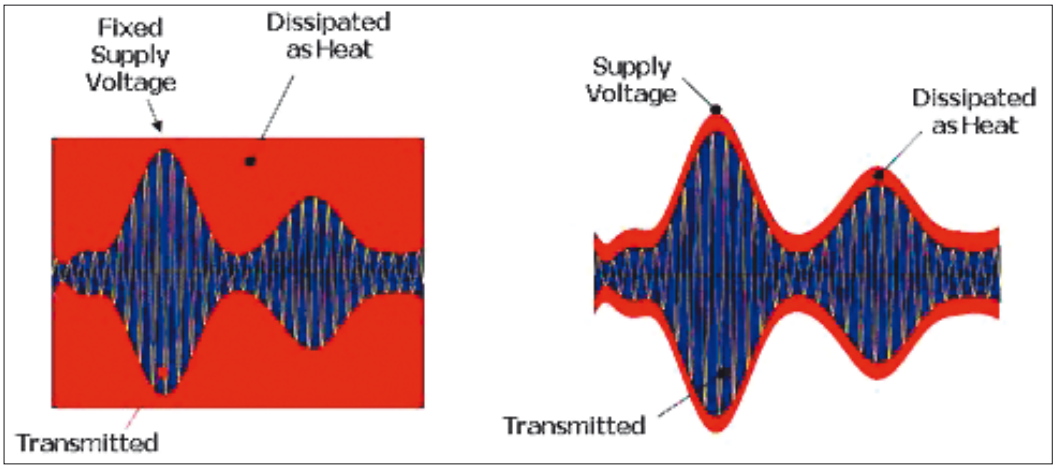
Dynamische und mehrstufige HF-Verstärker-Stromversorgung



Auch die Stromversorgung selbst kann dazu beitragen, dem System aus Stromversorgung und Sender/Verstärker zu einem besseren Wirkungsgrad zu verhelfen. Der Beitrag skizziert anhand der Möglichkeiten Envelope Tracking, Direct Polar und Hybrid Combinations die wichtigsten Varianten einer dynamischen Stromversorgung und stellt eine Mehrstufen-Stromversorgung näher vor.

Der Wirkungsgrad von Hochfrequenz-Leistungselektronik wird immer wichtiger. Dies gilt für Low-Power-Systeme ebenso wie für Basisstationen hoher Leistung, wenn auch aus verschiedenen Gründen: Im ersten Fall geht es meist um die Betriebszeit mit einer Batterie bzw. Akkuladung, im zweiten Fall darum, dass möglichst geringe Energiekosten verursacht werden sollen.

Dynamische Stromversorgung

Eine dynamische Stromversorgung kennt man bereits aus dem Bereich der „Unterbrechungsfreien Stromversorgung“ (USV). Sie beruht meist auf einem Schwungrad (Flyweel). Dynamische USV-Anlagen sind z.B. für die Absicherung von größeren Rechenzentren interessant. Der Grund dafür ist, dass durch die Dynamik im Server-Markt und den Trend zur Zentralisierung die notwendigen Batteriekapazitäten schwer zu berechnen und vorzuhalten sind. Zudem sind die Batterien ein erheblicher Kostenfaktor.

In [1] wird die Dynamic Power Supply für Sender und Verstärker vorgestellt und ausführlich behandelt, s. Bild 1. Hierbei geht es hauptsächlich darum, wie die Techniken Envelope Tracking („Hüllkurven-Nachverfolgung“), Polar Modulation („gepolte Modulation“) und hybride Stromversorgungs-Designs genutzt werden können, um Verstärker effizienter zu versorgen. Wie arbeiten diese Verfahren und wie und wann nutzt man sie sinnvoll? Das erste Buch zu diesem Thema bringt einen kompletten Überblick zu diesen Schaltungstechniken und bietet damit allen, die im Bereich der HF-Leistungsverstärker und Sender tätig sind, Unterstützung und Anregungen für bessere Lösungen. Schritt für Schritt wird gezeigt, wie man Ideen in die Praxis umsetzen kann. Dabei wird auf die Transistorauswahl besonderer Wert gelegt. Die zugehörige Messtechnik wird in all ihren Aspekten erläutert und der Leser zur korrekten Interpretation der Messresultate befähigt.

