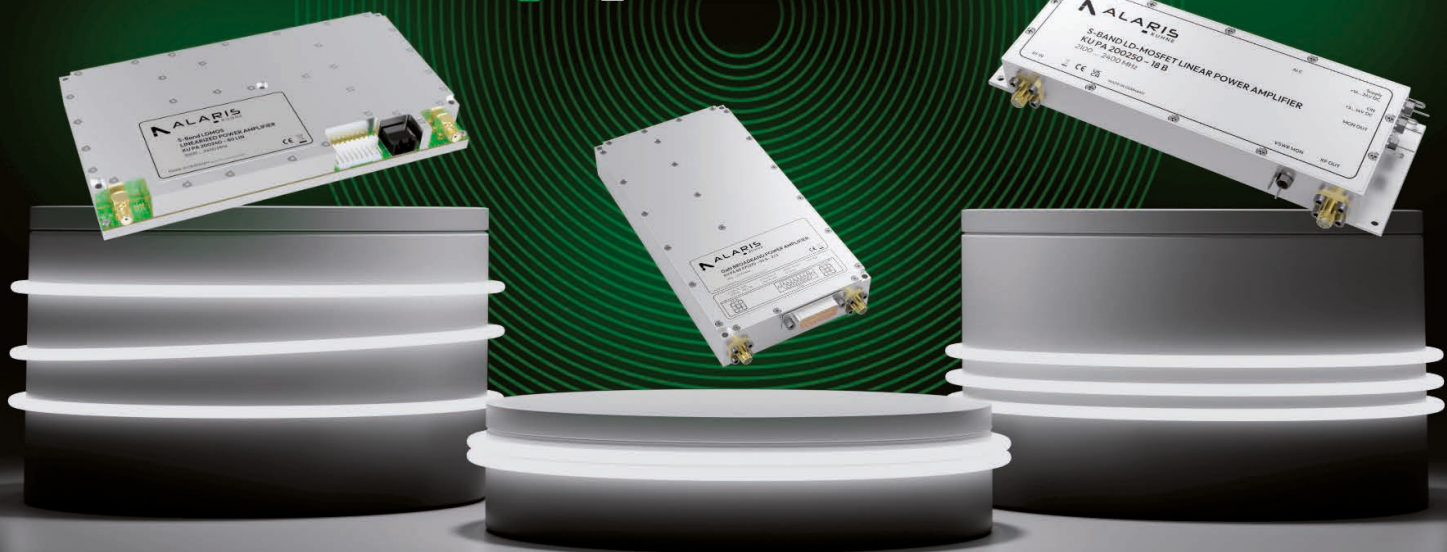


# hf-praxis

**HF- und Mikrowellentechnik**

## HF-Linearisierung von Verstärkern

Alaris Kuhne, S. 8



# Linearisierte Verstärker für OFDM-modulierte Signale und die Herausforderung durch Galliumnitrid Halbleiter



Reduktion der Verstärkung zwischen dem Kleinsignalbetrieb und der Sättigungsleistung führt. Für das modulierte Signal hat das zur Folge, dass sich die EVM und damit die Signalqualität verschlechtert und der Störabstand für die benachbarten Kanäle sinkt. Die Datenpunkte im Konstellationsdiagramm wandern zum Zentrum hin und entfernen sich besonders für die außenliegenden Kombinationen vom Sollwert (Bild 3). Aus regulatorischen Gründen und natürlich im Sinne der Qualität des zu übertragenden Datenstroms ist diese Kompression inakzeptabel.

