

# Die Grundlagen des Doherty-Verstärkers

Während der wirtschaftlichen Depression in den 30er Jahren des vorigen Jahrhunderts musste überall gespart werden. Auch die Rundfunkanstalten und die drahtlos arbeitenden Transatlantischen Telegraphengesellschaften waren davon nicht ausgenommen. HF-Leistungsstufen in Sendern sind nämlich sehr energiehungrige Stromfresser.

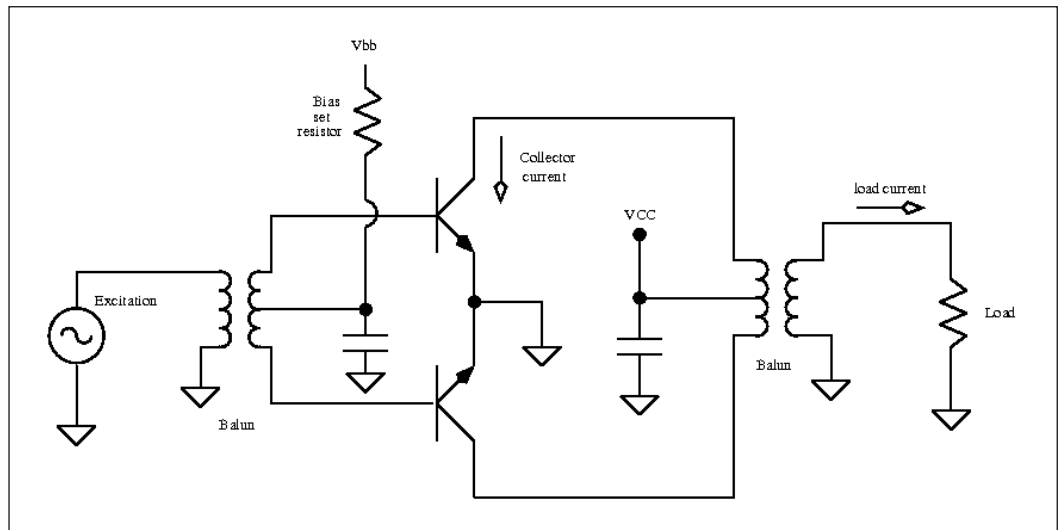


Bild 1: Prinzipschaltung der zur Verstärkersimulation verwendeten Gegentaktstufe

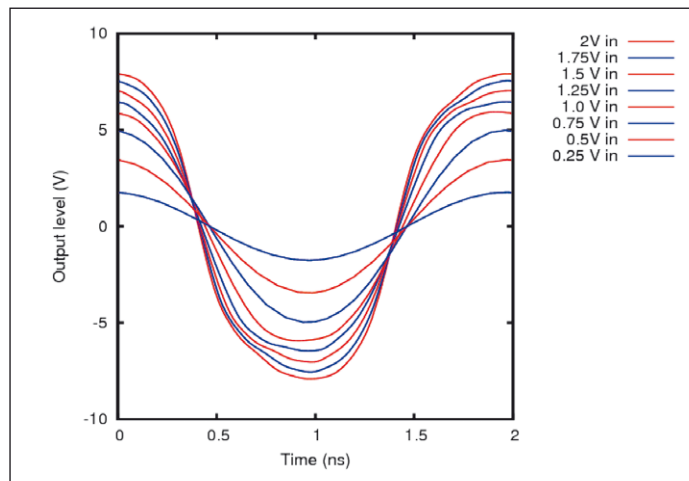


Bild 2: Ausgangssignal des AB-Verstärkers bei steigendem Eingangspegel

Da überwiegend AM-Zweiseitenbandmodulation verwendet wurde, konnten nur Verstärker in Klasse AB betrieben werden, die auf Grund ihres bescheidenen Wirkungsgrades von 35% jedoch einen großen Teil der zugeführten elektrischen Leistung lediglich in Wärme umwandelten. Bei Sendern mit Ausgangsleistungen zwischen 50 und 500 kW waren das bis zu 100 kW und 1 MW vergeudete Leistung, und die kostete unnötig eine Menge Geld. Dies war der Auslöser für William Doherty über eine Verstärkervariante mit höherem Wirkungsgrad nachzudenken. Das Problem

war, dass es sehr wohl in Klasse C arbeitende Leistungsverstärker mit wesentlich höherem Wirkungsgrad gab, die aber für die damals verwendete Amplitudenmodulation (AM oder Ein- bzw. Zweiseitenband mit unterdrücktem Träger) wegen ihres nichtlinearen Verhaltens nicht brauchbar waren.

Benötigt wurden lineare Verstärker, die dafür sorgten, dass die Signaltreue erhalten blieb. Die effizientesten Leistungsverstärker in Klasse C produzieren jedoch hohe Verzerrungen und eignen sich daher vor allem hervorragend für FM- und CW-

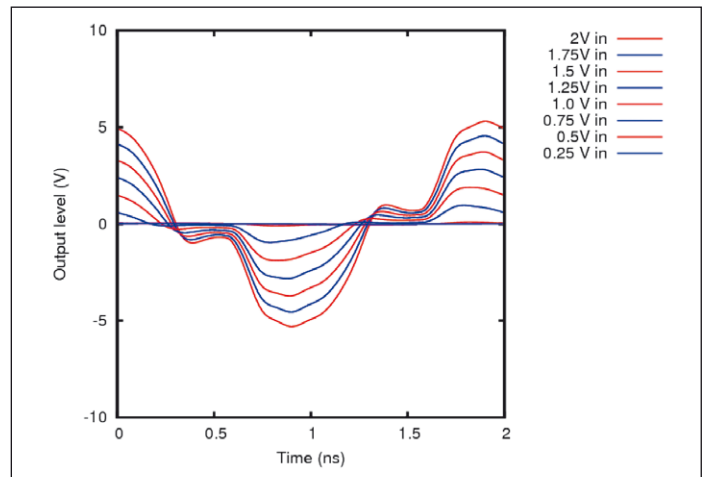


Bild 3: Klasse-C-Ausgangssignale für veränderliche Eingangssignalpegel

Unter Verwendung der Applikationsschrift „The Basics of the Doherty Amplifier“  
Bill Slade  
Orban Microwave Products  
www.orbanmicrowave.com

Betrieb. Die entscheidende Idee von Doherty war es daher, Verstärker in Klasse AB und C so zu verbinden, dass die Gesamtlinearität erhalten blieb aber der Wirkungsgrad von DC zu HF nahezu verdoppelt wurde.