Envelope Tracking

Was ist Envelope Tracking und welche Vorteile bringt es? Hierzu liest man in [2]: „Konventionelle PAs geben 80% der aufgenommenen Energie ungenutzt als Wärme wieder ab. So entfällt beispielsweise die Hälfte des Gesamtenergieverbrauchs in Mobilfunk-Basisstationen alleine auf die PAs. Obwohl das Envelope Tracking bereits vor über 60 Jahren erstmals beschrieben wurde, wird es erst seit kurzem kommerziell eingesetzt. Der Hauptgrund hierfür ist die Schwierigkeit, einen Modulator zu konstruieren, der die Effizienz-, Bandbreiten- und Rauschanforderungen von Breitbandsignalen wie Multicarrier-Signalen von WCDMA, WiMAX oder DVB erfüllt.“ Es folgt die Skizzierung der Entwicklung und Validierung digitaler Vorverzerrungs-Algorithmen. Daraus wird abgeleitet: „Zur Implementierung des Envelope Trackings muss ein Modulator den PA immer im effizientesten Arbeitspunkt halten. Dazu wird die Versorgungsspannung des PAs synchron mit der Einhüllenden des gesendeten Signals moduliert.“ Das ist im Aufmacherbild (Quelle: Wikipedia) dargestellt.

Weiter heißt es: „Eine immer größere Zahl von Leistungsverstärkern unterstützt die Envelope-Tracking-Technik, um die Effizienz zu verbessern und den Stromverbrauch zu reduzieren – beispielsweise in Smartphones und taktischen Sprechfunkgeräten. Das Envelope Tracking erfordert einen zusätzlichen Generator, der das Hüllkurvensignal für den DC-Modulator bereitstellt. Hüllkurvensignale erfordern eine hochgenaue anpassbare zeitliche Abstimmung mit dem HF-Signal,

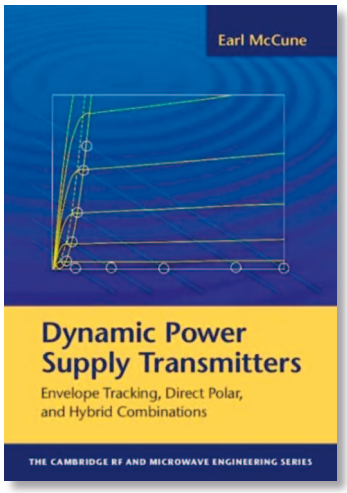


Bild 1: Cover des ersten Buchs zum Thema „Dynamische Stromversorgung“

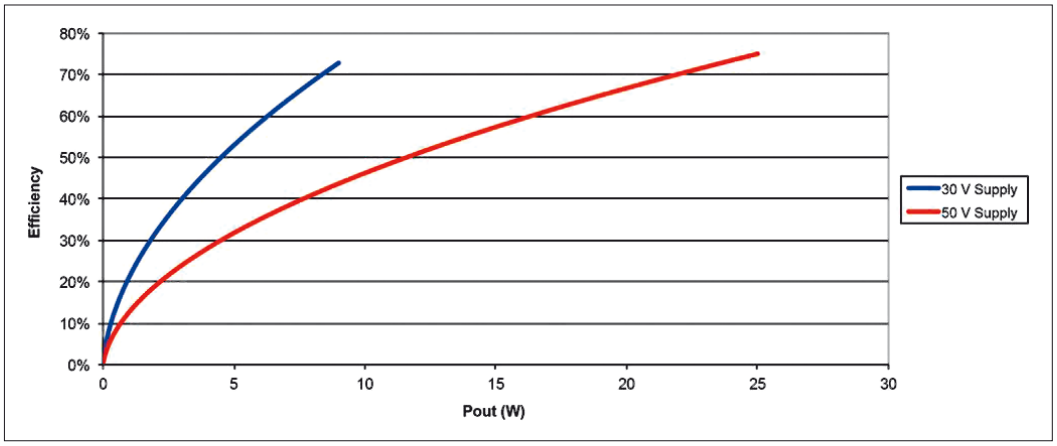


Bild 2: Verstärker-Wirkungsgrad als Funktion der Ausgangsleistung für zwei verschiedene Versorgungsspannungen (Quelle: TI, [3])

