

HF-Spitzenleistungssensoren ermöglichen eine leistungsstarke statistische CCDF-Analyse für fortschrittliche drahtlose Systeme

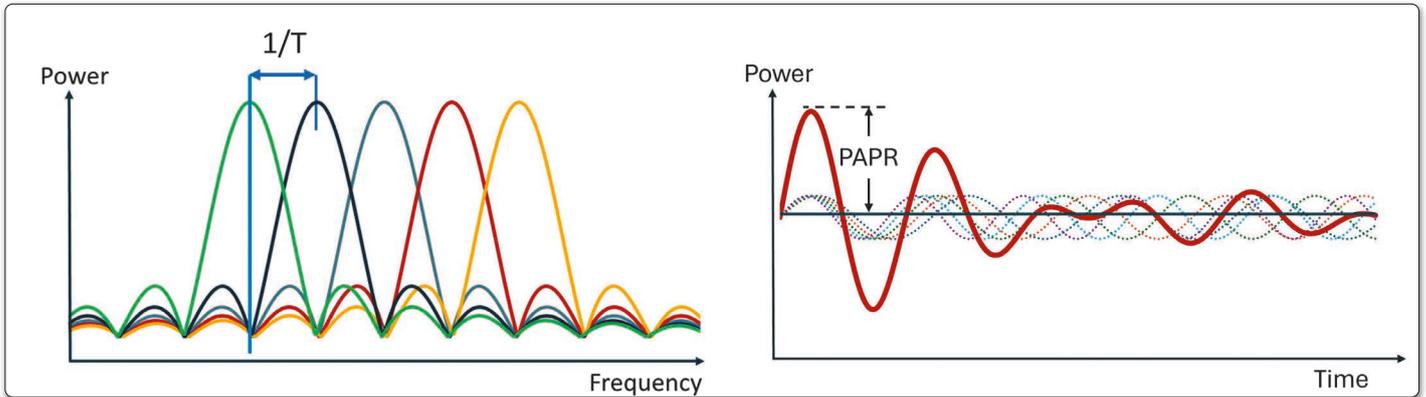


Bild 1: Die Natur eines OFDM-Signals im Frequenzbereich (links) und im Zeitbereich (rechts)

Dieser Artikel beschreibt die Grundprinzipien der Crest-Faktor-Messungen und CCDF-Statistikanalysen und die damit hervorgerufenen Herausforderungen.

Außerdem, wie Spitzenleistungssensoren Scheitelfaktorwerte erfassen, Ergebnisse des Spitzen-zu-Durchschnitts-Leistungsverhältnisses (PAPR) ermitteln und CCDF-Kurven effektiv aufzeichnen können. Zudem werden die wichtigsten Sensorfunktionen aufgeführt, die bei der Auswahl der besten Lösung zu berücksichtigen sind.

Herausfordernd

5G-Systeme basieren, wie andere auch, auf Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) und High-Order Modulation (m-QAM) für schnelle Datenübertragung und spektrale Effizienz. OFDM/m-QAM-Signale haben hohe Scheitelfaktorwerte mit hohen Spitzen im Verhältnis zu den durchschnittlichen Leistungspegeln, wie in Bild 1 dargestellt.

In Kombination mit der Nichtlinearität des Leistungsverstärkers führt ein hoher Crest-Faktor zu erheblichen Herausforderungen wie z.B. Kappen der Wellenform und Leistungseinstreuung in benachbarten Kanälen. Mit ihrer Fähigkeit, komplementäre kumulative Verteilungsfunktionen (CCDF) zu

erzeugen, ermöglichen HF-Spitzenleistungssensoren eine detaillierte Charakterisierung von Leistungsverstärkern, um die Auswirkungen nichtlinearen Verhaltens auf solche Systeme zu bestimmen, die hochentwickelte Modulationstechniken verwenden.

Grundlagen von Crest-Faktor und CCDF

Crest-Faktor und PAPR werden oft synonym verwendet. In diesem Fall unterscheiden wir beide, indem wir den Crest-Faktor als den Maximalwert des PAPR definieren.