Obwohl der Doherty-Verstärker über viele Jahre hinweg in Rundfunkstationen mit hoher Sendeleistung eingesetzt wurde, geriet er mit dem Aufkommen der digitalen Funkkommunikation mit ihren komplexen Modulationsverfahren mehr und mehr in Vergessenheit. OFDM- und CDMA-Signale haben während des größten Teils der Sendezeit eine niedrige Durchschnittsleistung, erzeugen aber zwischen durch Signalspitzen, die 6, 8 oder auch 12 dB Leistungsreserve erfordern, damit der Verstärker in Klasse AB bleibt.

Nur ein Klasse-AB-Verstärker nämlich kann bei diesen komplexen Modulationsverfahren die erforderliche Linearität gewährleisten, aber seine DC-RF-Umwandlungseffizienz ist nicht gut, weil der Verstärker die meiste Zeit weit unterhalb seines Kompressionspunktes arbeitet. Für eine Basisstation oder einen digitalen Fernsehsender bringt übermäßige Verlustleistungswärme keinen nützlichen Vorteil, sondern erhöht nur die Kosten. Bei einem tragbaren, batteriebetriebenen Gerät wirkt sich dieser niedrige Wirkungsgrad sehr negativ auf die gesamte Gesprächsdauer aus.

Dieser Artikel befasst sich zunächst mit dem Verhalten von Klasse-AB- und Klasse-C-Verstärkern und zeigt dann detailliert, wie diese beiden Verstärkertypen kombiniert werden können, um sowohl höheren Wirkungsgrad zu erreichen als auch die Signalqualität zu erhalten. Wer über diese grundlegende Einführung hinaus weitere Informationen benötigt findet am Ende des Artikels aufgelistete Referenzen.

### Klasse-AB- und Klasse-C-Verstärker

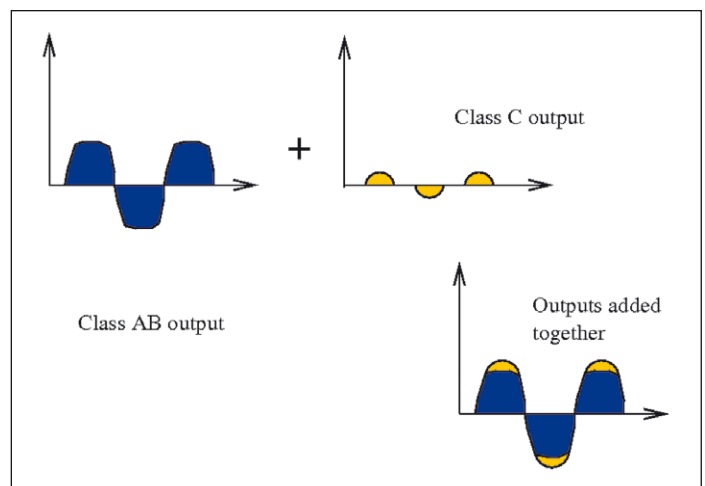
Für Simulationszwecke verwenden wir als Basis für unsere Ver-

stärkerstufen den transformatorgekoppelten Gegentaktverstärker aus [1], der in Bild 1 zu sehen ist.

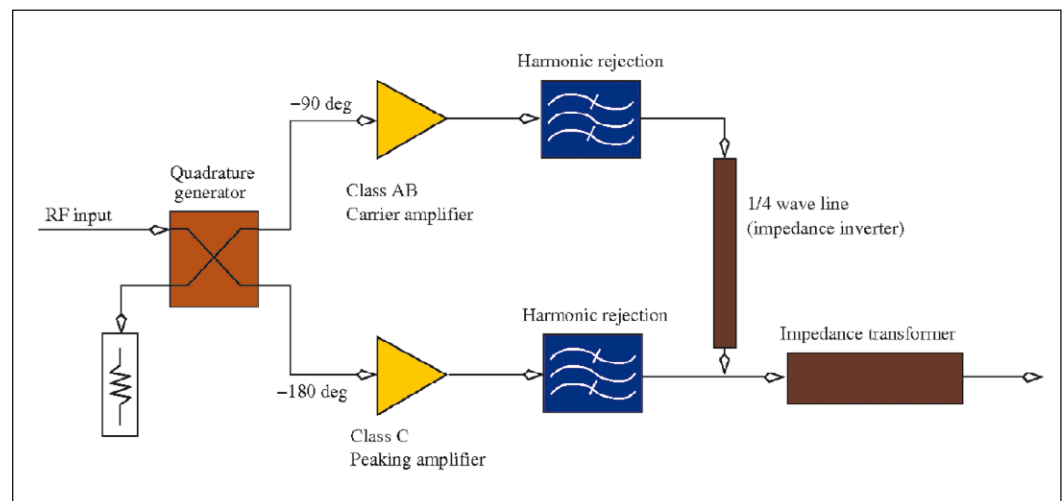
In der Praxis würde eine Implementation sicher etwas anders aussehen, aber die Transformatorkopplung und die separaten Basis- und Kollektorspannungseingänge sind bequeme Punkte zur Einstellung der Simulationsvariablen, z.B. Versorgungsspannungen, Eingangs- und Ausgangskopplung etc.