Shaping-Funktionen und eine Signalleistung mit optimaler spektraler Reinheit.

Das Verstärkerverhalten wird durch die Messung von Verzerrungen und die Analyse der Auswirkungen der Vorverzerrung charakterisiert. PAE-Messungen (Power Added Efficiency) erfordern zeitsynchrone Messungen der Eingangs- und Ausgangsleistung des Verstärkers sowie des entsprechenden Stromverbrauchs. Entscheidend ist eine hochpräzise Synchronisierung, was bei Verwendung mehrerer Testinstrumente eine große Hürde darstellt."

Video-Tutorials auf [2] können helfen, die Zusammenhänge und Probleme besser zu verstehen.

Welche Auswirkungen hat das Envelope Tracking auf Netzteile? Diese Frage stellt [3]. In Bild 2 erkennt man deutlich, dass das Absenken der Versorgungsspannung die Effizienz verbessert, während im Gegenzug die Ausgangsleistung des Verstärkers zwangsläufig begrenzt wird.

„Die Reaktionsgeschwindigkeit kann in Systemen dieser Art ein Thema sein, denn die Bandbreite von Schaltnetzteilen ist meist auf einige zehn Kilohertz begrenzt, während sich die Modulationsanforderungen im Bereich mehrerer Megahertz bewegen können. Man hat Kombinationen aus Linear- und Schaltregler wie die Bausteine LM3290 und LM3291 entwickelt. Diese enthalten einen Linearregler mit einer Regelkreis-Bandbreite von 50 MHz im Verbund mit einem leistungsfähigen Schaltregler. Letzterer bietet dem Low-Dropout-Regler (LDO) einerseits ausreichend Reserven für das Envelope Tracking und hält andererseits die Verluste niedrig. Darüber hinaus gab es Initiativen mit dem Ziel, die Regelkreise schneller zu machen, indem man fortschrittliche Schaltbausteine beispielsweise auf GaN-Basis nutzt, um die Schaltfrequenz der Netzteile deutlich über 1 MHz anzuheben."

Wichtig ist, zu wissen, dass zudem das Netzteil als Stromquelle und Stromsenke arbeiten muss. Es muss in der Lage sein, die im Ausgangskondensator gespeicherte Ladung schnell abfließen zu lassen, um die Ausgangsspannung rasch zu reduzieren. Das Entladen allein über den Sender/Verstärker würde zu lange dauern und erhebliche Verluste produzieren.

Wenn ein Netzteil auch als Stromsenke einsetzbar sein soll, unterscheidet sich sein Design erhablich von den üblichen Lösungen. „Eine Möglichkeit, die Ladung aus den Ausgangskondensatoren zu holen, ist die Verwendung eines Netzteils mit synchroner Topologie. Hierbei werden die Ausgangsdioden durch Halbleiterschalter ersetzt, die den Stromfluss in beiden Richtungen ermöglichen. Eine naheliegende Lösung wäre ein synchroner Abwärtswandler, wie er schon seit Jahren im Zusammenhang mit DDR-Speichern eingesetzt wird, bei denen ebenfalls eine Stromquelle und -senke benötigt wird.

Ebenso geeignet sind jedoch auch isolierte synchrone Topologien, bei denen ein Stromfluss in der Gegenrichtung im Prinzip durch nichts verhindert wird. Sperr- und Flusswandler sowie phasenversetzte Brückenwandler wurden allesamt bereits erfolgreich in Anwendungen eingesetzt, in denen in beiden Richtungen Energie fließt."

