

# Schnellerer Test von HF-Leistungsverstärkern mit Keysights FPGA-basierten PXIe Measurement Accelerator

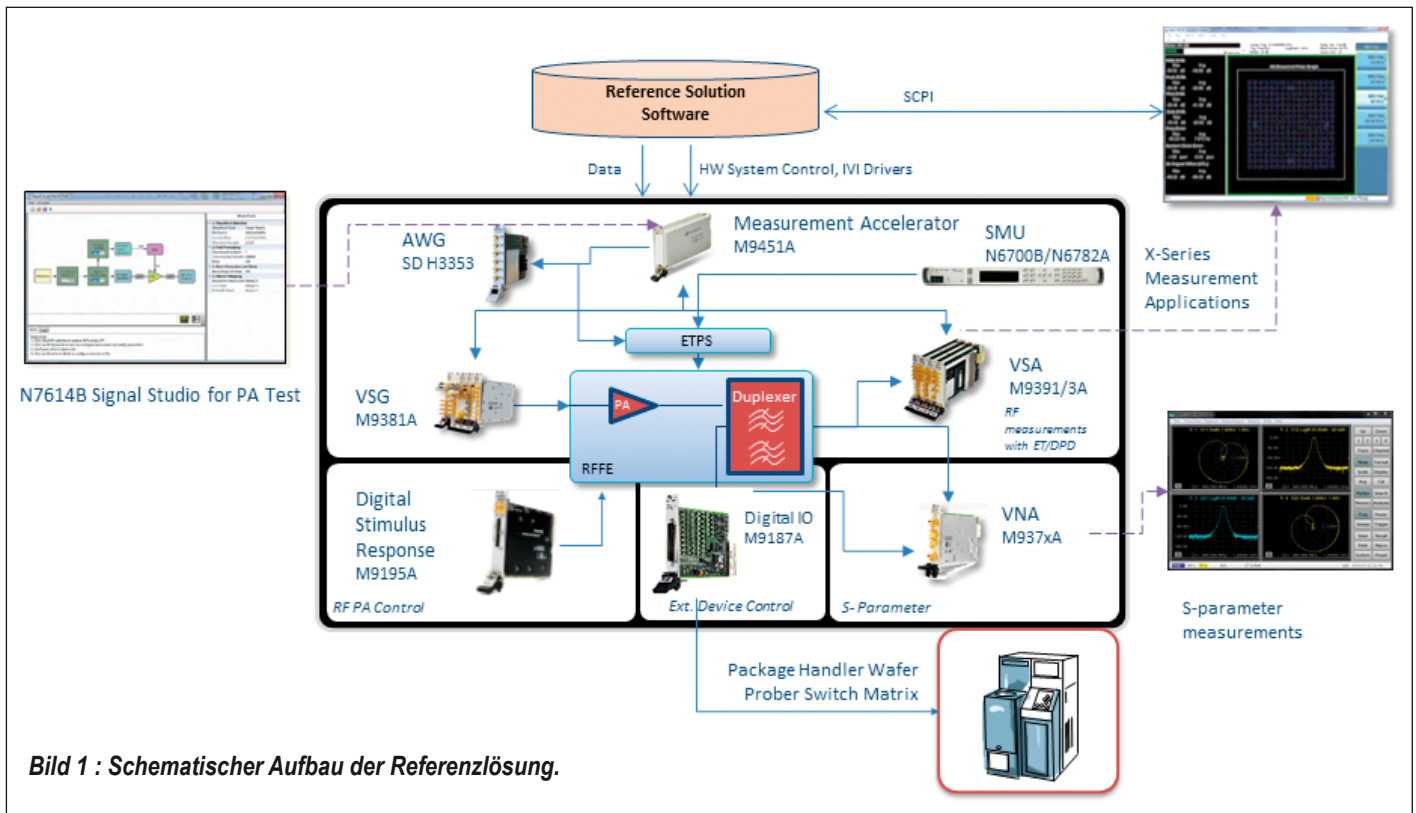


Bild 1 : Schematischer Aufbau der Referenzlösung.