Der Crest-Faktor ist ein wichtiger Parameter, der wertvolle Einblicke in die Signaleigenschaften bietet. Er ist ein einzelner numerischer Wert, der die Spitzenleistung (V_{peak}) einer Wellenform mit ihrer Durchschnitts-

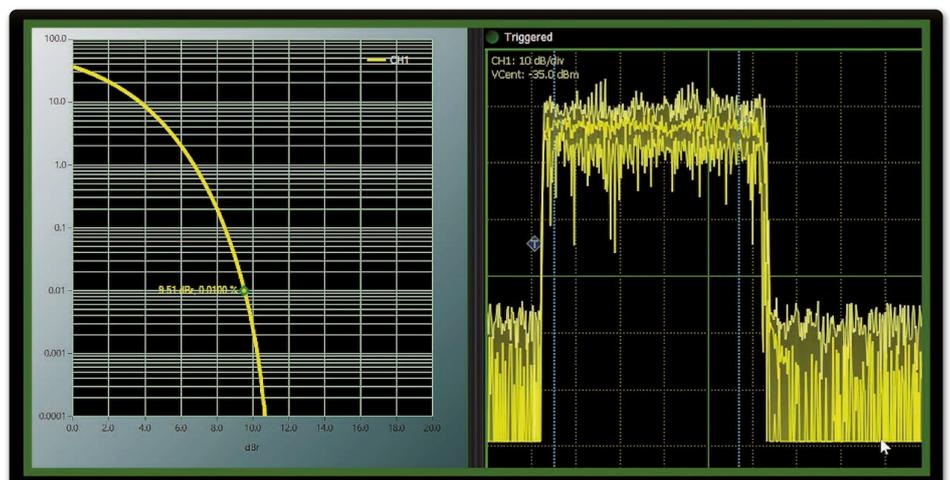


Bild 2: Ein CCDF-Plot (links) eines Burst-modulierten Signals (rechts)

Autor:
Bob Buxton
Product Manager
Boonton Product Line
Maury Microwave
<https://maurymw.com>

