschiedlichen vorgegebenen Ansteuerungsbedingungen (Abbildung). Dies macht es fast unmöglich, ideale Anpassungsbedingungen allein auf der Basis von S-Parametern zu finden. Viele Ingenieure, die an die Arbeit mit einer traditionelleren Gerätetechnologie gewöhnt sind, müssen sich an neue Messverfahren gewöhnen. Anstatt direkt mit S-Parametern oder linearen Schaltkreis-Simulationen zu arbeiten, müssen hier komplexe nicht-lineare Gerätemodelle und lang vergessene Methoden angewendet werden, um die idealen Anpassungsbedingungen für die Extrahierung maximaler Leistung oder Effizienz dieser neuartigen Transistoren zu finden.

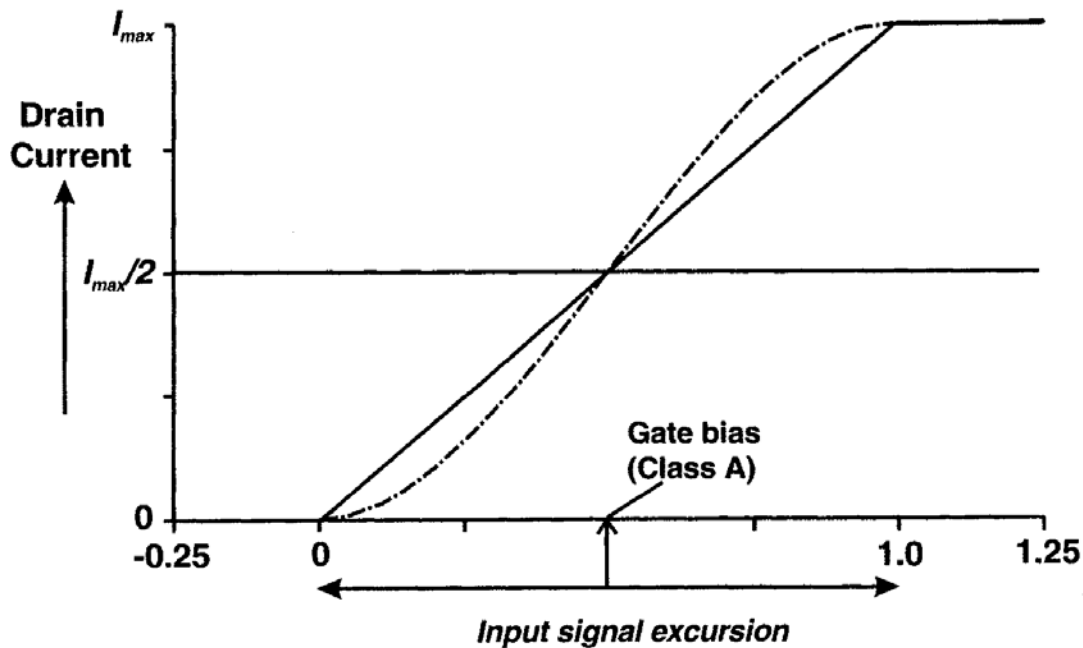


Abbildung 3 – Starke und schwache Nichtlinearität, bezogen auf einen Feldeffekt-Transistorⁱⁱ. Der nichtlineare Transistor (durchgezogene Linie) hat gut definierte Schaltpunkte mit einer völlig linearen Beziehung zwischen Drainstrom und Gatespannung von $I_D = 0$ bis I_{max} . Der schwach nichtlineare Transistor (gestrichelte Linie) hat schlecht definierte Schaltpunkte und ein allmähliches Abrollen in I_D von Vorspannung zu I_{max} .

Wärmeoptimierungen komplizieren den Entwicklungsprozess weiter, insbesondere für diejenigen, die Breitbandverstärker um diese neuen Transistor-Technologien herum entwerfen. Wärmewiderstände und Sperrschicht-Temperaturbeschränkungen erlauben es, dem Ingenieur kaum, das Bauteil in einer wahren Betriebsart der Klasse A auf Vorspannung zu setzen. Leider können herkömmliche Techniken zur Beseitigung von Oberwellen, die immer dann entstehen, wenn ein Transistor mit großen Signalen betrieben wird, nicht in Multi-Oktav-Verstärkern angewendet werden, da die Oberwellen der niedrigeren Betriebsfrequenzen jetzt im Frequenzbereich liegen.