**Die Kunden wollen bei ihren Mobilfunkgeräten eine immer längere Akkulaufzeit und einen höheren Datendurchsatz. Entwicklungs- und Testingenieure müssen daher immer neue Methoden finden, um Linearität, Bandbreite und Wirkungsgrad von Funkbaugruppen zu verbessern.**

Oftmals geht es darum, den Wirkungsgrad des HF-Leistungsverstärkers zu verbessern, der einer der größten Stromverbraucher in einem Mobiltelefon ist. Eine weitere neue Herausforderung an Design und Test von Leistungsverstärkern steht schon vor der Tür: Modulationsformate mit 160 MHz Bandbreite erfordern noch mehr Messbandbreite. Und natürlich sollen die Testzeiten immer weiter sinken, um den Durchsatz in der Produktion zu erhöhen.

Leistungsverstärker (PA, Power Amplifier) sind wesentliche Baugruppen in Mobilfunkgeräten – und sie arbeiten notwendigerweise nichtlinear. Diese Nichtlinearität verbreitert aber das Spektrum, das dann NachbarKanäle stört und möglicherweise die Normwerte für Emissionen außerhalb des Nutzbands nicht einhält. Auch im Nutzbands verursacht Nichtlinearität Verzerrungen, welche die Bitfehlerrate (BER) und den Datendurchsatz

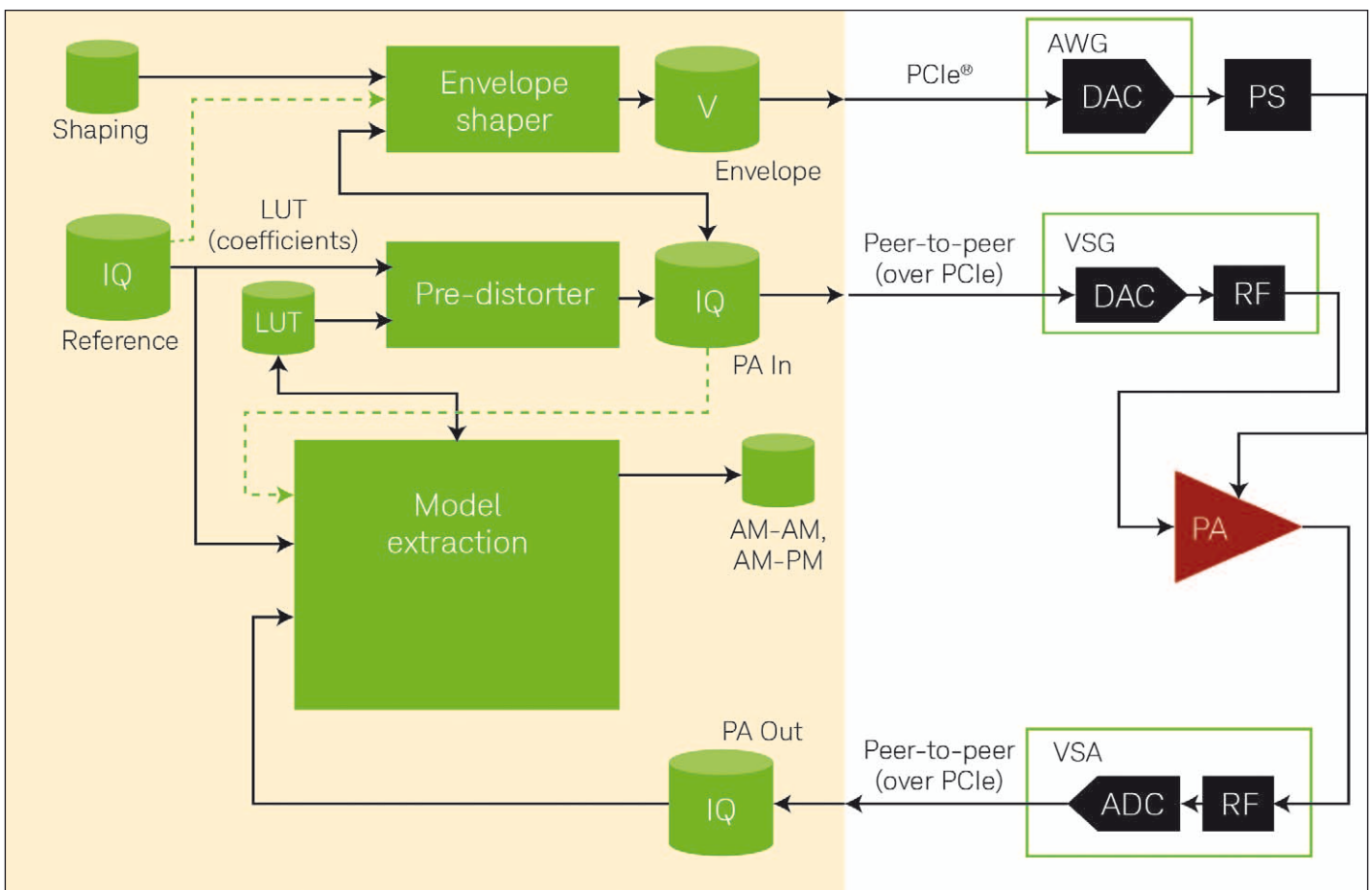
des Kommunikationssystems verschlechtern.

