



Produkte: DTV-Sender R&S[®] NV7000, NV7001, NV8200, SV7000, SV7002, SV8000
Messgeräte R&S[®] EFA, FSP, FSU

Der Crest-Faktor bei DVB-T-(OFDM-) Sendeanlagen und seine Auswirkung auf die Dimensionierung der Leistungskomponenten

Application Note 7TS02

Leistungsspitzen von 20 dB über dem Effektivwert – gibt's das? Durchaus, denn seit Einführung der digitalen Sendetechnik ist mit diesen Größenordnungen zu rechnen. „Damit's nicht kracht“, sind die HF-Leistungskomponenten entsprechend den zu erwartenden Spannungsspitzen zu dimensionieren. Gelingt es, den nur statistisch greifbaren Crest-Faktor, also das Verhältnis aus Spitzen- zu Effektivwert, ausreichend genau zu bestimmen, so ist die Frage der Dimensionierung der Leistungskomponenten gelöst. Die vorliegende Applikationsschrift will hierzu beitragen, indem sie mit den grundlegenden Formeln, ein wenig Statistik sowie einer praxisbezogenen Betrachtung der limitierenden Faktoren realer Sendeanlagen das notwendige Rüstzeug bereitstellt.



Inhalt

1	Einführung.....	2
2	Bestimmung und Anwendung des Crest-Faktors	3
	Der Crest-Faktor eines modulierten HF-Signals	3
	Der Crest-Faktor mehrerer überlagerter Signale.....	5
	Crest-Faktor-Messung	6
	Ausgangssignal eines DVB-T-Senders	10
	Ausgangsbandpass	12
	Zusammenschaltung mehrerer Sender auf eine Antenne.....	13
3	Der Crest-Faktor bei der Erzeugung eines DVB-T-Signals.....	18
	Signalerzeugung im Basisband	18
	Modulation der Trägerfrequenz	21
4	Zusammenfassung	24
	Hüllkurvenbetrachtung.....	24
	Trägerbetrachtung	24
	Angabe des Crest-Faktors	25
	Der Crest-Faktor bei großen Sendeanlagen	25
5	Literatur	26
6	Weitere Informationen.....	26

1 Einführung

Derzeit werden für die Umstellung auf digitales terrestrisches Fernsehen zahlreiche neue Sendeanlagen errichtet. Bedingt durch die Modulationsart OFDM treten dabei hohe Crest-Faktoren beim HF-Signal auf, die deutlich über den Werten von Analogsendern liegen. Bei einem einzelnen Sender lässt sich zwar dieses Verhältnis aus Spitzenleistung zu effektiver Ausgangsleistung begrenzen. Werden jedoch mehrere Sender zusammenschaltet, tritt mit jedem zusätzlichen Sender wieder eine Erhöhung ein. Die Spitzenleistungen können dabei je nach Sendeanlage mehr als das Hundertfache der thermischen Leistung erreichen. Die Dimensionierung der HF-Leistungskomponenten einer Sendeanlage (Antennenweichen, Koaxialleitungen und Antennen) kann dann nicht mehr alleine nach thermischen Gesichtspunkten erfolgen. Oft entscheiden kurze Spannungsspitzen, die statistisch betrachtet nur sehr selten auftreten, über Größe und Bauform dieser HF-Komponenten.

Für die Ermittlung von Crest-Faktoren gibt es neben der Berechnung mehrere Messverfahren, die jedoch aufgrund von verschiedenen Betrachtungsweisen zu scheinbar unterschiedlichen Ergebnissen führen können.

Insbesondere die Messung hoher Crest-Faktor-Werte über 12 dB (P_{PEP}/P_{AVG}) gestaltet sich sehr schwierig. Hier kommen neben einer begrenzten Messdynamik häufig statistische Effekte zum Tragen. Leistungsspitzen, die aufgrund der statistischen Wahrscheinlichkeit nur alle Wochen, Monate oder Jahre auftreten, lassen sich schon wegen der erforderlichen Messzeit messtechnisch nicht mehr sinnvoll ermitteln.