Bei synchronen Topologien fließt die überschüssige Energie an den Eingang des Netzteils zurück, um von anderen Netzteilen aufgenommen oder in den eingangsseitigen Filterkondensatoren gespeichert zu werden. Das setzt weitere Netzteile voraus! Ansonsten ist mit Spannungsspitzen im Netz zu rechnen.

Auch die Strommessung wird tangiert. Normalerweise ist sie nur auf eine Richtung des Stroms ausgelegt. Zwangsläufig gibt es darum Probleme, wenn der Strom zurückfließt (das rampenförmige Strommesssignal für den Current-Mode-Betrieb kann verloren gehen mit erheblichen Auswirkungen auf den Regelkreis und die Strombegrenzung funktioniert nicht).

Direct Polar Modulation

Polare Modulationslösungen für Mobilfunkgeräte können etwa im GSM-Bereich fast als Standard angesehen werden. Sie ermöglichen eine überlegene Energieeffizienz und sind besonders für Edge-Lösungen geeignet. Schon 2001 wurden sie auch bei Breitband-CDMA-Standards und 2003 beim orthogonalen Frequenzmultiplex (OFDM) angewendet.

Heute gibt es drei Hauptvarianten:

- Kleinsignal/Polar Lite
- Polar Loop
- Direct (Open Loop) Polar

Dabei ist nur die direkte Polarität in der Lage, die ultimativen Ziele der Einfachheit und Effizienz unter Beibehaltung der spektralen HF-Leistung zu erreichen. Diese Methode unterstützt auch mehrere Modulationsschemata unter Verwendung eines gemeinsamen Übertragungspfads, wodurch kompakte und kostengünstige Multimode-Mobilteile ermöglicht werden.

Direct Polar ist frei von Skeptik und die aktuellen Diskussionen erinnern an die frühe Kritik an den Architekturen der Direktmischempfänger, die heute die Branche dominieren. Kritiker des direkten polaren Ansatzes konzentrieren sich auf Abhängigkeiten von Leistungsverstärkern von der Massenproduktion sowie auf die Systemcharakterisierung und Programmierkomplexität. Diese Bedenken sind natürlich nicht unbegründet.

In der Polar-Lite-Architektur werden PA-Probleme vermieden, indem ein herkömmlicher linearer PA zur Verstärkung des Signals verwendet wird. Von Nachteil sind jedoch die zusätzliche Komplexität und die zusätzlichen Kosten sowie die schlechte Effizienz bei dem hohen Verhältnis von Spitze zu Durchschnitt der Signale. Die Polar Loop verwendet Rückkopplungstechniken, um die PA-Probleme der Stabilität in Bezug auf Herstellung, Temperatur und Spannung zu lösen. Dies trägt zwar zur Stabilität bei, erfordert jedoch für die HF-Rückkopplung einen separaten Präzisionsempfänger im Sender, wodurch häufig die Größe des Chips verdop-