Bei neueren OFDM-Formaten ist der Scheitelfaktor der Ausgangsleistung (PAPR, Peak to Average Power Ratio) größer als früher. Pegelspitzen, die den Verstärker übersteuern, treten häufiger auf. Beides verschlechtert die Einhaltung des Sollspektrums, den Fehlervektor (EVM, Error Vektor Magnitude) und die Bitfehlerrate (BER, Bit Error Rate) des gesamten Signals. Manche Entwicklungsingenieure reagieren auf diese relativ seltenen Pegelspitzen dadurch, dass sie den Leistungsverstärker insgesamt niedriger aussteuern. Diese Methode ist aber aus Sicht des Wirkungsgrads eine Katastrophe: Derart angesteuerte Leistungsverstärker leisten typischerweise nur noch 10% bei praktisch gleichem Stromverbrauch, sie verschwenden somit praktisch 90% des Versorgungsstroms.

Heutige HF-Verstärker unterstützen typischerweise mehrere Betriebsarten, Frequenzbereiche und Modulationsverfahren. Man braucht daher für solche Verstärker immer mehr Tests, mehrere tausend Tests sind nicht ungewöhnlich. Mit neuen Verfahren wie etwa Scheitelfaktorreduktion (CFR, Crest Factor Reduction), digitaler Vorverzerrung (DPD, Digital Pre-Distortion) und Leistungspegelsteuerung (ET, Envelope Tracking) kann man zwar die Leistung und den Wirkungsgrad des Verstärkers verbessern, aber man braucht dann noch mehr und noch kompliziertere Tests, die in Entwicklung und Produktion zusätzlich Zeit kosten. Wenn der Verstärker eine größere Bandbreite unterstützt, erfordert eine DPD-Messung eine bis zu fünfmal größere Bandbreite, bis zu 1 GHz und darüber hinaus. Das verkompliziert die Tests zusätzlich.