Für die Kleinsignalbetrachtung bezüglich Bittfehlerrate, MER und der Intermodulationsprodukte sind hohe Crest-Faktoren ohne Bedeutung. Ganz anders sieht es dagegen auf der Leistungsseite aus: Hier können die mit den Leistungsspitzen einhergehenden hohen Spannungen zu einem Überschlag und eventuell zu einem stehenden Lichtbogen in der Sendeanlage führen.

Die scheinbar unterschiedlichen Ergebnisse bei der Ermittlung des Crest-Faktors, der ganz allgemein als das Verhältnis von Spitzenwert zu Effektivwert definiert ist, erfordern ein tieferes Verständnis der Signalaufbereitung eines Senders und der relevanten Messmethoden. Mit dem entsprechenden Wissen lässt sich erkennen, dass die unterschiedlichen Betrachtungsweisen durchaus ihre Berechtigung haben.

Der Inhalt dieser Applikationsschrift ist zweigeteilt: Der erste Teil (Kapitel 2) befasst sich mit der Bestimmung des Crest-Faktors und den Folgen für die Dimensionierung der Senderkomponenten. Der zweite Teil (Kapitel 3) liefert zusätzliches Hintergrundwissen zur Vertiefung. Am Beispiel eines DVB-T-Signals im 2K-Modus erfolgt eine genaue Beschreibung für OFDM-Signale, von der Erzeugung bis hin zum modulierten HF-Signal.

2 Bestimmung und Anwendung des Crest-Faktors

Der Crest-Faktor eines modulierten HF-Signals

Der Crest-Faktor CF oder Scheitelfaktor eines Signals wird bspw. aus dem Verhältnis Spitzenspannung (Scheitelwert) \hat{U} zu Effektivwert U berechnet. Bei einem Sinus-Signal ergibt sich durch das bekannte Verhältnis \hat{U}/U von $\sqrt{2}$ entsprechend ein Crest-Faktor CF von $\sqrt{2}$ bzw. 3,01 dB.

Zur Übertragung von Information wird in der drahtlosen Nachrichtentechnik ein Sinus-Signal (Träger) mit einem Basisbandsignal moduliert, in dem die Information enthalten ist. Ändert sich durch die Modulation die Amplitude des Trägers, vergrößert sich auch der Crest-Faktor. Der zeitliche Verlauf dieser Trägeramplitude wird bei modulierten Signalen als Hüllkurve (*envelope*) bezeichnet.

Bei einem modulierten HF-Signal können nun je nach Betrachtungsweise zwei verschiedene Crest-Faktoren ermittelt werden, die sich um 3,01 dB unterscheiden:

Die erste Möglichkeit besteht darin, den Crest-Faktor aus der höchsten vorkommenden Amplitudenspitze des modulierten Trägersignals und dem Effektivwert zu ermitteln. Diese Betrachtungsweise wird im Folgenden als „Trägerbetrachtung“ bezeichnet, da sie neben der Hüllkurve auch den HF-Träger berücksichtigt. Sie ist bei der Dimensionierung von Senderkomponenten von Bedeutung, da bei der Ermittlung der Durchschlagsfestigkeit die höchste vorkommende Spitzenspannung ausschlaggebend ist.

Die zweite Möglichkeit einen Crest-Faktor zu ermitteln besteht darin, den Spitzenwert der Modulationshüllkurve zu deren Effektivwert ins Verhältnis zu setzen. Diese Betrachtungsweise wird im Folgenden als „Hüllkurvenbetrachtung“ bezeichnet, sie entspricht auch der Betrachtung des Basisbandsignals. Der so ermittelte Crest-Faktor ist um den Betrag des Crest-Faktors des Sinus-Trägers, also um 3,01dB geringer als bei der Trägerbetrachtung. Diese Betrachtung ist von Bedeutung, wenn es sich z. B. um die Aussteuerung eines Verstärkers im HF-Bereich oder eines D/A-Wandlers im Basisband handelt.