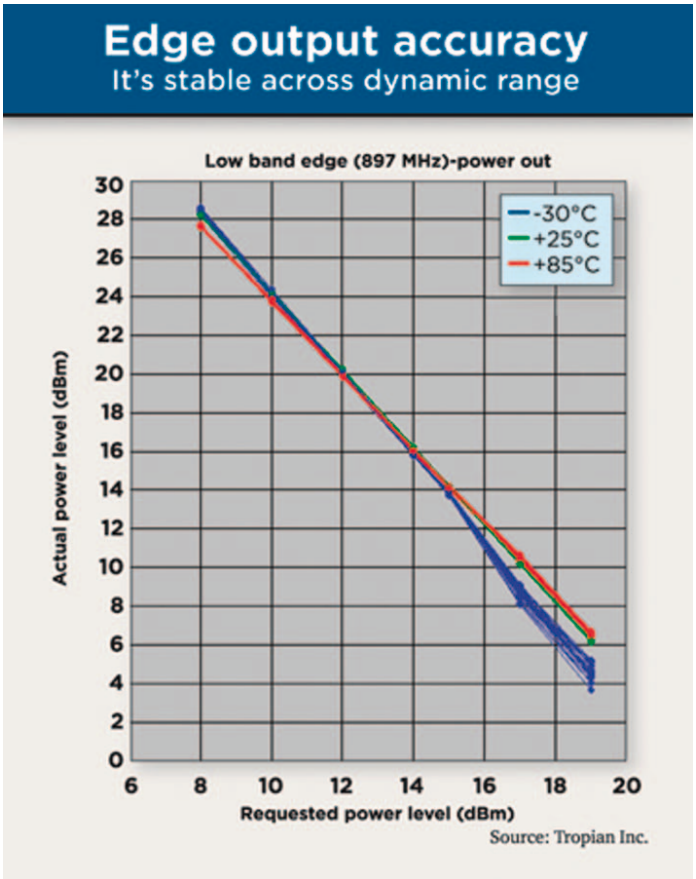


Bild 3: Edge-Ausgangsgenauigkeit. Die Stabilität besteht im gesamten Dynamikbereich

pelt und die Fähigkeit zur Unterstützung von Breitbandsignalen eingeschränkt wird.

Um nun mit der dritten Methode Direct Polar erfolgreich zu sein, muss man die Vorstellung verwerfen, dass der PA ein lineares Präzisionsgerät sein muss. Durch Unterdrücken der Schaltungslinearität und Betreiben des PA als Schalter tritt die PA-Schaltung in einen äußerst stabilen und vorhersagbaren Betriebsmodus ein. Bei richtiger Auslegung unterdrückt ein solcher PA leicht die Ausgangsdrift und sein Wirkungsgrad ist extrem hoch. Dies ist der Schlüssel zum Verständnis, wie es möglich ist, die Komplexität der PA-Charakterisierung und -Kalibrierung zu reduzieren, damit diese Aufgaben überschaubar und reproduzierbar werden. Wie das Diagramm in Bild 3 zeigt, wird eine nichtkompensierte Leistungsstabilität über den erforderlichen Dynamikbereich sowie über Herstellungsschwankungen und Temperaturextreme hinweg leicht erreicht [4].

Für Handset-Designer reduziert dieser Ansatz den Umfang der erforderlichen Designkalibrierung. Sobald eine bestimmte PA korrekt entworfen und kalibriert wurde, verhält sie sich von Mobilteil zu Mobilteil sehr stabil. Durch die direkte Steuerung der PA kann auch die Notwendigkeit entfallen, Batteriespannung und -temperatur zu kompensieren. Es gibt keine Stabilitätsprobleme bei Nichtübereinstimmung, Probleme mit der Leistungsrampe und der Übergangsregelung werden beseitigt. Die Fähigkeit dieser Architektur, auf Marktanforderungen einzugehen, sollte ihre Einführung beschleunigen.

Unterschied

Ein dynamisches Netzteil kann in verschiedenen Formen eingesetzt werden, von Durchschnittsleistungs-Nachverfolgung (Average Power Tracking, APT) und Hüllkurven-Nachverfolgung (Envelope Tracking, ET) bis hin zu Direct Polar (DP), einer modernen Form der Hüllkurven-Eliminierung und -Wiederherstellung, auch als Kahn-Methode bekannt.

Der wichtige Unterschied zwischen APT/ET und DP besteht darin, dass APT/ET die Effizienz eines linearen HF-PAs verbessert, während DP einen effizienten, aber nichtlinearen HF-PA zur Verstärkung nichtkonstanter Hüllkurvensignale verwendet.