## Linearisierung von verzerrten Signalen

Zur Korrektur verzerrter Signale existieren diverse Linearisierungsansätze. Einer der frühesten Schaltungen ist die Vorverzerrung der nichtlinearen Transistorkennlinie mit der nichtlinearen Kennlinie eines weiteren Halbleiters. Das wäre der klassische Fall eines auf Dioden zurückgreifenden Vorverzerrers (Bild 4). Solche Lösungen werden seit Jahrzehnten genutzt, um sowohl Halbleiterverstärker als auch Röhren zu linearisieren. Je besser man die Kennlinie

Liveübertragungen von Sportveranstaltungen, Streaming von Events an größere Nutzergruppen, Venue-Casting und Datenverbindungen zu Verkehrsflugzeugen, um Inflight-Connectivity zu ermöglichen – all diese hochdatenratigen Anwendungen benötigen hochlineare Leistungsverstärker im Sender, um dem jeweiligen Empfänger die gesendeten Daten verzerrungsarm bereitstellen zu können. Die komplexen Mehrträger-OFDM-Modulationen, welche in DVB-T2, LTE und 5G zum Einsatz kommen, erfordern Sendeverstärker, die innerhalb der Signalbandbreite möglichst geringe Vektorfehler verursachen. Dieser Wert wird als EVM (Error Vector Magnitude) ausgedrückt. Daneben gilt es, benachbarte Kanäle nicht zu stören; der Nachbar kanalstörabstand wird als ACLR (Adjacent Channel Leakage Ratio) bezeichnet.

## Lineare Verstärker

Kuhne hat hier mit Verstärkern wie dem KU PA 440500 – 25 A, KU PA 510590 – 10 A und KU PA 640729 – 10 A ein breites Portfolio an von Haus aus äußerst linearen Verstärkern im C-Band im Angebot. Darüber hinaus sind für das S-Band auch Verstärker mit unübertroffener Linearität durch den Einsatz von HF-Vorverzerrungsschaltungen wie die KU PA 200240 – 80 LIN (Bild 1) verfügbar. Auf die Funktionsweise analoger HF-Linearisierung wird im Folgenden noch eingegangen.

## Galliumnitrid Leistungsverstärker

Mit der ebenfalls zunehmenden Forderung nach Effizienz hat sich in den letzten Jahren für Leistungsverstärker Galliumnitrid (GaN) als Halbleitermaterial für hohe Frequenzen oberhalb von 3 GHz durchgesetzt. Gegenüber dem bis dahin etablierten Galliumarsenid (GaAs) erreicht man mit GaN nicht nur eine höhere Leistungsdichte, sondern auch einen erheblich besseren Wirkungsgrad von bis über 70 %

(gegenüber etwa 20 %) und eine deutlich höhere Robustheit gegenüber Spannungen und reflektierter Leistung. Möglich wird dies durch eine höhere Durchbruchspannung des Materialsystems. Jedoch kommen diese Vorteile zum Preis einer schlechteren Linearität.

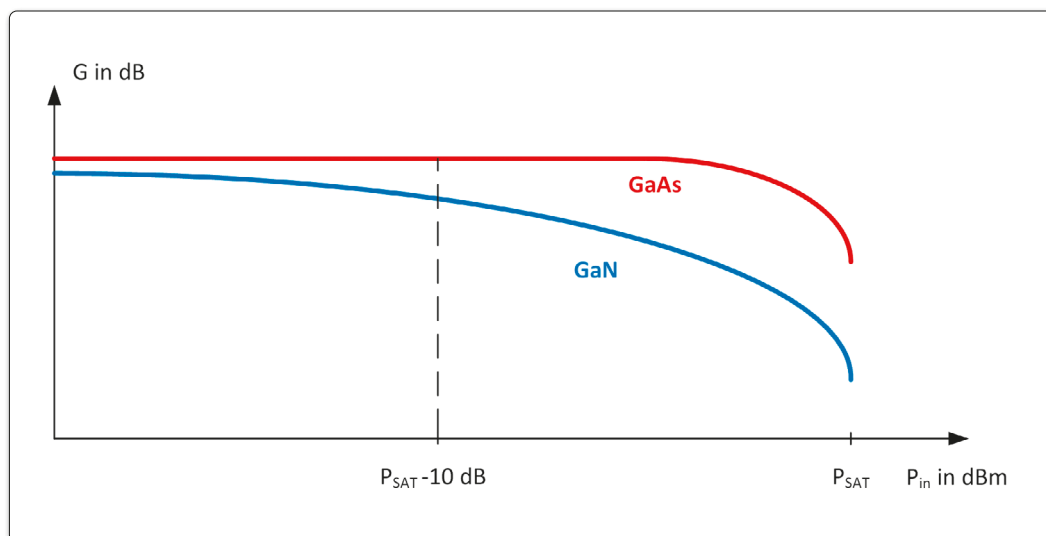
Die häufig eingesetzten GaN HEMT (High Electron Mobility Transistor) zeigen gegenüber GaAs eine sehr früh einsetzende Amplitudenkompression (Bild 2), was zu einer deutlichen