Die Angabe des Crest-Faktors alleine ist also ohne Aussagekraft. Es sollte immer die Betrachtungsweise oder die Berechnungsmethode angegeben werden.

Analog zum Verhältnis von Spitzenspannung zu Effektivspannung lässt sich der Crest-Faktor in dB auch als Verhältnis von Spitzenleistung P_{PEP} zu

Bestimmung und Anwendung des Crest-Faktors

Effektivleistung P_{AVG} ausdrücken. Linear betrachtet entspricht der Crest-Faktor aus dem Leistungsverhältnis dem quadrierten Wert des Crest-Faktors aus dem Spannungsverhältnis. Bei der Angabe in dB ergeben sich jedoch gleiche Werte. Aus diesem Grund soll hier zur Vereinfachung nicht weiter zwischen dem Spannungs- und Leistungsverhältnis unterschieden werden.

In der Literatur ist auch der Begriff PAR (*Peak-to-Average Power Ratio*) verbreitet. In dB angegeben entspricht der PAR-Wert dem Crest-Faktor bei der Trägerbetrachtung. Für einen Sinus-Träger ergibt sich folglich ein PAR-Wert von 3,01 dB. Da bei modulierten HF-Signalen unter dem Begriff „Spitzenleistung“ im Allgemeinen jedoch der Wert der Hüllkurvenspitzenleistung (*Peak Envelope Power*) P_{PEP} verstanden wird, sollte der Crest-Faktor, als Verhältnis von Spitzen- zu Effektivwert, ausschließlich gemäß Hüllkurvenbetrachtung bestimmt werden.

Die effektive Leistung eines periodischen Signals wird ermittelt, in dem der Spannungsverlauf $u_{RF}(t)$ zunächst quadriert und durch den Bezugswiderstand dividiert wird. Der jeweils über eine Periode gemittelte Wert ergibt die effektive Leistung des Signals. Dies ist in Abb. 1 am Beispiel eines reinen CW-Signals (*Continuous Wave*) dargestellt. Es zeigt links das CW-Signal (blau) mit der konstanten Hüllkurve (grün). Rechts sind der quadrierte, auf 50 Ω bezogene Verlauf (blau) und die bei einem CW-Signal konstante effektive Leistung (rot) dargestellt.

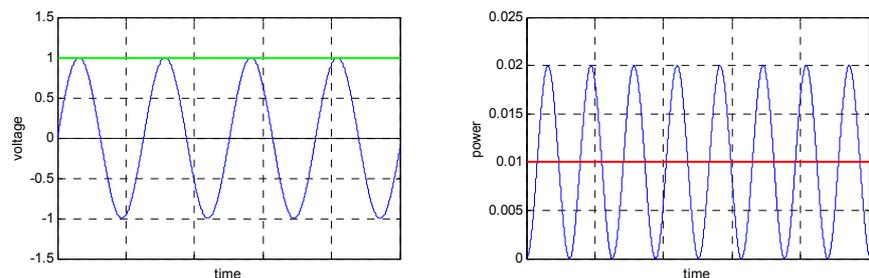


Abb. 1: Spannung und Leistung eines CW-Signals an 50 Ω Last

Die Leistung bei einem modulierten Signal wird auf gleiche Weise ermittelt. Dies soll am Beispiel eines amplitudenmodulierten HF-Signals mit dem Modulationsgrad $m = 0.5$ gezeigt werden, siehe Abb. 2. Links ist der Spannungsverlauf $u_{RF}(t)$ mit der sinusförmigen Hüllkurve dargestellt. In der Mitte ist das quadrierte, auf 50 Ω bezogene Zeitsignal dargestellt (blau). Der über jeweils eine Periode gemittelte Leistungsverlauf ist im mittleren und rechten Bild rot dargestellt, er entspricht dem Verlauf der Hüllkurvenleistung. Die Hüllkurvenspitzenleistung *Peak Envelope Power* (P_{PEP}) entspricht dem Maximalwert und ist im rechten Bild grün dargestellt. Ebenfalls im rechten Bild dargestellt (blau) ist die über eine lange Zeit gemittelte effektive Leistung P_{AVG} (*average*).