Man muss das Transistorverhalten sorgsam unter den verschiedensten Vorspannungs- und Lastbedingungen untersuchen, um den idealen Kompromiss zwischen thermischer und elektrischer Leistung zu finden. Dies kann sehr zeitraubend sein und macht Entwicklungstechniken, nicht-lineare Modelle und Simulatoren erforderlich, mit deren Komplexität die meisten HF- und Mikrowellen-Ingenieure nicht vertraut sind. Der Spezialbereich der nichtlinearen Bauteilmodellierung, welcher seit langem von Ingenieuren, die an Hochleistungsverstärkern arbeiten, verwendet wird, gewinnt an Bedeutung. Viele Hersteller dieser neuen Transistorgeneration versuchen Simulations-Modelle anzubieten, mit deren Komplexität sie oftmals nicht vertraut sind. Manche Hersteller nehmen die Fachkenntnis von externen Firmen und Universitäts-Laboratorien, die auf nicht-lineare Bauteilmodellierung spezialisiert sind, in Anspruch. Andere bauen ihre eigenen internen Modellierungsfähigkeiten aus.

Leistungserhöhung durch das Zusammenschalten von Leistungstransistoren: Teiler und Combiner

Während TWT-Verstärker oft die gesamte erforderliche Leistung aus einer einzelnen Röhre ziehen, nutzen Halbleiter-Verstärker üblicherweise dutzende, wenn nicht hunderte von Transistoren. Dabei steht dem Entwickler eine große Vielfalt von leistungsteilenden und -kombinierenden Technologien und Architekturen zur Verfügung. Es kann entweder die Last zwischen verschiedenen Transistorenkombinationen geteilt oder die von den einzelnen Transistoren erzeugte Leistung zusammengeführt werden. Im folgenden Abschnitt werden verschiedene Verschaltungs-Techniken, die Vorteile und Nachteile verschiedener Architekturen und Anwendungen für Richtkoppler diskutiert.

Anforderungen für Ausgangsleistungen geben vor, dass eine bestimmte Anzahl von Transistoren die Gesamtleistung erzeugen muss. Bei Anforderungen an die Verstärkung wird oft vorgegeben, dass es mehrere Verstärkerstufen gibt, von denen jede einen bestimmten Prozentsatz der Gesamtverstärkung liefern muss. Um dieses Ziel zu erreichen, werden verschiedenste Kombinationen von Leistungsteilern, Kopplern und Leistungscombinern verwendet.

Teiler und Combiner können anhand vieler Unterscheidungsmerkmale klassifiziert oder unterschieden werden, wie z.B. resonant gegen nicht-resonant, binär gegen N-Wege und Leistungs- oder Hohlleiter-basiert oder räumliche Designs. Koppler werden oft als Richtkoppler oder -teiler bezeichnet. Die meisten großen Leistungsverstärker verwenden eine Kombination von Teilern, Richtkopplern und Combinern.

Die Bestimmung der richtigen Phasenlage von Combinern ist bei der Entwicklung von Verstärkern von besonderer Bedeutung. Viele Combiner-Designs bieten eine Phasenbeziehung von 90° oder 180° zwischen den Ausgängen. In diesem Fall ist es nötig, Splitter zu integrieren, um am Eingang die gewünschte Phasenbeziehung bereitzustellen.

Resonante Strukturen sind von einem Hohlraumresonator bzw. einer geometrischen Struktur abhängig, die bei einer bestimmte Frequenz oder einem Vielfachen dieser Frequenz in Resonanz kommen. Diese sind von Natur aus schmalbandig und daher für die Entwicklung von Breitbandverstärkern nur bedingt nutzbar. Alle hier vorgestellten Teiler- und Combiner-Strukturen können als nicht-resonante Schaltungen entworfen werden und ermöglichen breitbandige Anwendungen.

Binäre Teiler und Combiner sind Netzwerke mit drei Anschlüssen, in denen die Leistung gleichmäßig zwischen zwei der drei Anschlüsse geteilt (oder zusammengeführt) wird. Im Fall von verlustfreien Netzwerken können diese unendlich kaskadiert werden, so dass beliebige Kombinationen von 2^N -getrennten oder -kombinierten (im Folgenden als "gekoppelte" bezeichnet) Ports erreicht werden können. In der Praxis erreicht man bei der Verwendung von Komponenten mit einer endlichen Verlustleistung einen Punkt mit geringer

Reflexionsleistung, bei dem der Verlust jeder Stufe die gewonnene Leistung übersteigt. Vorausgesetzt, dass die Leistungstransistoren keine aktiven oder anisotropen Materialien enthalten, zeigt die Netzwerktheorie, dass es unmöglich wäre, einen binären Teiler oder Combiner herzustellen, der auf allen Ein- und Ausgängen sowohl verlustfrei als auch ideal angepasst istⁱⁱⁱ.