Bild 1: KU PA 200240 – 80 LIN - linearisiert mit RFPAL

Autor:

Dr.-Ing. Sebastian Preis  
Kuhne electronic GmbH  
<https://kuhne.alaris.tech/>



**Bild 2: Leistungsverstärker Galliumnitrid im Vergleich mit Galliumarsenid**

eines nichtlinearen Bauteils kennt und je weniger sich die Nichtlinearität über Parameter wie Signalbandbreite, Aussteuerung, Temperatur oder Versorgungsspannung ändert, umso einfacher kann man mit Dioden die Kennlinie des eingesetzten Bauteils kompensieren.

Nachteilig ist jedoch, dass eine Linearisierungsschaltung aus Dioden nur relativ unflexibel einsetzbar ist. Die einmal aufgebaute Diodenschaltung muss für den entsprechenden Verstärker und die Signalcharakteristik in Arbeitspunkt gebracht werden und kompensiert dann genau diese auftretende Verzerrung. Führt eine andere Aussteuerung oder Signalbandbreite zu einer Veränderung der Verzerrung, müsste zumindest der Arbeitspunkt des Vorverzerrers oder im schlimmsten Fall die Schaltung angepasst werden.

**Digital Pre-Distortion**

Die großen Hersteller von Basisstationen wie Nokia oder Ericsson setzen DPD (Digital Pre-Distortion) ein, um die Verzerrungen in den Leistungsverstärkern auszugleichen. Der grundlegende Gedanke ähnelt dem Verhalten des auf Dioden basierenden Vorverzerrers. Das Eingangssignal wird entsprechend der Kenntnis der nichtlinearen Kennlinie des Leistungsverstärkers so verändert, dass das

Summensignal möglichst linear verläuft. Anders als bei starren Diodenschaltungen berechnet hier ein FPGA die für das aktuell anliegende Signal im Verstärker entstehende Verzerrung. Dadurch kann auf beliebige Signalcharakteristiken und jeden Aussteuerungsbereich entsprechend reagiert werden. Der FPGA erzeugt Korrekturdaten und überlagert diese mit dem angelieferten Datenstrom zu einem korrigierten Eingangssignal.

Ein großer Anbieter von DPD-Lösungen ist beispielsweise Analog Devices. Eine bedeutende Einschränkung von DPD ist, dass die Korrektur normalerweise auf der Ebene des Basisbandsignals erfolgt. Daher eignet sich dieser Ansatz eigentlich nur, wenn man ein vollständiges Sendesystem aufbaut und Zugang zum Basisbandsignal hat. Weiterhin ist auch eine erhebliche Rechenleistung notwendig, um Verstärkerverzerrungen in quasi-Echtzeit zu korrigieren.