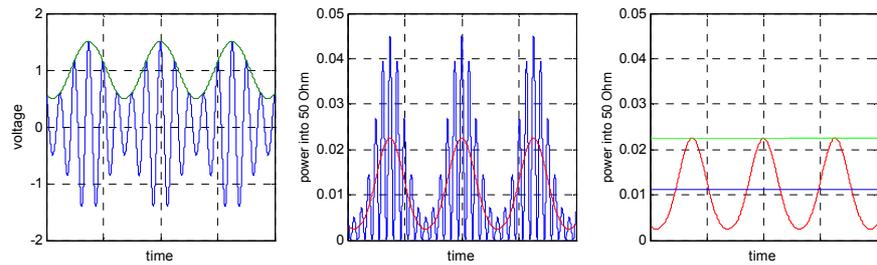


Abb. 2: Spannung und Leistung eines modulierten HF-Signals an 50 Ω Last

Die Hüllkurvenspitzenleistung P_{PEP} ist die effektive Leistung, die der Sender während einer Periode des HF-Signals beim Maximalwert der Hüllkurve abgibt. Dies ist auch der Wert, der bei Spitzenleistungsmessern angezeigt wird. Bei einem Signal mit konstanter Hüllkurve entspricht die Hüllkurvenspitzenleistung der Effektivleistung. Der Crest-Faktor ist damit 1 bzw. 0 dB.

Beispiel: Der Crest-Faktor eines Sendesignals ist mit 10 dB (P_{PEP}/P_{AVG}) angegeben. Aus der Angabe P_{PEP}/P_{AVG} wird ersichtlich, dass es sich um die Hüllkurvenbetrachtung handelt. Der Crest-Faktor bei der Trägerbetrachtung beträgt dann entsprechend 13 dB.

Der Crest-Faktor mehrerer überlagerter Signale

Werden mehrere verschiedene Sendesignale auf eine Antenne geschaltet, addieren sich die einzelnen Signale vektoriell. Dies führt zu einer Erhöhung des Crest-Faktors. Gleiches gilt für ein OFDM-Signal, das aus der Überlagerung einer Vielzahl von modulierten Einzelträgern besteht.

Bei der Überlagerung mehrerer nichtharmonischer (unkorrelierter) Sinus-Signale addieren sich die Amplituden zu einer maximalen Gesamtspitzenspannung \hat{U} :

$$\hat{U} = \hat{U}_1 + \hat{U}_2 + \dots + \hat{U}_n \quad n = \text{Anzahl der Träger} \quad (1)$$

Da die Signale zueinander unkorreliert sind, werden zur Berechnung des Effektivwertes des Summensignals die Leistungen der einzelnen Sinus-Signale addiert, d.h. die Effektivwerte der Spannungen werden dann entsprechend quadratisch addiert:

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2} \quad n = \text{Anzahl der Träger} \quad (2)$$

Bei der Überlagerung zweier Sinus-Signale gleicher Amplitude verdoppelt sich also die Spitzenspannung, der Effektivwert der Spannung vergrößert sich jedoch nur um $\sqrt{2}$. Damit vergrößert sich der Crest-Faktor \hat{U}/U ebenfalls um $\sqrt{2}$, also um 3,01 dB. Der Crest-Faktor bei der Trägerbetrachtung beträgt daher 3,01 dB + 3,01 dB = 6,02 dB. Diese Überlagerung entspricht einem Zweitonsignal, die Hüllkurve ist im Gegensatz zum einzelnen Sinus-Signal nicht mehr konstant. Der Crest-Faktor bei der Hüllkurvenbetrachtung ist entsprechend um 3,01 dB geringer und beträgt nun 3,01 dB ge-

gegenüber 0 dB beim einzelnen Sinus-Signal. Auch bei der Hüllkurvenbetrachtung hat sich der Crest-Faktor um 3,01 dB erhöht.