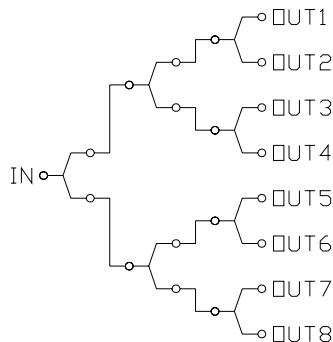


Abbildung 4 - Kaskadierte binäre Teiler

Im Jahr 1960 präsentierte Ernest Wilkinson^{iv} einen hybriden N-Wege-Leistungsteiler, der aufgrund der Komplexität der Konstruktion für Mikrowellenfrequenzen meist in einer $N=2$ -Form auftritt. Ein verlustfreies 3-Port-Netzwerk mit durchweg angepassten Ein- und Ausgängen erscheint zunächst als Ausnahme von der Regel. Eine Analyse der Streuungsparameter deckt auf, dass dies tatsächlich kein verlustfreies Netzwerk ist.ⁱⁱⁱ

N-Wege-Teiler und Combiner haben den Vorteil, dass sie nicht auf eine bestimmte (2^N) Anzahl von Anschlüssen beschränkt sind und aufgrund ihrer einstufigen Natur einen viel niedrigeren Verlust vorweisen als kaskadierte Strukturen für hohe Anschlussanzahlen. Wie bereits angesprochen ist der Wilkinson Stromteiler einer der bekanntesten N-Wege-Strukturen. Mit Ausnahme einiger Anwendungen für niedrige Frequenzen ist es jedoch schwer, einen Wilkinson-Teiler mit mehr als zwei Ausgängen zu finden.

Sowohl Zwei- als auch N-Wege, resonante und nicht-resonante Teiler und Combiner können unter Verwendung von planaren Schaltkreisen, Koaxialkabeln, Hohlleitern oder räumlicher Strukturen hergestellt werden. Rahmenbedingungen wie die Einfügedämpfung, Leistung oder Größe führen dazu, dass die eine Technologie gegenüber der anderen bevorzugt wird. Bestimmte Architekturen beschränken die Auswahlmöglichkeiten, wie dies z.B. bei den radialen N-Wege-Combinern der Fall ist. Koaxiale Combiner mit Ferritkernen werden häufig für Breitbandanwendungen unter 500 MHz verwendet.

Es ist immer erstrebenswert, ein gewisses Maß an Isolierung zwischen den gekoppelten Anschlüssen jeglicher Leistungsteiler oder -Combiner zu haben. Dies wird meist durch Widerstände erreicht, die zwischen den N-Ausgängen oder Eingängen eines Teilers oder Combiners angebracht werden. Technische Beschränkungen machen es oft unmöglich, diese Isolierungswiderstände direkt in die Leistungs-Combiner zu integrieren. Dies gilt insbesondere für Mikrowellenverstärker. Es ist daher oftmals üblich, auf die Isolierung von Leistungs-Combinern zu verzichten und diese nur im Teiler anzubringen.

Koppler sind oft direktional gekoppelte Netzwerke mit vier Anschlüssen und können in Leistungsverstärkern entweder als Leistungsteiler oder -combiner bzw. zur Überwachung der Ausgangsleistung verwendet werden. Im Fall von Leistungsteilung und -kombination wird die Leistung normalerweise zu gleichen Teilen zwischen zwei Koppleranschlüssen geteilt, wobei das Signal auf den beiden Anschlüssen oft 90° oder 180° zueinander phasenverschoben ist. Dies bietet viele Vorteile in Bezug auf Verbesserung von VSWR, Schutz des Transistors vor schädlichen Lastbedingungen und einer konstanten Ladung der Vorspannungsschaltung. Für Leistungsmessungen kann der Koppler direkt mit vorwärts oder rückwärts gekoppelten Anschlüssen entworfen werden, die normalerweise einen kleinen Teil des den Koppler durchlaufenden Signals extrahieren. Diese Leistung, welche in oder aus dem Verstärker fließt, wird dann von einem externen HF-Leistungsmesskopf erfasst und kann zur Leistungssteuerung (Verstärkung) eines Leistungsverstärkers eingesetzt werden.

Schlussfolgerung: Ein Wechsel in der Design-Philosophie für Leistungsverstärker

Viele Jahre lang haben sich Entwickler von HF-Verstärkern auf Standard-Entwicklungstechniken verlassen, die nun bei der Anwendung neuerer Transistortechnologien versagen. Wärmebeschränkungen zwangen Ingenieure beim Einsatz dieser neuen Transistor-Technologien, die Transistoren mit reduzierter Vorspannung laufen zu lassen und führten so zu Oberwellen- und Anpassungsproblemen, welche die Leistung und Haltbarkeit der Schaltung beeinflussen. Die Modellierung und Simulation von nichtlinearen Transistoren wird schnell zum Schlüssel-Knowhow, um das Verhalten dieser neuen Transistoren zu verstehen.

-
- ⁱ F. Schwierz, "Modern Microwave Transistors: Theory, Design, and Performance," John Wiley & Sons, 2002.
ⁱⁱ S. C. Cripps, "RF Power Amplifiers for Wireless Communications," Artech House, 1999.
ⁱⁱⁱ D. M. Pozar, "Microwave Engineering," John Wiley & Sons, 1998.
^{iv} E. J. Wilkinson, "An N-Way Hybrid Power Divider", IRE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-8, pp. 116-118, Januar, 1960.