Ansprechpartner:
municom Vertriebs GmbH
www.municom.de

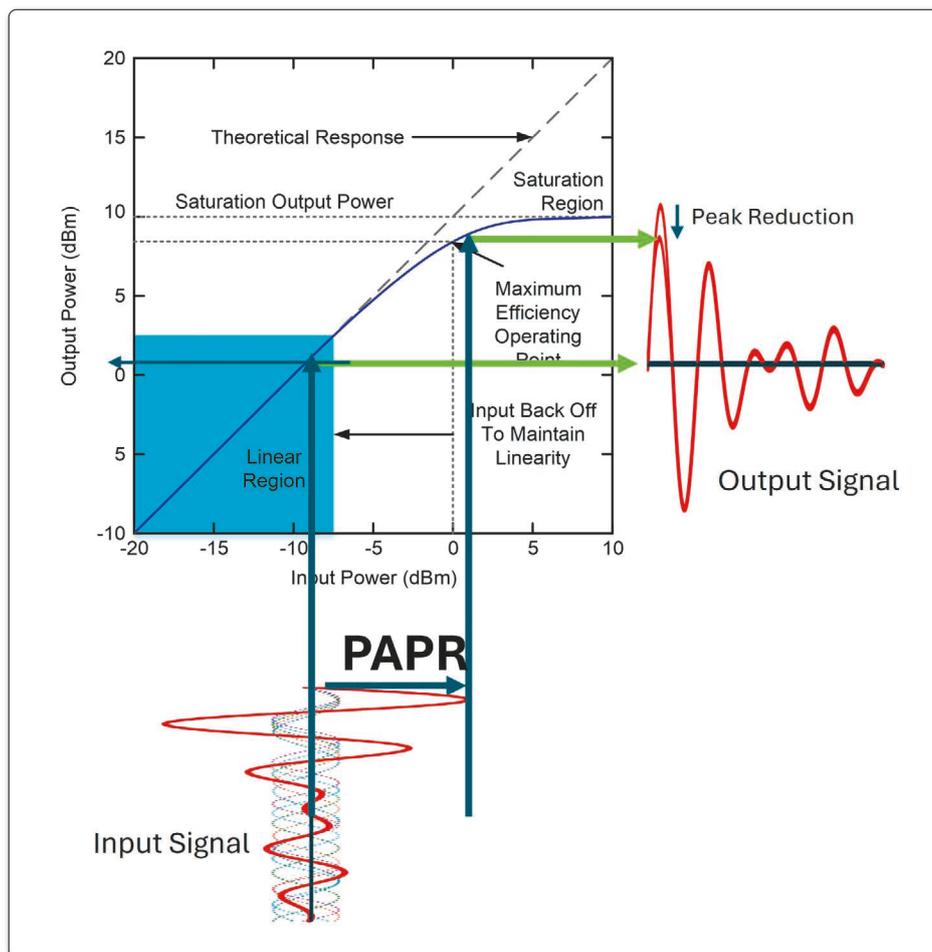


Bild 3: Die Nichtlinearität des Verstärkers beeinflusst den PAPR

leistung (V_{average}) vergleicht. Er wird entweder als linearer oder logarithmischer Wert ausgedrückt.

$$\text{Crest Factor} = V_{\text{peak}}/V_{\text{average}}$$

$$\text{Crest Factor (dB)} = 20 \log (V_{\text{peak}}/V_{\text{average}})$$

Ein niedriger Crest-Faktor bedeutet einen relativ kleinen Unterschied zwischen der höchsten Spitze des Signals und seinem durchschnittlichen Leistungspegel.

Beispiele hierfür sind Gleichstromwellenformen (1 oder 0 dB) und reine Sinuswellen (1,414 oder 3,01 dB).

Hohe Scheitelfaktorwerte, wie sie beispielsweise bei OFDM-Systemen auftreten, deuten auf ein dynamisches Signalverhalten mit Signalspitzen hin, die die durchschnittliche Leistung der Wellenform deutlich übersteigen.

Um einen tieferen Einblick zu erhalten, ist es notwendig, über den Crest-Faktor hinauszudenken und den Bereich der PAPR-Werte eines Signals zu betrachten, und zwar im Hinblick auf die Eintrittswahrscheinlichkeit. Hier kommt CCDF ins Spiel. CCDF ermöglicht eine gründlichere Analyse als

eine einzelne Crest-Faktor-Messung. Ein CCDF-Diagramm zeigt die auf der y-Achse die Wahrscheinlichkeit, dass der PAPR eines Signals bei oder über einem bestimmten Wert entlang der x-Achse liegt, s. Bild 2. Wir sehen ein Burst-moduliertes Signal und die entsprechende CCDF-Kurve. Das Diagramm auf der linken Seite hebt zwei Werte am grünen kreisförmigen Cursor hervor: 9,5 dB als PAPR-Wert und 0,01% als interessierender Prozentsatz der Wahrscheinlichkeit. In diesem Fall ist der PAPR des Signals nur für einen kurzen Zeitraum (0,01% der Zeit) größer oder gleich 9,5 dB, was darauf hinweist, dass der PAPR des Signals vorwiegend, 99,99% der Zeit unter 9,5 dB liegt.

Der Wert der statistischen CCDF-Analyse

CCDF ist für die Analyse von Signalen mit hohem Crest-Faktor von entscheidender Bedeutung, da solche Signale schwierig zu handhaben, zu manipulieren und zu verarbeiten sind.

Laut einem Hersteller von Leistungsverstärkern „übertrifft die CCDF-Kurve bei der Betrachtung komplexer digitaler Wellenformen und Klasse-AB-Verstärker andere

Methoden als Mittel zur Analyse der Kompressionseigenschaften des Verstärkers und der Spitzenleistungsfähigkeiten.“

Da CCDF eine so effektive Charakterisierungstechnik darstellt, soll hier ein Blick auf einige entscheidende Herausforderungen geworfen werden, die es bewältigen kann:

• Nichtlinearität des Verstärkers

Im linearen Bereich haben Verstärker eine konstante Verstärkung und erzeugen ein Ausgangssignal, das direkt proportional zum Eingangssignal ist. Wenn Signale den linearen Betriebsbereich überschreiten, besteht zwischen dem Eingangs- und Ausgangssignal eine komplexere Beziehung.

Beispielsweise können Verstärker in den Kompressionszustand übergehen, bei dem die Verstärkung mit zunehmender Eingangsleistung abnimmt, oder in die Sättigung, bei welcher das Ausgangssignal seine maximale Grenze erreicht hat und sich auch bei weiter steigender Eingangsleistung nicht mehr ändert.

Zu den verschiedenen unerwünschten Effekten gehört auch, dass die Nichtlinearitäten des Verstärkers die Signaltreue verringern, Intermodulationsverzerrungen (IMD) auftreten und ein Leistungsverlust benachbarter Kanäle auftreten kann.