Die Erhöhung des Crest-Faktors durch die Überlagerung zweier Signale ist also unabhängig von der Betrachtungsweise. Wird die Anzahl der Signale mit gleicher Amplitude verdoppelt, so erhöht sich der Crest-Faktor um 3,01 dB.

Für den Crest-Faktor von n unmodulierten und unkorrelierten Trägern gleicher Amplitude in dB gilt bei der Hüllkurvenbetrachtung:

$$CF = 20 \cdot \log(\sqrt{n}) = 10 \cdot \log(n) \quad (3)$$

und bei der Trägerbetrachtung:

$$CF = 10 \cdot \log(n) + 3,01dB. \quad (4)$$

Dieser Zusammenhang ist auch gültig, wenn die Einzelträger bereits moduliert sind und einen Crest-Faktor CF_c aufweisen. Für den Crest-Faktor von n modulierten und unkorrelierten Signalen gleicher Amplitude in dB gilt unabhängig von der Betrachtungsweise:

$$CF = 10 \cdot \log(n) + CF_c \quad (5)$$

Beispiel: Berechnung des theoretischen Crest-Faktors eines DVB-T-Signals im 2K-Mode mit QPSK bei der Trägerbetrachtung:

Das DVB-T-Signal besteht in diesem Fall aus der Überlagerung von 1705 einzelnen Trägern, die jeweils mit QPSK moduliert sind. Da die Umtastung bei der QPSK-Modulation bei DVB-T ungefiltert erfolgt, tritt gegenüber einem Sinus-Träger kein weiterer Crest-Faktor auf. Der Crest-Faktor eines einzelnen mit QPSK modulierten Trägers beträgt also wie beim Sinus 3,01 dB. Da die Amplituden der einzelnen Träger gleich sind, kann die Berechnung über (4) bzw. (5) erfolgen. Es ergibt sich bei der Trägerbetrachtung ein Crest-Faktor von 35,32 dB.

Crest-Faktor-Messung

Bei periodischen Signalen ist die Bestimmung des Crest-Faktors durch die Messung des Spitzen- und Effektivwerts von Spannung oder Leistung z. B. mittels moderner Leistungsmesser oder Oszilloskope möglich. Wird das Signal für die Dauer einer Periode gemessen, können sowohl der Spitzenwert als auch der Effektivwert vollständig erfasst werden, eine ausreichende Geschwindigkeit der Messgeräte vorausgesetzt.

Anders verhält es sich bei zufällig modulierten Signalen wie bei einem OFDM- bzw. DVB-T-Signal. Während sich der Effektivwert eines DVB-T-Senders bereits nach wenigen Sekunden mit einem thermischen Leistungsmesser genau bestimmen lässt, hängt die Höhe des Spitzenwertes stark von der Messzeit ab. Da bei hohen Crest-Faktoren die Signalspitzen zunehmend seltener auftreten, ist neben der Angabe des ermittelten Crest-Faktors auch die Angabe des Messintervalls bzw. der Anzahl der Abtastwerte erforderlich. Der ermittelte Crest-Faktor ist in diesem Fall nur für das jeweilige Messintervall repräsentativ und lässt noch keine Aussage über

Bestimmung und Anwendung des Crest-Faktors

den tatsächlichen Crest-Faktor des Signals während der gesamten Einschaltzeit zu.

Ein Verständnis zur statistischen Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Signalspitzen ist hier sehr hilfreich. Eine gute Übersicht bietet dabei die Angabe der CCDF (*Complementary Cumulative Distribution Function*). Diese gibt die statistische Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Signalspitzen an, die um einen Faktor k in dB über dem Effektivwert liegen. Auch hier ist die Unterscheidung zwischen der Träger- und der Hüllkurvenbetrachtung erforderlich.