### Klasse AB-Verstärker

Der Verstärker in Bild 1 kann auf Klasse-AB-Betrieb durch Justieren der Basisspannung  $V_{bb}$  so eingestellt werden, dass nur ein kleiner Ruhestrom in



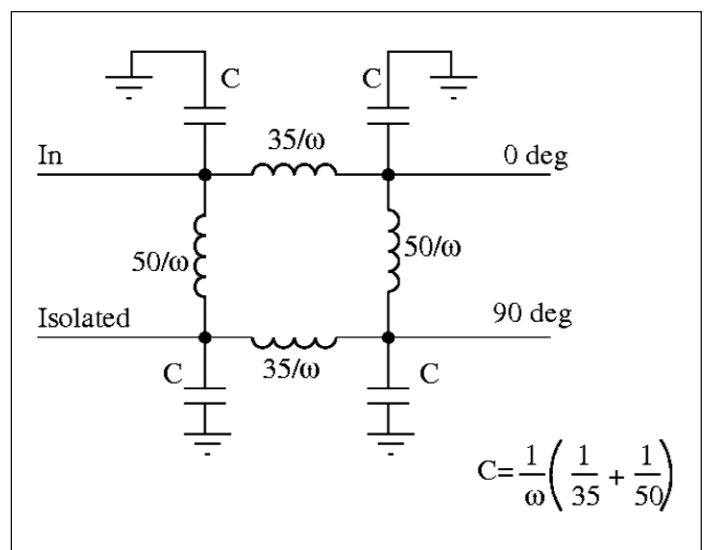
**Bild 4:** Das Doherty-Prinzip: Über dem Leistungswert, bei dem die Klasse-AB-Stufe in Kompression gerät, liefert die Klasse C-Stufe die fehlenden Spitzen und sorgt wieder für Signaltröe.



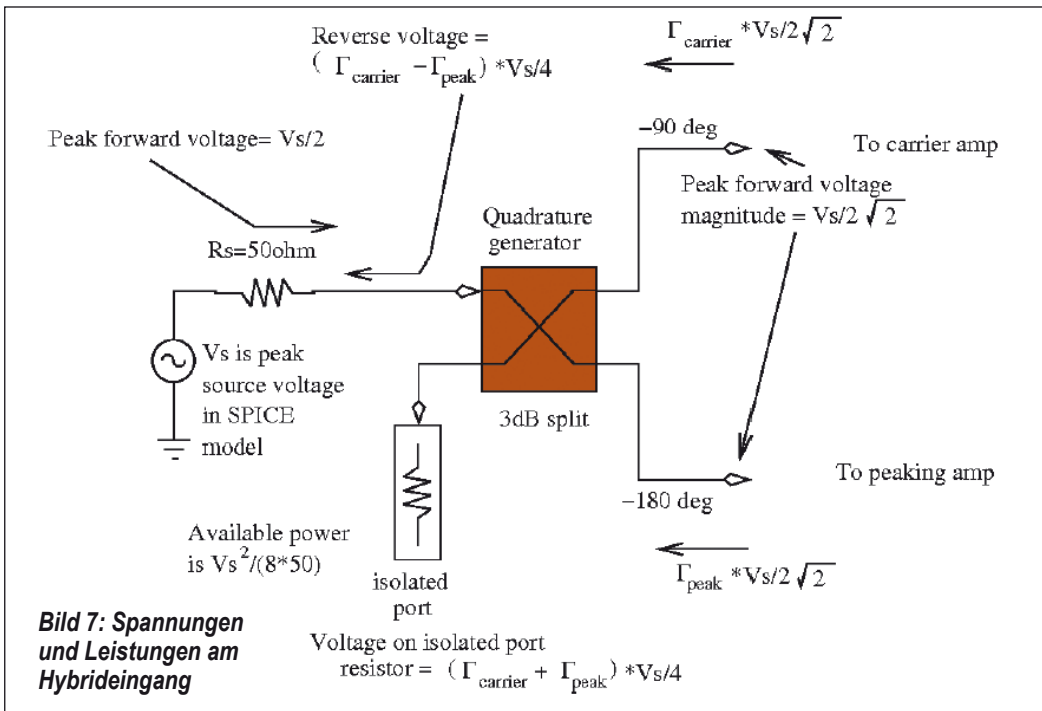
**Bild 5:** Prinzipielles Blockdiagramm des Doherty-Verstärkers, aus dem hervorgeht, wie die Ausgänge der beiden Verstärker kombiniert werden.

jeden Kollektor fließt (d.h. die Transistoren haben eine Vorspannung, die sie kurz vor dem Einschalten hält, solange kein Signal anliegt). Der Verstärker wurde für den Betrieb bei 500 MHz (beliebig ausgewählte Frequenz) konzipiert. Legt man ein sinusförmiges HF-Signal an den Eingang erhält man ein einwandfreies Sinussignal am Ausgang, bis der Verstärker beginnt zu komprimieren. Dies ist an den Verzerrungen in den größeren Ausgangssignalen in Bild 2 erkenntlich.