• Wellenform-Clipping

Die extremen Leistungsspitzen eines OFDM-Signals können den linearen Betriebsbereich eines Verstärkers überschreiten, was dazu führt, dass Teile des Signals abgeschnitten werden. Dieses Phänomen verzerrt die wahre Form der Wellenkurve und führt zu unerwünschten Artefakten, die die Signalqualität beeinträchtigen können. CCDF ist ein nützliches Tool zur Minderung von Clipping-Effekten, indem es die Wahrscheinlichkeit verschiedener PAPR-Werte beurteilt und bewertet, wie sich gekappte Leistungsspitzen auf die Leistung auswirken. Die Reduzierung des PAPR eines OFDM/m-QAM-Signals unter einen akzeptablen Mindestwert kann zu einer Zunahme der Symbolfehler führen. Aus diesem Grund lohnt es sich, dieses Phänomen genauer zu betrachten.

Bild 3 zeigt, wie das Clipping erfolgt. Die Grafik zeigt die Verstärkungskurve eines Verstärkers. Der lineare Bereich unten links ist blau schattiert. Bei Eingangspegeln über -8 dBm wird die Verstärkungskurve zunehmend nichtlinear, bis sie bei einer Eingangsleistung von 5 dBm den gesättigten Bereich erreicht. Das zusammengesetzte OFDM-Eingangssignal wird auf diese Verstärkungskurve angewendet, wobei die durchschnittliche

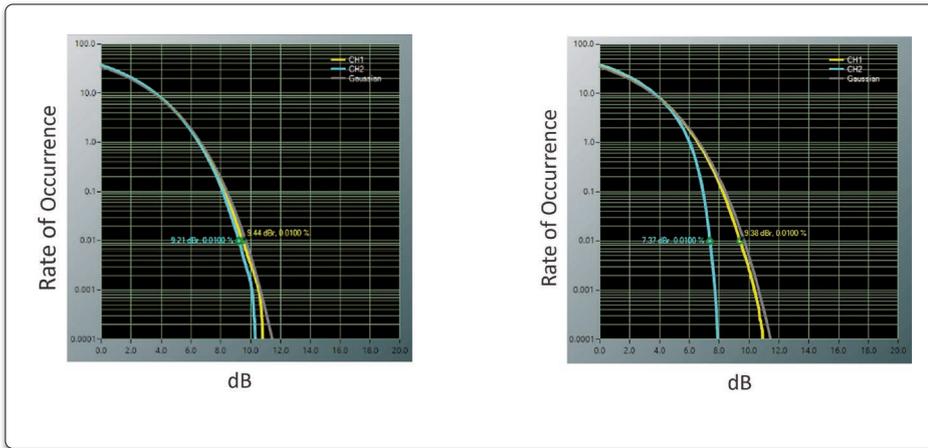


Bild 4: CCDF-Kurven zur Beschreibung des linearen (links) und nichtlinearen (rechts) Verstärkerbetriebs

liche Eingangsleistung -9 dBm beträgt, mit einem Spitzenwert bei 1 dBm, was einen PAPR von 10 dB ergibt.

Das Ausgangssignal hat einen durchschnittlichen Leistungspegel von 1 dBm und die Ausgangsspitze beträgt ~8 dBm, was einem PAPR von 7 dB entspricht.

Aufgrund der Nichtlinearität des Verstärkers wurde die Spitze im Verhältnis zur durchschnittlichen Leistung des Signals um 3 dB reduziert.

CCDF-Kurven können nichtlineares Verhalten in Verstärkern aufdecken. Die beiden Diagramme in Bild 4 zeigen ein Eingangssignal von Kanal 1 (gelbe Kurve), ein Ausgangssignal von Kanal 2 (blaue Kurve) und PAPR-Werte für einen interessierenden Wahrscheinlichkeitsprozentsatz von 0,01%.

Ein im linearen Bereich betriebener Verstärker weist nahezu identische CCDF-Kurven auf. Im linken Diagramm weisen die Eingangs- und Ausgangskurven für 0,01% der Zeit ähnliche PAPR-Werte von 9,4 dB bzw. 9,2 dB auf; in 99,99% der Fälle folgen sie nahezu identischen Pfaden. Die Grafik auf der rechten Seite zeigt die Situation, in der der Eingangs-Backoff reduziert wurde, was dazu führt, dass Signalspitzen in den nichtlinearen Bereich gelangen und der Ausgangs-PAPR auf 7,4 dB bei 0,01% sinkt.