**Radio Frequency Power Amplifier Linearizer**

Das ursprünglich von der Firma Scintera entwickelte Konzept des RFPAL (Radio Frequency Power Amplifier Linearizer) bietet die Möglichkeit, adaptiv auf veränderliche Signalcharakteristiken und Aussteuerungen einzugehen, ähnlich wie bei der DPD. Jedoch verarbeitet der

RFPAL-Chip direkt das analoge HF-Eingangssignal. Damit ist diese Lösung interessant für die Herstellung kompakter linearer Verstärkersysteme ohne direkten Zugang zum Basisband oder größerer Rechenleistung. Die adaptive analoge HF-Vorverzerrungskorrekturschaltung tastet das HF-Signal am Ausgang der Verstärkerstufe sowie am Eingang des Systems, welches mittels Richtkoppler ausgekoppelt wurde, im analogen Bereich ab und modifiziert intern Koeffizienten, die eine Volterra-Reihenentwicklung der anliegenden Wellenform abbilden.

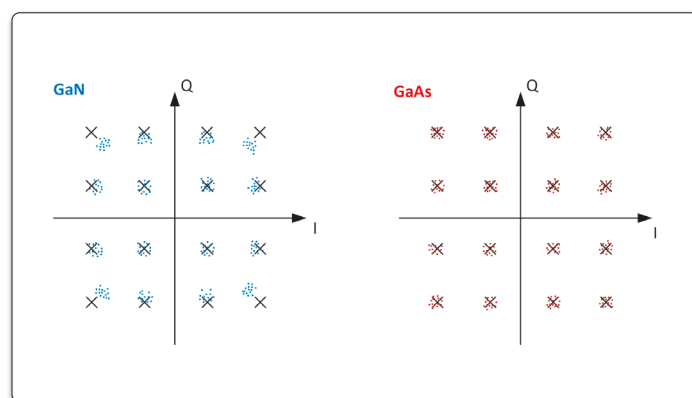
**Volterra-Reihe**

Eine Volterra-Reihe ist ein Modell für nichtlineares Verhalten, das einer Taylor-Reihe

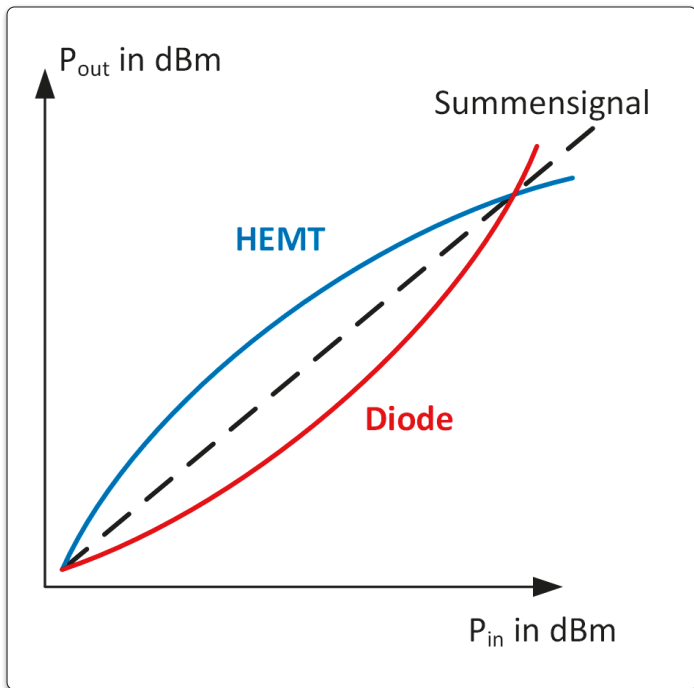
ähnelt, mit dem Unterschied, dass die Volterra-Reihe Speichereffekte darstellen kann und sich damit für Verstärker besser eignet. Diese Abbildung des Signals wird in der digitalen Schaltung innerhalb des RFPAL-Chips verarbeitet, wo wiederum die benötigten analogen Koeffizienten bestimmt werden, um die Nichtlinearität des Leistungsverstärkers zu kompensieren. Anschließend wird dann ein weiterer Richtungskoppler verwendet, um ein HF-Korrektursignal zurück in den HF-Pfad zum Eingang der Verstärkerstufe zu mischen. Dadurch, dass die Verarbeitung in der analogen Domäne bleibt, wird durch das RFPAL-System deutlich weniger Energie verbraucht (in der Regel weniger als 1 Watt) als bei digitalen Vorverzerrungslösungen. Eine Einschränkung der aktuell verfügbaren RFPAL-Bausteine ist ihre maximale Betriebsfrequenz von aktuell 3800 MHz.