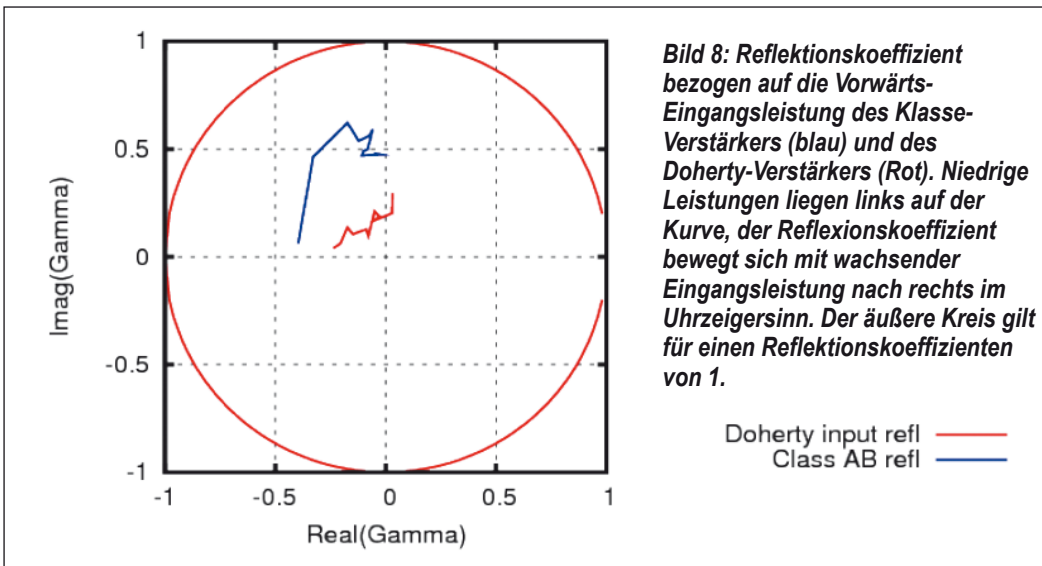
Bei niedrigen Eingangspegeln (0,25 bis 1 V) ist das Ausgangssignal des Verstärkers zur Höhe des Eingangssignals und seiner



**Bild 6:** 3-dB-Quadraturhybrid mit diskreten Komponenten.



**Bild 7: Spannungen und Leistungen am Hybrideingang**



linearen Verstärkung. Man sieht auch, dass das Signal sinusförmig ist, d.h. die Verzerrungen sind niedrig. Wenn der Eingangssignalpegel über 1 V ansteigt ist das Ausgangssignal nicht länger proportional zum Eingang und der Verstärker beginnt zu komprimieren.

**Klasse C**

Durch Modifizieren des Arbeitspunkts des Verstärkers in Bild 1 kann man einen Klasse-C-Verstärker herstellen. In diesem Fall haben die Transistoren eine Vorspannung unterhalb ihres

Abschaltendes. Bei kleinen Eingangssignalen liefert der Verstärker nur einen sehr geringen Kollektorstrom, "wacht" aber bei hohen Eingangssignalpegeln auf. Das typische Klasse-C-Verhalten zeigen die Signalverläufe des Verstärkerausgangssignals in Bild 3.

Wie man sieht erscheinen Signale am Ausgang, wenn die Eingangsspannung bei 0,75 V liegt. Das Signal hat viele Spitzen mit deutlichen Abschnitten in denen die Transistoren ausgeschaltet sind. Das Ausgangssignal ist praktisch immer verzerrt.

Wie verwendet man nun zwei verzerrende Verstärker, um ein Ausgangssignal mit brauchbarer Signaltreue zu produzieren?

**Das Doherty-Konzept**

Die grundlegende Idee des Konzepts besteht darin, den Klasse-C-Verstärker dazu zu verwenden, den Spitzenpegel des jeweiligen Eingangssignals zu liefern, sobald der Klasse-AB-Verstärker in Kompression geht. Unter einem gewissen Leistungspunkt ist also allein der Klasse-AB-Verstärker aktiv. Diese AB-Stufe wird auch als Carrier-Verstärker

bezeichnet. Solange das Signal nahe bei seinem durchschnittlichen Wert liegt ist die Klasse-C-Stufe inaktiv, der Carrier-Verstärker arbeitet jedoch nahe seinem Kompressionspunkt mit einem Wirkungsgrad von etwa 78%. Sobald Spitzen auftreten beginnt die Klasse-C-Stufe Leistung zu liefern, die der Klasse-AB-Verstärker nicht mehr abgeben kann (siehe Bild 4).

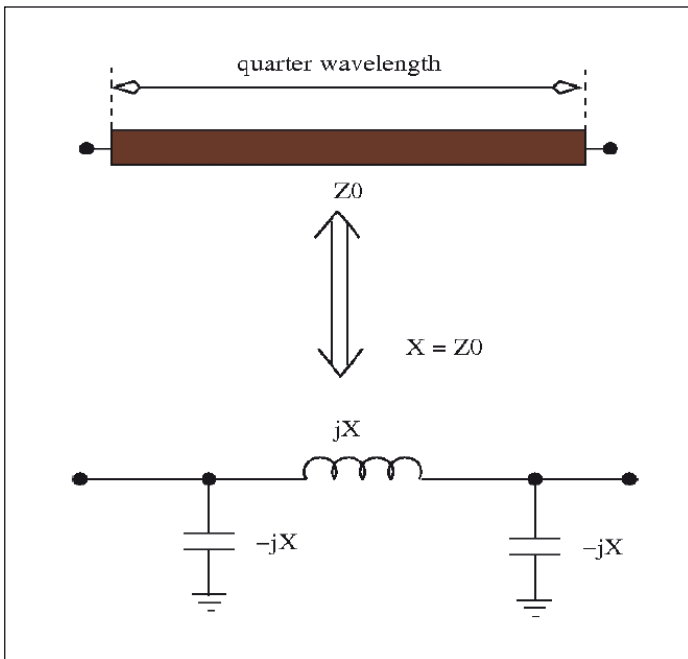
Soweit das relativ einfache Grundprinzip. Komplizierter sind dagegen die Verfahren, die verwendet werden, um das Eingangssignal angemessen zu teilen bzw. die beiden Ausgangssignale des Trägerverstärkers und des Spitzenverstärkers wieder so miteinander zu kombinieren, dass sich die Verstärker nicht gegenseitig belasten. Kommen wir jetzt zur Architektur des Doherty-Verstärkers (Bild 5).