CCDF-Testaufbau mit HF-Spitzenleistungssensoren

Der Entwickler kann die Verstärkerleistung charakterisieren, indem er den PAPR-Werte erfasst, CCDF-Kurven zeichnet und mithilfe leistungsstarker Spitzenleistungssensoren

wichtige Messungen wie Spitzen-, Durchschnitts- und Minimalleistung durchführt.

Mit detaillierter Erfassung des Signalprofils und genauen Ergebnissen der momentanen Hüllkurvenleistung sind Spitzenleistungssensoren das ideale Testinstrument für die statistische CCDF-Analyse.

Bild 5 zeigt, wie Spitzenleistungssensoren in einen Testaufbau integriert werden, um die Leistung eines Verstärkers zu analysieren. Ein Sensor (P1) erfasst den ankommenden Leistungspegel, während ein anderer Sensor (P2) den Ausgangsleistungspegel erfasst. Beide melden die Ergebnisse an einen Laptop mit Software, die die Sensoren steuert und die Ergebnisse anzeigt. Zusätzlich zu einer USB-Verbindung zu einem steuernden PC bieten einige HF-Leistungssensoren auch Kompatibilität mit HF-Leistungsmessgeräten der Laborgeräteklasse.

HF-Spitzenleistungssensoren zur Erfassung von Eingangs- und Ausgangssignalen und Sensorsteuerungs-Software zur Messwertanzeige und -analyse

Innerhalb der Sensorsteuerungs-Software ermöglichen verschiebbare Marker in der Trace-Ansicht eine präzise Kontrolle und Steuerung des Messbereichs. Der Benutzer kann die Markierungen genau auf den Zielbereich für die Analyse anpassen. Die Steuerung der Datenerfassung stellt sicher, dass das CCDF-Diagramm auf jeden spezifischen Anwendungsfall zugeschnitten wird und Faktoren wie eine gewünschte Wahrscheinlichkeit oder einen PAPR-Wert an der Cursorposition zeigt.