**GaN Verstärker oberhalb von 4 GHz linearisieren**

Ein typischer Frequenzbereich für die Übertragung von Videodatenströmen bei Sportveranstaltungen liegt bei 4400 bis 5000 MHz. Wie einleitend erwähnt, war dies jahrelang ein klassischer Einsatzbereich von heute sehr schlecht verfügbaren GaAs-Halbleitern, da Alternativen auf LDMOS (Laterally-Diffused Metal-Oxide Semiconductor) Basis hier wegen ihrer



**Bild 3: Die Datenpunkte im Konstellationsdiagramm wandern zum Zentrum hin. Die Datenpunkte im Konstellationsdiagramm wandern zum Zentrum hin, da die Verstärkung der Signalbestandteile mit hoher Leistung sinkt.**



**Bild 4: Kompensation einer verzerrter Kennlinie**

hohen Eingangs- und Ausgangskapazitäten kaum noch einsetzbar sind. Aktuell verschiebt sich der Halbleitermarkt hier zusehends zu GaN-Bauteilen, was für komplexe Modulationen bei Videodatenströmen wiederum nach Linearisierung verlangt. Die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Einschränkungen der Linearisierungsansätze erfordern hier eine sorgfältige Auslegung des Systems. Da unterschiedliche Signale und Aussteuerungen sowie der fehlende Zugang zum Basisbandsignal hier dominieren, ist die

naheliegende Lösung der Einsatz eines RFPAL. Bild 5 zeigt den schematischen Aufbau der Schaltung.

### Realisierung mit dem RFPAL

Da dessen maximale Betriebsfrequenz unterhalb des nötigen Frequenzbereichs liegt, wird die eigentliche HF auf einen ZF-Bereich, in welchem der RFPAL arbeiten kann, hinuntergemischt. Für die eigentliche Leistungsverstärkung wird das ZF-Signal wieder hinaufgemischt. In der Endstufe erfährt das Signal die Verzerrung. Vor dem Ausgang

wird das HF-Signal ausgekoppelt, zum Mischblock zurückgeführt und dort wieder in die ZF überführt. Auf diese Weise hat der RFPAL stets das Eingangssignal sowie das verzerrte Ausgangssignal zur Verfügung. Dieser berechnet nun das Korrektursignal, welches in den ZF-Pfad vor dem Aufwärtsmischer eingekoppelt wird.

Für jede Änderung im Signal, sei es die Bandbreite, der Crest-Faktor oder die mittlere Aussteuerung, kann so auf die veränderte Verzerrung des Endstufentransistors flexibel reagiert werden.

### Verbesserung des Nachbarkanalstörabstand

Messungen einer Endstufe auf LDMOS Basis (KU PA 200240 – 80 LIN) mit vorgeschaltetem RFPAL zeigen eine Verbesserung des Nachbarkanalstörabstand von 35 dB (Bild 6) auf 50 dB (Bild 7). Nimmt man sich andererseits eine EVM von beispielsweise 2% als Ziel kann durch den Einsatz des RFPAL die mittlere Ausgangsleistung für ein Signal verdoppelt bis verdreifacht werden.

### Verbesserter Wirkungsgrad

Neben der gezeigten hervorragenden Linearität erreicht ein GaN basierter Leistungsverstärker im Kontext eines modulierten Videosignals bei etwa 5 W mittlerer Leistung eine Verbesserung des Wirkungsgrades in den Bereich von 25 % verglichen

mit 5 % bei GaAs basierten Verstärkern.