Am Eingang des Verstärkers (links) in Bild 5, ist ein Quadraturhybrid vorgesehen, das zwei um 90° gegeneinander in der Phase verschobene Ausgangssignale erzeugt. Die 90-Grad-Verschiebung ist erforderlich, weil der Spitzenverstärker eine 90°-Verzögerung in Bezug auf den Carrier-Verstärker benötigt, um in gleicher Phase wie das Trägerverstärker-Ausgangssignal zu sein, das um 90° im Lambda/4-Impedanz-Inverter verzögert wird.

Wir haben damit die Träger- und Spitzenverstärker-Module, welche die Verstärkung liefern. Der Ausgang des Trägerverstärkers durchläuft eine Lambda/4-Leitung und wird mit dem Ausgang des Spitzenverstärkers und des Impedanztransformators verbunden. Nachfolgend werden einige Verstärkerkomponenten noch etwas näher vorgestellt.

**Eingangs-Phasenverschiebung und Leistungsteilung**

In den Simulationen wird der leistungsteilende Quadraturhybrid mit Hilfe von diskreten Komponenten aufgebaut, wie es Bild 6 zeigt.



**Bild 9:** Die Lambda/4-Leitung kann durch ein Pi-Netzwerk, das als Impedanzinverter arbeitet, ersetzt werden. Der Blindwiderstand der diskreten Komponenten muss dazu der charakteristischen Impedanz der Übertragungsleitung entsprechen.

Bei 500 MHz (der Frequenz unseres Verstärkers) haben die induktiven Bauelemente Werte von 11,14 nH und 15,92 nH für die 35- bzw. 50-Ohm-Zweige. Der Kondensator hat einen Wert von 15,46 pF. Der 0°-Grad-Arm des Hybrids (-90° in Bild 5) wird

mit dem Trägerverstärker verbunden, der 90°-Arm (-180° in Bild 5) geht zum Eingang des Spitzenverstärkers. Dies sorgt für die richtige Phasenlage, damit die Verbindung der Verstärkerausgänge korrekt arbeiten kann. Die Verwendung eines

Hybrid-Combiners mit angepasstem Eingang bewirkt, dass jeder von den Verstärkern reflektierte Leistungsanteil im wesentlichen zurück zur ohmschen Last am isolierten Port des Hybrids geleitet wird. Sofern die Reflektionskoeffizienten des Träger- und des Spitzenverstärkers ungefähr gleich sind, sieht die Eingangsquelle daher eine weitgehend angepasste Last. Darüber hinaus beeinflussen Reflektionen von einem Verstärkereingang nicht den anderen und zwar aufgrund der vom Hybrid bewirkten Entkopplung.

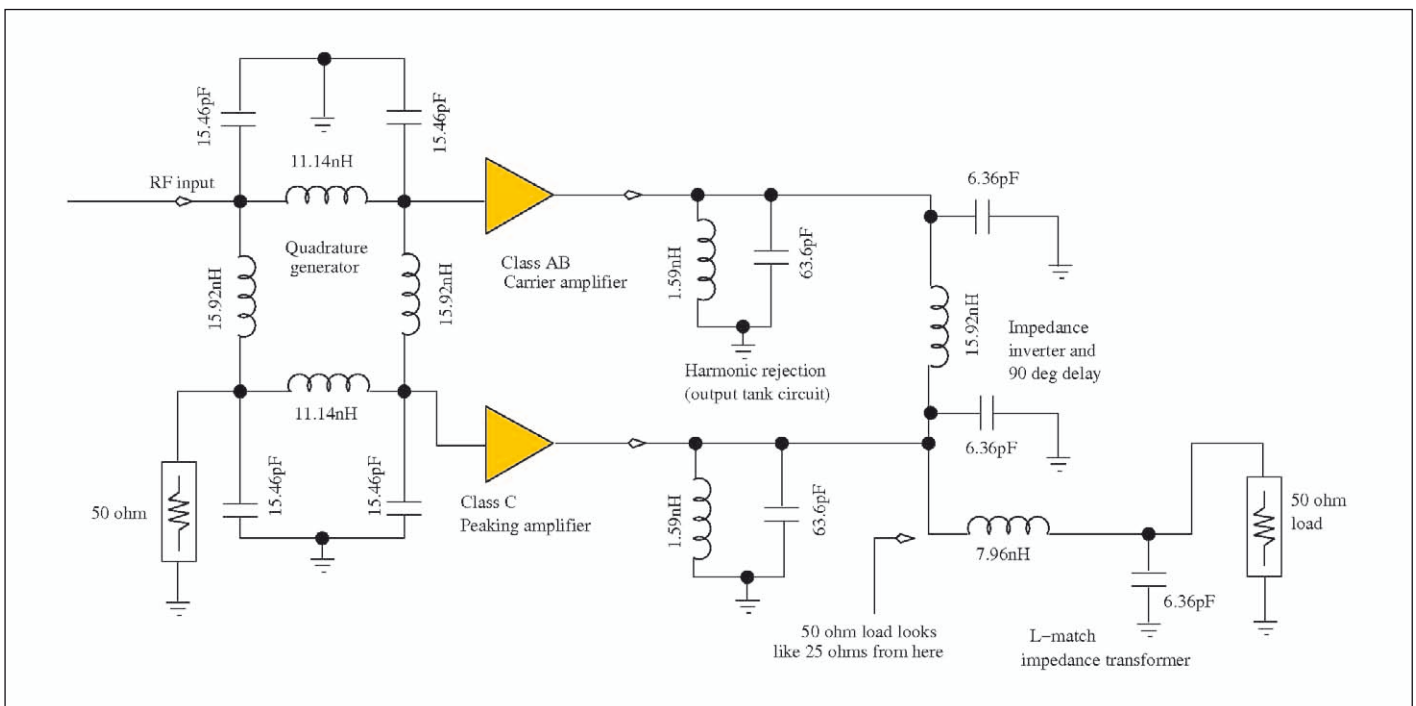
Die Größe des Reflektionskoeffizienten für die Klasse AB ändert sich erheblich in Abhängigkeit von der Eingangsleistung, während der Doherty bedeutend weniger Schwankungen anzeigt. Außerdem ist der Eingangs-Reflektionskoeffizient des Doherty-Verstärkers merklich kleiner als der Klasse-AB-Stufe, was auf eine bessere Eingangsanpassung über seinen vollen Leistungsbereich zurückzuführen ist.