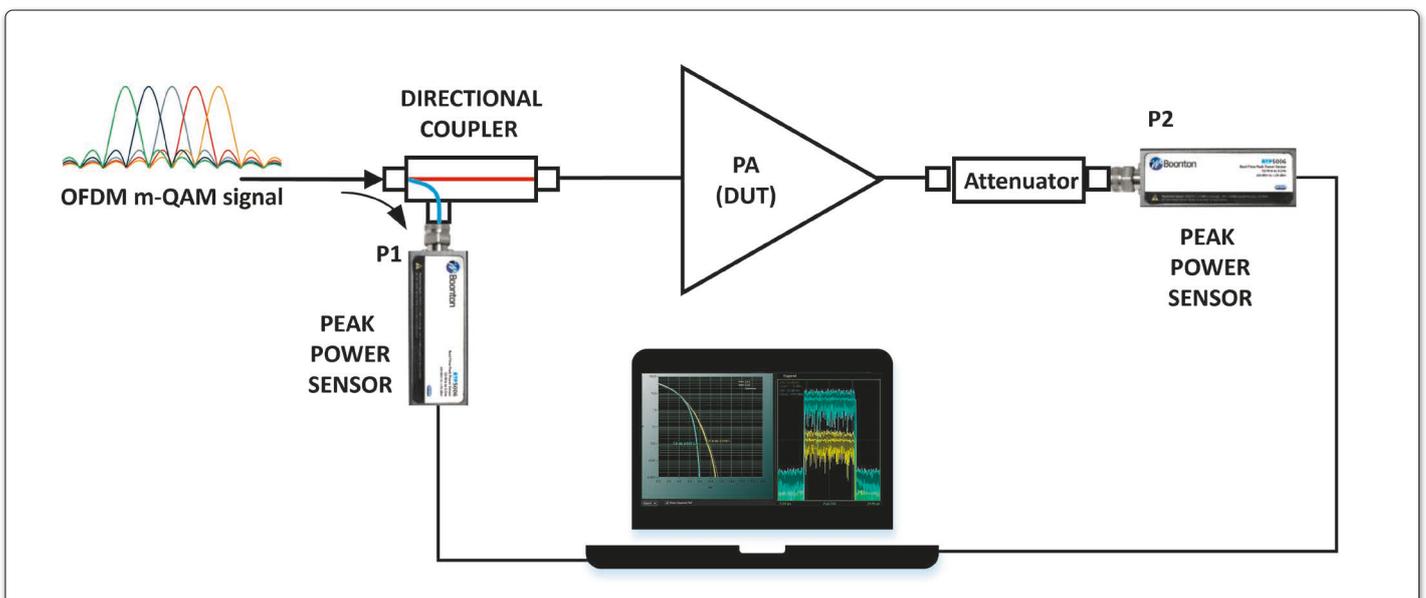


Bild 5: Ein Testaufbau mit einem Leistungsverstärker als Prüfling (DUT)

Ein anpassbares Fenster statistischer Messungen liefert schnell und effizient die gewünschten Ergebnisse und zeigt Parameter wie PAPR bei verschiedenen Wahrscheinlichkeiten, Daten des Cursorpunktes (Leistung und Prozentsatz) und Leistungsmessungen wie Durchschnitt, absolutes Minimum und Maximum an (Bild 6).

Wesentliche Funktionen des HF-Leistungssensors für hochpräzise und zuverlässige Ergebnisse

Zusätzlich zur leistungsstarken statistischen Analyse ermöglicht der Einsatz eines HF-Leistungssensors mit einer Reihe von Funktionalitäten viele umfassende und aussagekräftige Tests für verschiedene praktische Anwendungen, wie Radar, Wi-Fi, Mobilfunk, Satellitenkommunikation und 5G.

Zu den wichtigsten Eigenschaften und Funktionen eines HF-Spitzenleistungssensors gehören nach dem neuesten Stand der Technik:

• Anstiegszeit von nur 3 ns

Radar, 5G-Zeitduplex (TDD) und andere Anwendungen nutzen Signale mit schnell ansteigenden HF-Hüllkurven. Eine genaue Verfolgung erfordert daher Sensoren mit schnellen Anstiegszeiten, um auf diese Signaländerungen reagieren zu können.

• Messgeschwindigkeit von bis zu 100.000 Punkten pro Sekunde

Schnelle Messungen ohne Lücken oder Latenz erhöhen die Genauigkeit und stellen die Erfassung wichtiger Wellenformereignisse sicher.

• Videobandbreite von bis zu 195 MHz

Die große Videobandbreite (VBW) gewährleistet die Integrität der Pulsformigenschaften und der Messungen von Momentanleistung an modulierten Signalen. Diese Funktion ist für Systeme, die mit großen Kanalbandbreiten arbeiten, von entscheidender Bedeutung.

• Impulsbreite von nur 10 ns

HF-Leistungssensoren mit der Fähigkeit, Impulse kurzer Dauer zu analysieren, erlauben den Einsatz bei hochauflösenden Radarsystemen, die schmale Impulsbreiten verwenden, um feine Details zwischen nahe beieinander liegenden Zielen zu unterscheiden.

• effektive Abtastrate bis zu 10 GSa/s

Eine schnelle effektive Abtastrate erfasst die echte und exakte Wellenform. Sich schnell ändernde Wellenformen erfordern diese schnelle Erfassung von HF-Signaldatenpunkten und die Verarbeitung der Messwerte während des Tests.

• Zeitauflösung bis zu 100 ps

HF-Leistungssensoren mit feiner Zeitauflösung können Wellenformdetails in unglaublich kurzen Zeitintervallen auflösen und so die Charakterisierungsgenauigkeit verbessern.

• Mehrkanalmessungen

Die verschiedenen Send- und Empfangsvorgänge in MIMO-Systemen (Multiple Input, Multiple Output) erfordern Sensoren mit synchronisierten Mehrkanal-HF-Leistungsmessfunktionen.

Zeichnen von CCDF-Kurven mit HF-Spitzenleistungssensoren

Dynamische Wellenformen mit hohem Crest-Faktor belasten Systemkomponenten und erfordern fortschrittliche Testmethoden wie CCDF, um das Signalverhalten zu analysieren und die Leistung zu optimieren. HF-Spitzenleistungssensoren wie die RTP5000-Serie erlauben diese leistungsstarke statistische Analyse zusammen mit anderen wichtigen Funktionen zur umfassenden Bewertung moderner drahtloser Systeme.