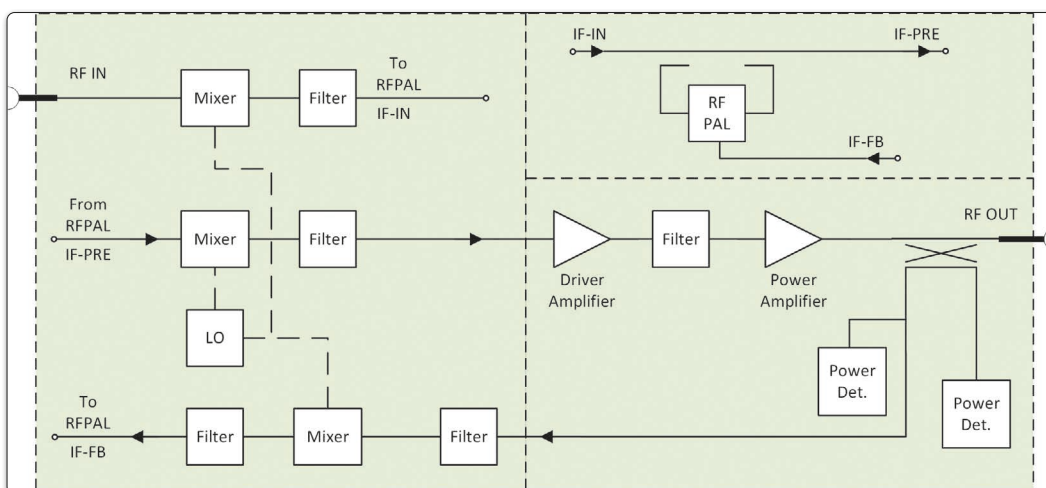
So ist zum Beispiel eine KU PA 440500 – 40 LIN mit den hervorragenden Linearitätseigenschaften der bekannten linearisierten Kuhne Verstärker angedacht, welche moduliert mindestens 5 W mittlere Leistung für ein OFDM modulierte Signal bereitstellen kann. Die hohe Leistungsdichte und der Wirkungsgrad von GaN Transistoren ermöglichen dabei die Bauform der KU PA 200240 – 80 LIN beizubehalten.

### Feedback-Pfad

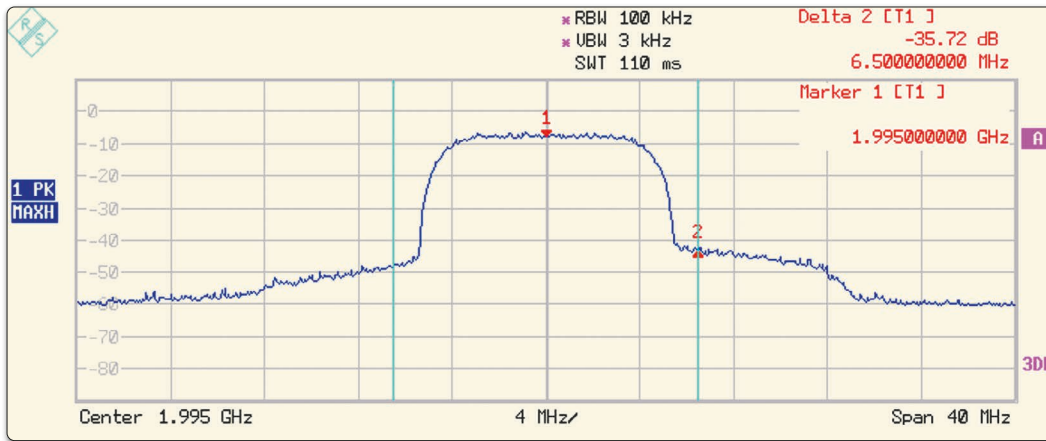
Grundlegend kann das Konzept der Frequenzumsetzung und Linearisierung auf der ZF-Ebene natürlich in beinahe jedes beliebige Band übertragen werden. Dabei ist nur zu beachten, dass alle Nichtlinearitäten die außerhalb des Feedback Pfades zwischen Endstufe und RFPAL auftreten nicht korrigiert werden können. Erzeugt beispielsweise der erste Abwärtsmischer in Bild 5 bereits Verzerrungen, so kann der RFPAL diese nicht aus dem Ausgangssignal der Endstufen entfernen, da die verzerrten Signalanteile bereits im ausgekoppelten Vergleichssignal am Eingang enthalten sind.