Die Entwicklung hin zu höherer Integration der HF-Leistungsver-

Michele Lupo  
Keysight Technologies  
www.keysight.com



**Bild 2: Blockschaubild des PXIe Measurement Accelerator M9451A.**

stärker und der Frontend-Module (FEM) verbessert die Effizienz. Dazu unterstützt ein einziges Frontend-Modul mehr Frequenzbänder und Modulationsverfahren. Integriert man einen Modulator oder eine Stromversorgung, die dem Leistungspegel folgt, mit in das Frontend, spart man dadurch Bauvolumen im Mobilfunkgerät. Doch das erhöht wieder die Komplexität des Geräts, was dann wiederum mehr Tests erfordert. Das gleiche gilt beim Einbau von mehr Filter/Duplexerbänken, die eine breitere Palette von Frequenzbereichen unterstützen.

Zusammen mit einem Kunden, einem führenden Entwicklungsteam für HF-Leistungsverstärker, ist Keysight die wichtigsten Fragen beim Test angegangen und hat eine Referenzlösung für HF-Leistungsverstärker und Frontend-Module entwickelt. Die Lösung kombiniert Hard- und Software von Keysight und anderen Herstellern mit quellof-

finem Beispielcode, der für die Charakterisierung und den Test von HF-Leistungsverstärkern und FEM optimiert wurde.

Entscheidende Hardwarebausteine der Lösung sind ein Vektornetzwerkanalysator, ein Vektorsignalgenerator und ein Vektorsignalanalysator von Keysight, allesamt in PXIe-Bauform (siehe Grafik in Bild 1). Diese Geräte wurden nach Geschwindigkeit und Leistungsfähigkeit ausgesucht. Keysight Signal Studio (N7614B), eine Signalerzeugungssoftware für den Test von Leistungsverstärkern, liefert dieser Lösung das Rückgrat, nämlich den Testablauf, unter anderem mit Messtechniken für CFR, ET und DPD. Signal Studio bietet eine Reihe von vordefinierten Testsignalen, der Ingenieur kann aber auch extern erzeugte I/Q-Signale in Signal Studio importieren. Die quelloffene Steuersoftware der Referenzlösung erlaubt eine enge Synchronisierung zwischen der

Signalquelle und dem Arbiträr-signalgenerator; daraus resultiert ein optimaler zeitlicher Abgleich zwischen HF und den Signalen der Leistungspegelsteuerung.

Schon früh wurden Geschwindigkeitsverbesserungen erzielt, in dem man sowohl in der Signalquelle als auch im Empfänger auf FPGA-Technologie zurückgriff. Damit wurde die Zeit verringert, die die Servoschleifen brauchen, um die erforderliche Ausgangsleistung des Testobjekts zu erreichen. Da die Leistungsservos nicht deterministisch arbeiten, konnte man nicht auf den Listenmodus zurückgreifen, um die Ausgangsleistung basierend auf den HF-Eingangspiegeln zu korrigieren.

Der Listenmodus stellt typischerweise die schnellste Methode der Ausführung von Testschritten dar. Keysight entwickelte daher für seinen PXIe-Vektorsignalgenerator einen schnellen Abstimmmechanismus im Basisband, der programmge-

steuert Iterationen durchläuft, bis die korrekte Ausgangsleistung erreicht ist. Dieser Vorgang dauert typischerweise weniger als 200  $\mu$ s. Später implementierte Keysight in seinem PXIe-Vektorsignalanalysator M9391A eine Datenerfassungsmethode mit schneller Fourier-Transformation (FFT). In dieser Betriebsart errechnet das eingebaute FPGA des VSA aus den erfassten Daten eine FFT. Man kann aus ihr die Signalleistung für die Servoschleife entnehmen, mit den gleichen Daten aber auch zusätzlich das Nachbaranalleistungsverhältnis (ACPR) messen.

Einen noch größeren Geschwindigkeitszuwachs erzielte Keysight mit dem jüngst eingeführten PXIe Measurement Accelerator M9451A. Der Measurement Accelerator M9451A ist ein PPGA-basiertes PXIe-Modul. Setzt man ihn in der HF-Leistungsverstärker- und-FEM-Referenzlösung ein, taktet er in einigen zig Millisekunden

DPD- und ET-Messungen mit geschlossener und offener Schleife. Das ist gegenüber softwarebasierten Messungen eine Beschleunigung um den Faktor 100. Die verbesserte Version der Referenzlösung bringt einen größeren Durchsatz bei unverändert hoher Genauigkeit bei der Messung der S-Parameter, der harmonischen Verzerrung, der Leistung und der Demodulation.