Referenz:

G. Bollendorf, "Using CCDF as a Method of Measuring P1dB and P3dB," online available: www.empowerrf.com/amplifier-notes/Measuring-P1dB.php ◀

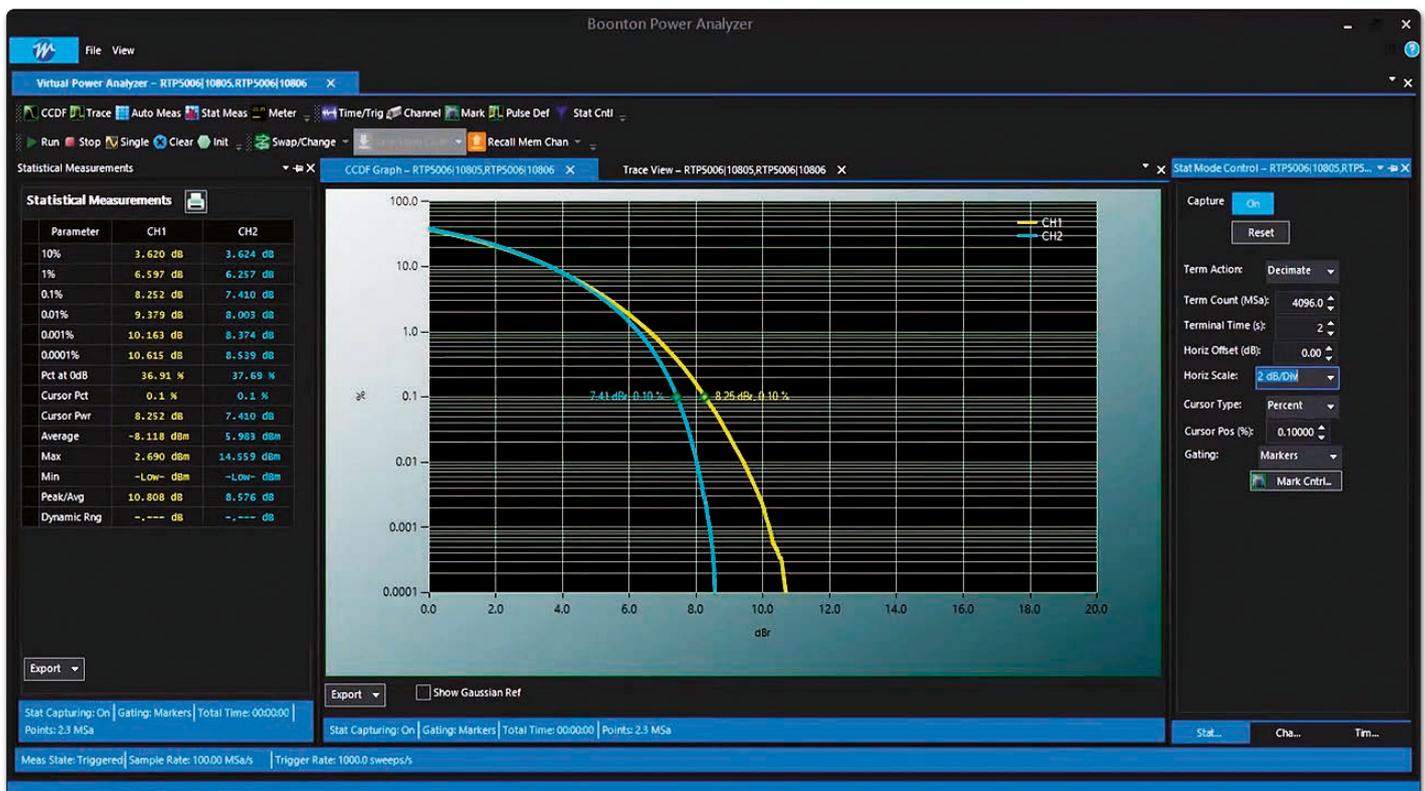


Bild 6: Ein Blick auf die Benutzeroberfläche eines HF-Spitzenleistungssensors mit statistischen Eingangs- und Ausgangsergebnissen (links), Eingangs- und Ausgangs-CCDF-Kurven des Verstärkers (Mitte) und einem Bedienfeld für die Datenerfassung (rechts)