Hybrid Combinations

Im Zusammenhang mit einer Stromversorgung stößt man oft auf den Begriff „Hybrid", meist ist damit die Möglichkeit gemeint, den Lüfter-Modus von Dauerlauf sofort nach Einschalten auf automatisches Zuschalten bei einer bestimmten Erwärmung umzuschalten. Unter „Hybrid Combination" versteht man im PSU-Bereich (Power Supply Unit) indes auch die Möglichkeit, zwischen verschiedenen Versorgungsquellen zu wählen oder diese zu kombinieren. Beispielsweise kann man einen Abwärtswandler mit konstantem Strom und konstanter Spannung, der bis zu 40 V DC am Eingang verträgt und bis zu 32 V bei 3 A liefern kann, mit einem leistungsfähigen LiIo-Akku kombinieren.

Im oben genannten Buch werden Hybrid System Combinations u.a. unter folgenden Gesichtspunkten erklärt: Polar at signal peaks, ET, or linear in signal valleys/Constant joint transfer function/Maximum efficiency strategy/Comparisons. Dahinter steckt die Absicht, etwa hocheffiziente, nichtlineare HF-Verstärker (Klasse D oder E) mit einem hocheffizienten Hüllkurvenverstärker zu kombinieren, um insgesamt einen linearen und hocheffizienten HF-Verstärker zu erhalten.

Mehrstufiges Netzteil für hocheffiziente HF-Verstärker

In Kommunikationssystemen werden normalerweise lineare Leistungsverstärker (PAs) (Klasse A, B oder AB) als Lösung für die PA-Stufe verwendet. Diese Verstärker weisen eine hohe Linearität auf, leiden jedoch unter einem geringen Wirkungsgrad, wenn das übertragene Signal ein hohes Verhältnis von Spitze zu Durchschnitt aufweist. Die Kahn-Hüllkurven-Eliminierungs- und -Wiederherstellungstechnik wird verwendet, um die Effizienz von HF-Sendern zu verbessern, indem hocheffiziente, nichtlineare HF-Verstärker (Klasse D oder E) mit einem hocheffizienten Hüllkurvenverstärker kombiniert werden, um einen linearen und hocheffizienten HF-Verstärker zu erhalten.

In diesem [5] wird eine Lösung für den Hüllkurvenverstärker vorgestellt, die auf einer Kombination aus Mehrebenenwandler und Linearregler basiert. Die vorgeschlagene Lösung kann jedes Signal mit einer maximalen Spektralkomponente von 2 MHz reproduzieren und eine momentane maximale Leistung von 50 W ergeben. Die Effizienzmessungen zeigen, dass die Übertragung von Signalen mit niedrigem Durchschnittswert einen deutlich höheren Wirkungsgrad aufweist als ein idealer linearer Regler (herkömmliche Lösung).

Bild 4 skizziert die Funktion, oben ein Teil der Hüllkurve mit den zugehörigen Versorgungsspannungen (rot) und unten das Blockdiagramm der Stromversorgung. Das ist die Hauptidee der Lösung. Der Mehrebenenkonverter muss diskrete Spannungen liefern, die so nahe wie möglich an der Ausgangsspannung des Hüllkurvenverstärkers liegen. Ist dies erfüllt, werden die Leistungsverluste am Linearregler minimal sein. Diese Technik kombiniert eine hocheffiziente, aber nichtlineare HF-PA (Klasse D oder Klasse E zum Beispiel) mit einem hocheffizienten Hüllkurvenverstärker zur Implementierung eines hocheffizienten linearen HF-PAs. Die vorgeschlagene Topologie besteht aus einem Mehrebenenkonverter in Serie mit einem Linearregler mit hoher Anstiegsgeschwindig-