### Verstärkerausgang

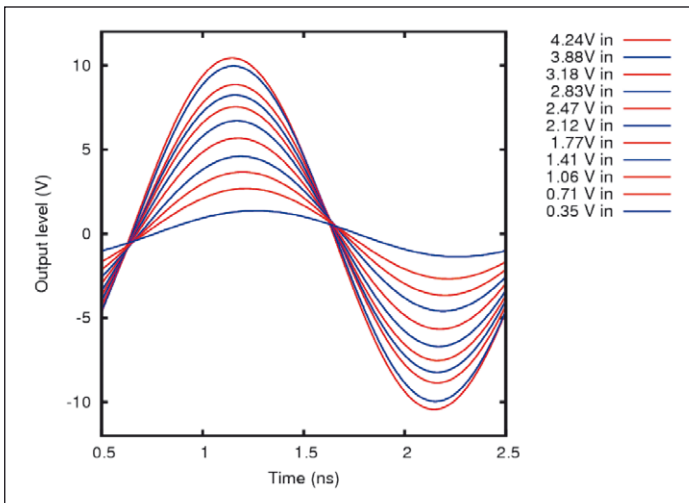
Zur Kombination der Verstärkerausgänge ist ein Impedanzin-

verter erforderlich, der den Trägerverstärker mit dem Ausgang des Spitzenverstärkers und dem Impedanztransformator am Ausgang verbindet. Der Impedanzinverter übt die Funktion der Lambda/4-Übertragungsleitung aus. Er führt keine Impedanzumwandlung aus, wenn er mit seiner charakteristischen Impedanz abgeschlossen ist. Andernfalls verwandelt er eine niedrige Impedanz an einem Ende in eine hohe Impedanz am anderen (und umgekehrt). In unseren Simulationen wird die 50-Ohm-Übertragungsleitung in Bild 5 durch ein äquivalentes Netzwerk aus diskreten Bauteilen ersetzt, die ein PI-Filter bilden (Bild 9).

Der Spitzenverstärker ist weitgehend inaktiv, solange der Doherty-Verstärker mit niedrigem Eingangssignal arbeitet, und wirkt fast wie ein offener Schaltkreis. Der Impedanztransformator wandelt die 50-Ohm-Last in eine 25-Ohm-Last an der Eingangsseite um. Der Impedanzwandler wiederum transformiert die vom Trägerverstärkerausgang gesehene Last auf ungefähr 100 Ohm hoch. Sobald der Eingangsspiegel des Doherty-Verstärkers



**Bild 10:** Vollständiges Modell des 500-MHz-Dohertyverstärkers mit den Werten der passiven Bauelemente



**Bild 11: Ausgangssignal des Doherty-Verstärkers in Abhängigkeit vom Eingangssignalpegel**

jedoch steigt, beginnt der Spitzenverstärker mehr zu leiten und speist entsprechend mehr Strom in die Ausgangsschaltung ein. Der Trägerverstärker sieht daraufhin – aufgrund seiner Phasenbeziehung zum Spitzenverstärker-Ausgang und der 90°-Phasenverschiebung, die vom Impedanzwandler produziert wird, seine Lastimpedanz absinken, sobald die HF-Eingangsspannung ansteigt.

Dieser "Impedanzmodulations-effekt" ermöglicht es, dass die Ausgangsspannung des Trägerverstärkers über einen weiten Bereich von Eingangssignalpegeln nahe in Höhe der Versorgungsspannung bleibt. Die Lastkennlinie des Trägerver-

stärkers ändert sich dynamisch im Schritt mit dem Eingangssignalpegel. Mit anderen Worten: Der Spitzenverstärker sorgt für eine Form von fundamentalem aktiven „Last-Pulling“ [4] für den Trägerverstärker. Dies ist der Schlüssel zum hohem Wirkungsgrad des Dohertys. Wenn der Trägerverstärker dann in die Sättigung gerät, sinkt seine Ausgangsimpedanz, weil die Transistorkollektoren nun nicht mehr wie Stromquellen sondern wie Spannungsquellen wirken. Der Impedanzwandler transformiert die Ausgangsimpedanz des Trägerverstärkers auf einen hohen Wert, was den Transistorkollektoren des Spitzenverstärkers ermöglicht, effizient Leistung in

die Last zu pumpen, und damit als Stromquellen zu wirken. Anders gesagt, der Impedanzwandler transformiert den gesättigten Trägerverstärker (der jetzt wie eine Spannungsquelle aussieht) in eine Stromquelle. Der Spitzen- und der Trägerverstärker verhalten sich jetzt wie zwei parallele Stromquellen, die Leistung an das Ausgangs-Netzwerk liefern. Die Ausgangsstufe sieht daher zwar einfach aus, aber hier läuft ein komplizierter physikalischer Prozess ab.