### Vorteile für die Systemintegration

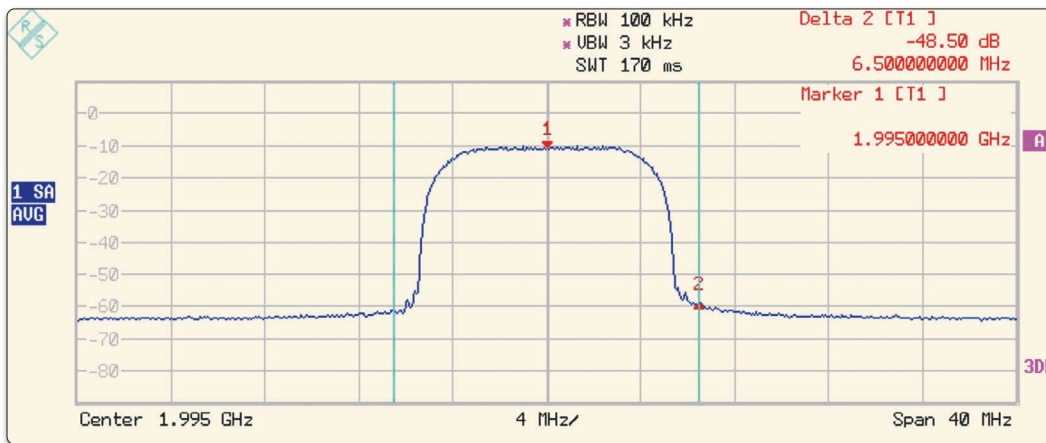
Ein linearisierter Verstärker auf Basis von GaN HEMTs erreicht mit Hilfe des RFPAL also eine vergleichbare, wenn nicht gar bessere Linearität als GaAs basierte Verstärker. Gleichzeitig reduziert sich ihre Leistungsaufnahme erheblich, womit auch die Kühlleistung im System deutlich reduziert werden kann. Durch die hohe Leistungsdichte von GaN kann auch über eine höhere Verdichtung der Transistoren und damit eine Steigerung der Verstärkerleistung bei gleichem Bauraum nachgedacht werden. All diese Vorteile erlauben leistungsfähigere Verstärkersysteme für Punkt-zu-Punkt-Verbindungen bei Video-Liveübertragungen, hochdatenratigen Anbindungen von (Luft-)



**Bild 5: Schematischer Aufbau von Mischer- und Linearisierungsschaltung**



**Bild 6: Messungen einer Endstufe auf LDMOS Basis ohne Linearisierung**



**Bild 7: Verbesserung des Nachbarkanalstörabstand durch Linearisierung mittels RFPAL**

Fahrzeugen, Venue Casting oder anderen Anwendung mit dem Bedarf an hoher Signalqualität und Ausgangsleistung bei gleichzeitig hoher Effizienz.

## Ausblick in die Zukunft

Als weiteren Ausblick in die Zukunft kann der mittlere Wirkungsgrad für modulierte Signale noch weiter gesteigert werden, indem man effiziente Verstärkerarchitekturen, wie beispielsweise Doherty Anordnungen einsetzt.