In der folgenden Tabelle sind beispielhaft Zeiten aufgeführt, die die Referenzlösung für die Herausrechnung von Modellen für die digitale Vorverzerrung und ihre Anwendung braucht.

Der PXIe Measurement Accelerator M9451A erreicht seine hohe Geschwindigkeit mit einem schnellen FPGA Stratix V von Altera und einer speziellen Verarbeitungsgateway für DPD und ET mit schneller Peer-to-Peer-Datenübertragung zwischen den in der Referenzlösung verwendeten PXIe-Vektorsignalanalysator(en) und PXIe-Vektorsignalgenerator(en). Aus dem DPD-Signal wird hardwarebeschleunigt das ET-Signal erzeugt, in ähnlicher Weise erfolgt eine schnelle Datenübertragung zum Arbiträrsignalgenerator über die PXI-Rückwand.

Der farblich hinterlegte Bereich in Bild 2 zeigt die wesentlichen Funktionen der Hauptgruppe im PXIe Measurement Accelerator M9451A bezüglich digitaler Vorverzerrung (DPD) und Pegelsteuerung (ET). Die Datenzyklen stehen für zugeordnete Blöcke von IQ-Daten im Speicher des M9451A; Rechtecke stehen für Algorithmen, die im Beschleuniger eingebaut sind. Jedem Datenblock ist ein Datenhandle zugeordnet, jedem Algorithmen-Rechteck eine API-Methode. Eine Testsoftware steuert die Verarbeitung der Daten, in dem sie dafür sorgt, dass die Datenhandles der jeweils passenden API-Methode übergeben werden. Die schnelle

	Ohne M9451A		Mit M9451A	
	Modell herausrechnen	Modell anwenden	Modell herausrechnen	Modell anwenden
5 MHz	415,4 ms	48,7 ms	4,9 ms	21,8 ms
20 MHz	1676,1 ms	172,5 ms	6 ms	63 ms

**Tabelle 1: Als Quellsignale dienten 500 µs lange Abschnitte aus einem 5-MHz- und einem 20-MHz-LTE-Signal. Mit „Herausrechnen“ ist die Zeit gemeint, die zur Analyse der VSA-Messdaten und zum Herausrechnen der DPD-LUT-Koeffizienten benötigt wird. Mit „Anwenden“ ist die Zeit gemeint, die benötigt wird, um das neu vorverzerrte Signal wieder in den VSG zurückzubringen.**

Datenübertragung zwischen dem Speicher des M9451A und der Hardware des PXIe-Vektorsignalgenerators M9381A erfolgt über Peer-to-Peer-(P2P)-PCI-Express.

Das ideale Referenzsignal wird zunächst nicht-vorverzerrt in den Speicher des PXIe-VSG-ARB M9381A geladen und dann per P2P zum M9451A übertragen. Die Algorithmen zum Herausrechnen des Modells erstellen eine Tabelle (LUT, Look Up Table) oder zugeordnete Koeffizienten, aus denen der Vorverzerrer dann ein vorverzerrtes Signal im Datenzyklus „PA IN“ erzeugt. Die vorverzerrten Signaldaten werden dann via PCI direkt in den ARB-Speicher des VSG übertragen. Die Übertragung von Messdaten von der PXIe-Vektorsignalanalysator-Hardware M9391A oder M9393A zur Hardware M9451A erfolgt via P2P PCI Express.