**Das vollständige Modell**

In Bild 5 sieht man, dass Bandpassfilter hinter den Verstärkern, aber vor dem Ausgangs-Netzwerk angeordnet sind. Sie dienen zur Reduzierung des Harmonischen-Anteils, der die korrekte Funktion der Schaltung stören könnte. Diese Bandpässe sind traditionell die LC-Ausgangs-Tankkreise der Träger- und Spitzenverstärker. Die 50-Ohm-Last am Ausgang wird mit einem L-Match-LC-Netzwerk auf die erforderlichen 25 Ohm transformiert. Bild 10 zeigt das vollständige Modell des 500-MHz-Doherty-Verstärkers. Die Schaltung ist zur Demonstration so aufgebaut, dass man den Betrieb der einzelnen Stufen besser erkennen kann.

**Ergebnisse**

Bild 11 zeigt den simulierten Verlauf der Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Zeit und zwar für verschiedene Eingangsspannungen von 0,35 V bis 4,24 V.

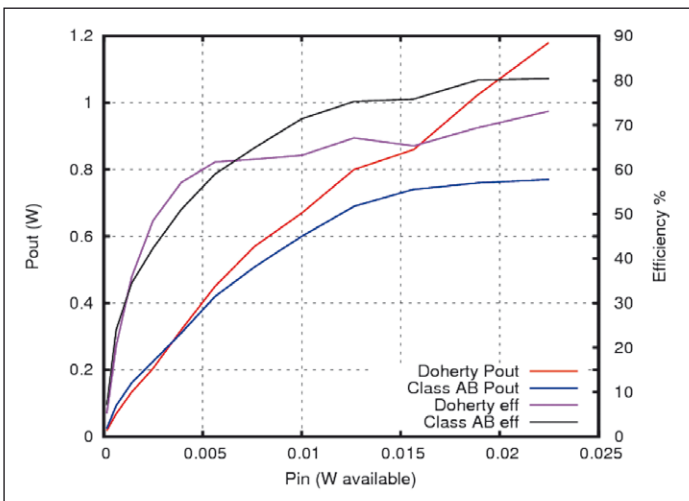
Der Klasse-AB-Verstärker am Anfang dieses Artikels geriet in Kompression, sobald die Eingangsspannung 1 V überstieg. Da jetzt ein 3-dB-Quadraturhybrid am Eingang liegt, wird die Eingangsleistung geteilt, so dass zur Übersteuerung der Verstärker eine Spannung von etwa 1,41 V benötigt wird. An diesem Punkt beginnt der Spitzenverstärker den Ausgangspegel zu erhöhen. Zwar ist eine geringe Verzerrung festzustellen, jedoch sehen die Signalformen sehr viel sauberer

aus, und die Kompression ist "weicher" als beim Klasse-AB-Verstärker.

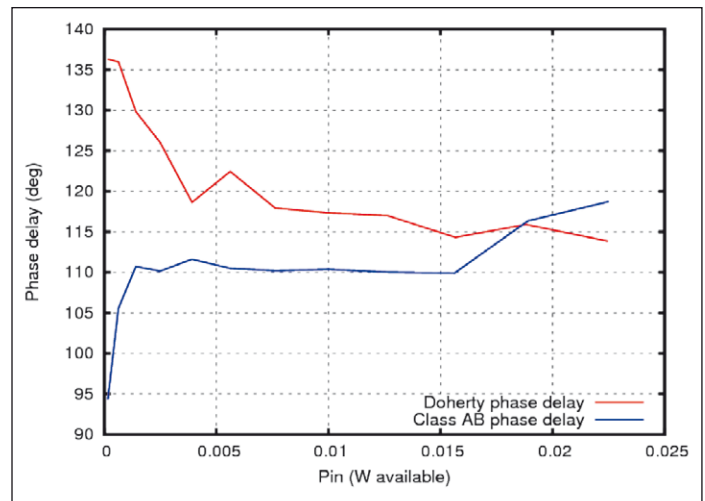
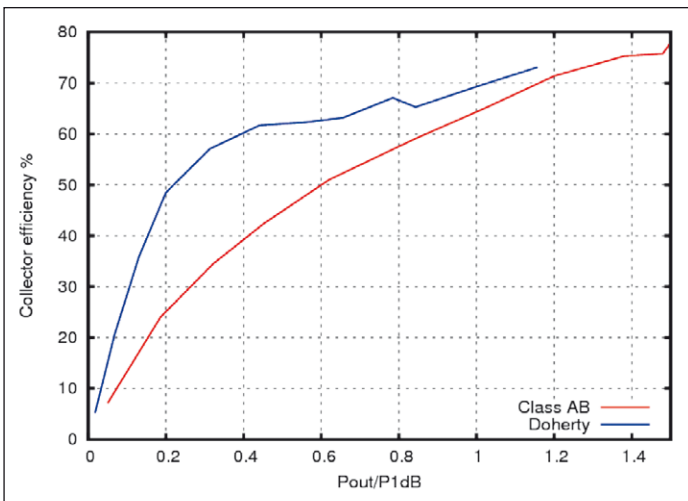
Die blaue Kurve zeigt die Ausgangsleistung des unabhängig betriebenen Trägerverstärkers, wenn die Eingangsleistung gesteigert wird. Der charakteristische Ablauf der Kompression wird im Trägerverstärker deutlich, wenn die Eingangsleistung über 5 mW steigt. Die rote Kurve (der Doherty-Output) wächst bei entsprechend verfügbarer Eingangsleistung weiter an, desgleichen der Spitzenverstärker-Output.