Bei klassischen Verstärkern fallen das Maximum des Wirkungsgrades und das Maximum der Ausgangsleistung beinahe auf den selben Wert der Eingangsleistung. Da die Signalamplitude von OFDM modulierten Signal jedoch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung rund um die mittlere Leistung des Signals aufweist, nutzt Spitzenwirkungsgrad für

die Effizienz im realen Betrieb in der Regel wenig. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung ist in Bild 8 im Hintergrund grau dargestellt.

## Doherty Architektur

Der Abstand von mittlerer Leistung zu Spitzenleistung im Signal wird als PAPR (Peak-to-Average-Power-Ratio) oder auch Crest-Faktor bezeichnet. Je höher dieser ist, umso leistungsstärker muss ein Verstärker ausgelegt werden, um eine bestimmte mittlere Leistung abgeben zu können. Nutzt man nun einen Doherty-Verstärker, enthält dieser mindestens zwei parallel arbeitende Endstufentransistoren (Haupt- und Hilfstransistor), die bei verschiedenen Eingangspegel einsetzen und damit auch nacheinander ihr Leistungs- und Effizienzmaximum erreichen. Dadurch hat man einen Bereich hohen

Wirkungsgrades, welcher in der Regel mindestens 6 dB unterhalb der Sättigungsleistung des Verstärkers beginnt.

Je nach Auslegung der Doherty-Stufe, kann dieser Bereich auch noch weiter in den back-off

hereinragen und damit Signale mit hohem PAPR effizienter abbilden.

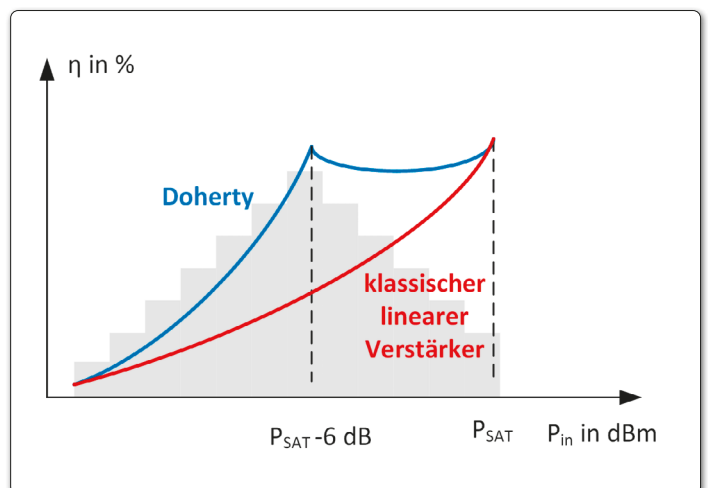
## RFPAL für Doherty

Da der RFPAL sowohl Amplituden- als auch Phasenfehler korrigieren kann, ist auch die Linearisierung von Doherty-Verstärkern umsetzbar. Durch die Verteilung der Effizienz-Maxima der unterschiedlichen Einzeltransistoren, wie in Bild 8 dargestellt, lässt sich über die vom Halbleiter dominierte Spitzeneffizienz hinaus, die mittlere Effizienz des Gesamtsystems steigern. Somit können durch den Einsatz von RFPAL Bausteinen hocheffiziente Verstärker gleichzeitig hochlinear betrieben werden.

## Herausragende Verstärker für modulierte Anwendungen

Bei Kuhne werden seit Jahren linearisierte Verstärker für die Frequenzbänder im S- und L-Band unter Verwendung der RFPAL Bausteine gefertigt. Prototypen neuer C-Band Systeme werden aktuell realisiert und für Anwendungen mit erweiterten Effizianzorderungen stehen Doherty-Entwürfe bereit.

Linearität, Effizient und Leistung sind ein Dreigestirn, welches lange Zeit nicht gut zueinander zu bringen waren. Mit modernsten Bausteinen lässt sich dieser Spagat überwinden und herausragende Verstärker für modulierte Anwendungen werden Realität. ◀



**Bild 8: Doherty-Verstärker im Vergleich zum klassischen linearen Verstärker**