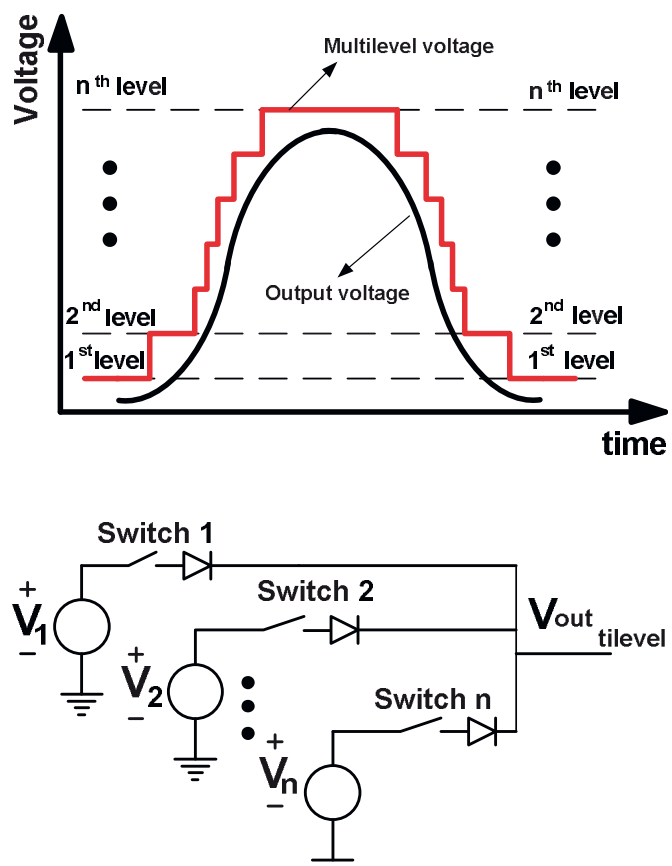


Bild 4: Oben die Zeitdiagramme des vorgeschlagenen Hüllkurvenverstärkers, unten Prinzip des Multilevel-Wandlers mit unabhängigen und analog erzeugten Versorgungsspannungen

keit. Es wird eine von verschiedenen Möglichkeiten, die Mehrebenen zu realisieren, genutzt: Alle erforderlichen Spannungen stehen bereit und es erfolgt eine Umschaltung. Bei MOSFETs ist es notwendig, Dioden in Reihe zu schalten, um z.B. mögliche Kurzschlüsse zu unterbinden.

Der Vorteil dieser Topologie ist, dass sie eine hohe Dynamik der Ausgangsspannung zusammen mit einem erhöhten Wirkungsgrad bietet. Der Nachteil ist, dass jede Stufe des Systems (Wandler und Linearregler) einen sehr hohen Wirkungsgrad haben müssen, da der Gesamtwirkungsgrad das Produkt der individuellen Wirkungsgraden ist. Es ist jedoch immer noch möglich, eine hohe Gesamteffizienz zu erreichen. Das vorgeschlagene System hat einen um bis zu 15 Prozentpunkte besseren Wirkungsgrad als einfache Lösungen mit Linearregler. Der Klirrfaktor (THD) des Systems wurde mit nicht höher als 1,25 % gemessen. ***FS***

Referenzen

[1] Earl McCune: Dynamic Power Supply Transmitters Envelope Tracking, Direct Polar, and Hybrid Combinations (eBook, PDF)

[2] Vorteile der Envelope Tracking-Technologie, https://saure.org/cq-nrw/2017/09/29/was-ist-und-sind-die-vorteile-der-envelope-tracking-technologie/

[3] Earl W. McCune Jr.: Direct polar modulation has the right stuff, www.eetimes.com/direct-polar-modulation-has-the-right-stuff/

[4] Power-Design Power-Tipps von TI: Robert Kollman/Johann Wiesböck: Welche Auswirkungen hat das Envelope Tracking auf Netzteile? www.elektronikpraxis.vogel.de/welche-auswirkungen-hat-das-envelope-tracking-auf-netzteile-a-428621/ Informationen zu dieser und anderen Power-Lösungen gibt es außerdem auf www.ti.com/power-ca

[5] M. Vasi, O. Garcia, JA Oliver, P. Alou, D. Diaz, JA Cobos, Uni Politécnica de Madrid: Multilevel Power Supply for High-Efficiency RF Amplifiers, pdf im Netz, IEEE 1078-1089, Mai 2010 ◄