Von besonderem Interesse ist die Doherty-Kollektoreffizienz. Bei einer Eingangsleistung von 2.5 mW (Output 200 mW), überschreitet die Effizienz in diesem besonderen Fall bereits 50%. Wenn der Doherty 1200 mW liefert (maximale Leistung in Bild 12), kann man nicht länger sagen, dass der Trägerverstärker in Klasse AB arbeitet sondern eher in Klasse D (die Transistoren sind vollständig ein- oder ausgeschaltet. Dies ist der Grund, warum der Wirkungsgrad des Trägerverstärkers (schwarze Kurve) die theoretische Grenze der Klasse AB von 78% überschreitet. Der Trägerverstärker würde stark begrenzen, wenn er unabhängig vom Spitzenverstärker arbeiten würde. Ein AB-Verstärker mit entsprechendem Aussteuerbereich bis zur Höchstleistung würde die meiste Zeit mit einem Wirkungsgrad von gerade einmal 10–15% arbeiten und müsste beträchtlich überdimensioniert werden, nur um die kurzzeitigen Leistungsspitzen liefern zu können.

Amplitudenkompression ist eine wichtige Einschränkung im Betrieb, aber nur ein Teil des komplexen Verhaltens von Leistungsverstärkern. Der Klasse-AB- und der Doherty-Verstärker verursachen auch Phasenverzerrung als Funktion der Leistung. Dies ist die so genannte AM-PM-Verzerrung. Bild 14 zeigt die Schwankung der Verstärkerphasenverzögerung für Klasse-AB- und Doherty-Verstärker.



**Bild 12: Ausgangsleistung und Effizienz des Träger- und des Doherty-Verstärkers in Bezug zur Eingangsleistung.**



**Bild 13: Verhalten des Kollektor-Wirkungsgrades bezogen auf die Verstärkerleistung (bezogen auf den P1dB-Punkt). Wie man sieht arbeitet der Doherty-Verstärker mit hoher Effizienz, bevor die Gesamtkompression beginnt.**

**Bild 14: Phasenverzögerung für den simulierten Klasse-AB- (blaue Kurve) und den Doherty-Verstärker**

Der Phasenverzögerung des Klasse-AB-Verstärkers macht einen plötzlichen Sprung, wenn die Eingangsleistung über 1 - 2 mW steigt und bleibt dann konstant, auch wenn der Verstärker in Kompression geht. Die Doherty-Messergebnisse zeigen dagegen eine langsamere Änderung bei niedrigen Eingangsspegeln unter 5 mW, darüber bleibt die Phasenverzögerung dann weitgehend konstant.

- Reduziert spektrale Verbreiterung in Signalen mit hohem Spitze-zu-Mittelwert-Leistungsverhältnis
- Kann in Low-power-Handheldgeräten und High-Power-Verstärkern verwendet werden
- Bietet viele Möglichkeiten zur Optimierung für verschiedene Anwendungen
- Symmetrische Eingangsschaltung reduziert Schwankungen der Rücklaufdämpfung

**Schlussfolgerungen**

Der Doherty-Verstärker ist ein idealer Kandidat für die Maximierung der Verstärkereffizienz, der gleichzeitig hohe Linearität gewährleistet. Wenn das Modulationsschema auf irgendeiner Art von Frequenzteilung Multiplexing oder AM beruht ist der Doherty-Verstärker optimal. Wenn die Anwendung aber eine konstante Trägermodulation verlangt (FM, FSK, PSK, usw.), dann ist er nicht geeignet. In diesem Fall empfiehlt sich ein Klasse-C- oder ein Schaltverstärker. Nachfolgend eine kurze Aufzählung der für und gegen den Doherty-Verstärker sprechenden Gründe.

**Pro:**

- Gutes Verfahren, um den Wirkungsgrad bei guter Signalreue zu erweitern

**Contra:**

- Höhere Schaltungskomplexität gegenüber der klassischen Klasse-AB-Verstärkertopologie
- Es ist schwierig, alle Parameter richtig einzustellen, um den besten Arbeitspunkt zu finden
- Parasitics verkomplizieren das Design eines realen Verstärkers.
- Eingangssignalpegel ändern die Betriebscharakteristik (bei anderen Großsignalverstärkern aber auch).
- Der Doherty-Verstärkergewinn ist oft ungefähr 3 dB niedriger als bei entsprechenden Klasse-AB-Verstärkern

**Referenzen**

Klasse-AB- und C-Verstärker

[1] B. Slade, "Amplifier Alphabet Soup: Part 1, Basics of Class A, AB, B and C amplifiers," RF Globalnet, Feb 2011.

**Simulation**

Alle Simulationen in diesem Artikel wurden mit Hilfe von NGSpice [2] Modellen durchgeführt. Der Leser findet auf den folgenden Websites weitere Informationen:

[2] <http://ngspice.sourceforge.net/>

**Allgemeine Informationen:**

Wer eine eingehendere Behandlung der Grundlagen von RF- und Mikrowellenverstärkern sucht, kann weitere Informationen in den bei der Vorbereitung dieses Artikels verwendeten Arbeiten finden.

[3] W. H. Doherty, "A new high-efficiency power amplifier for modulated waves",

Bell Telephone-Labormonographien B 931, Mai 1936. (online verfügbar)

[4] S.C. Cripps, „RF Power Amplifiers for Wireless Communications“, Artech House, 1999.

[5] M. Elmala, J. Paramesh und K. Soumyanath,

„A 900-nm CMOS Doherty power amplifier with minimum AM-PM-Distortion“,

IEEE Trans. Solid State Circ., vol. 41, Nr. 6, Juni 2006.