Um die Portierung der Testsoftware zu vereinfachen, unterstützt das API von Keysight Signal Studio die Programmierschnittstelle des Measurement Accelerators. Beispielsweise arbeitet der Measurement Accelerator mit der gleichen Tabelle (LUT) und den gleichen polynomialen Methoden zur Vorverzerrung (MOP, Memory Order Polynomial), sowohl in den Betriebsarten mit offener Schleife als auch denen mit geschlossener Schleife.

Diese kurzen Testzeiten werden erreicht, ohne dass man Kompromisse bei Genauigkeit oder

Reproduzierbarkeit eingehen muss. Die Referenzlösung von Keysight liefert Programmierbeispiele für Testtechniken, die Reproduzierbarkeit und Testzeit bei der Durchführung von Leistungsmessungen optimieren

### Neuer PXIe-Vektortransceiver beschleunigt den Produktionstest

Der PXIe-Vektortransceiver (VXT) Keysight M9420A hat das Ziel, den Durchsatz beim Test von HF-Leistungsverstärkern in der Produktion auf gleicher Grundfläche mehr als zu verdoppeln. Ein einzelnes PXIe-Chassis kann mit bis zu vier 4-Slot-VXTs bestückt werden. Wahlweise kann ein kundenspezifisches System mit DIO-Karte und 1-Slot-VNA-Modul entwickelt werden.

Um die Entwicklungszeit für ein Testsystem zu minimieren und die Zeit bis zur ersten Messung zu verkürzen, kann der VXT mit der PA-Referenzlösung eingesetzt werden. Die eingebaute Servoroutine bestimmt genau die letztendliche Ausgangsleistung des Leistungsverstärkers und entscheidet, ob das Gerät versandfertig ist. Herkömmliche Methoden zur Leistungsmessung arbeiteten entweder mit gewobbelten oder mit I/Q-Erfassungen mit nachfolgender Analyse per Software. Man kann eine softwarebasierte Analyse zwar mit einem schnelleren Prozessor beschleunigen, aber niemals in dem Maß, das mit einer Hardwarelösung erreichbar ist. Man

arbeitet daher neuerdings mit FPGA-basierten Messungen, mit denen auch der schnellste verfügbare Prozessor nicht mithalten kann. Der VXT mit seiner superschnellen PXI-Bauform in Kombination mit einer Echtzeit-FFT, die ein FPGA errechnet, reduziert die Gesamttestzeit wie in der folgenden Tabelle gezeigt.

### Zusammenfassung

Systemarchitekten von Kommunikationssystemen, Entwickler von HF-Leistungsverstärkern und Testingenieure, die den Wirkungsgrad von Leistungsverstärkern erhöhen wollen, sollten die Mess- und Analysetechniken ins Auge fassen, die Keysights RF-Verstärker- und Frontend-Referenzlösung bietet.

Sie besteht aus einer Kombination von Messhardware von Keysight und einer branchenweit führenden Messsoftware. Die Lösung stellt spezielle Testmethoden für digitale Vorverzerrung und Leistungspegelsteuerung bereit und bietet einen bewährten Ansatz für die schnellere Entwicklung von Testsystemen und für größeren Durchsatz von der Entwicklung bis hin zur Produktion. In Verbindung mit Keysights neuem PXIe Measurement Accelerator M9451A ermöglicht sie anspruchsvolle Messungen wie Leistungspegelsteuerung, digitale Vorverzerrung und mehr mit bislang unerreichter Schnelligkeit und Genauigkeit.

	Wobbelerfassung/ Verarbeitung per Software	Schnelle I/Q-Erfassung / Verarbeitung hard- und softwarebasiert	beschleunigte Verarbeitung mit FPGA / VXT PXIe Vektortransceiver
Leistungsservo WCDMA	70 ms	20 ms	5,5 ms
Leistungsservo FDD LTE	110 ms	20 ms	5,5 ms

**Tabelle 2: Das FDD-LTE-Signal hatte 10 MHz. Die Testzeit ist angegeben einschließlich Einrichtung und Messzeit für eine Iteration des Leistungsservos.**