Bei der Erzeugung eines OFDM-Signals ergibt sich im Basisband eine Amplitudenverteilung für das I- und Q-Signal, die näherungsweise eine Normalverteilung darstellt. Das I- und Q-Signal entspricht also praktisch dem weißen Rauschen. Aus dem Betrag des komplexen Zeitsignals $i(t) + jq(t)$ wird bei der Modulation auf einen HF-Träger die Hüllkurve gebildet. Hierbei sind die Amplituden näherungsweise Rayleigh-verteilt. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten hoher Signalspitzen ist bei der Rayleigh-Verteilung deutlich geringer als bei der Normalverteilung. Wertet man jedoch nach der Trägerbetrachtung des OFDM-modulierten HF-Signals die Amplituden statistisch aus, erhält man wegen der Trägerschwingung wieder eine Normalverteilung.

Abb. 3 zeigt den Vergleich der CCDF von weißem Rauschen (Normalverteilung) und von einer Rayleigh-Verteilung, wie sie bei der Hüllkurve eines idealen DVB-T-Signals näherungsweise auftritt.

Zusätzlich ist die CCDF eines Sinus-Signals bei der Trägerbetrachtung dargestellt. Bei einer sinusförmigen Spannung liegt der Scheitelwert \hat{U} um den Faktor $\sqrt{2}$ über dem Effektivwert U , der Sinus hat also einen Crest-Faktor \hat{U}/U von 3,01 dB. Darüber kommen keine Signalwerte vor, die Wahrscheinlichkeit ist 0.

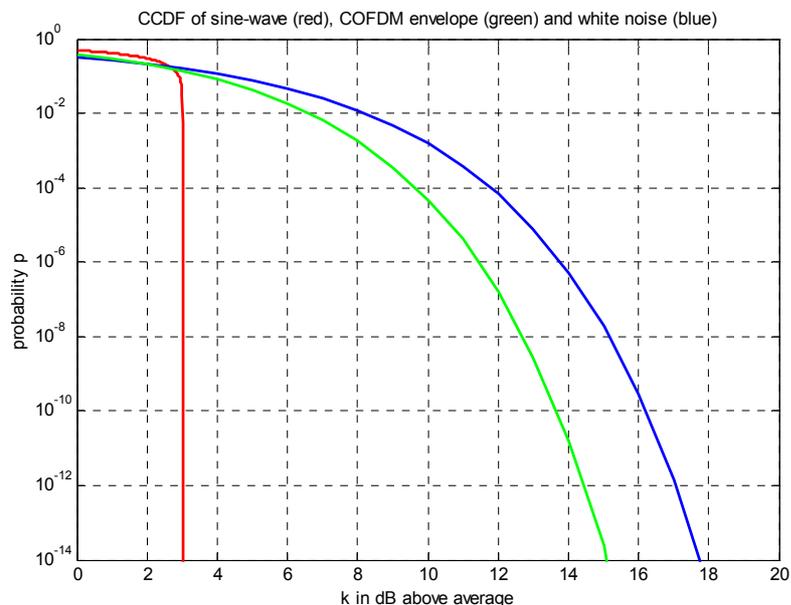


Abb. 3: CCDF des Sinus (Trägerbetrachtung), von einem OFDM- Hüllkurvensignal und von weißem Rauschen

In der Praxis lassen sich hohe Crest-Faktoren von OFDM-Signalen jenseits von 12 dB bei der Hüllkurvenbetrachtung (bzw. 15 dB bei der Trägerbetrachtung) auch mit sehr hochwertigen Messgeräten kaum noch bzw. überhaupt nicht mehr messen.

Abb. 3 veranschaulicht diesen Sachverhalt: Die Wahrscheinlichkeit, Signalwerte zu erfassen, die nur 1 dB höher liegen, ist bei der Hüllkurvenbetrachtung etwa um den Faktor 60 geringer. Es muss also durchschnittlich die 60fache Messzeit aufgewendet werden, um Signalspitzen zu erfassen, die 13 dB über dem Effektivwert liegen. Um Werte mit 14 dB zu erfassen ist bereits die 10.000fache Messzeit nötig, bei 15 dB die 7 millionenfache Zeit. Aufgrund der Signaldauer einer Leistungsspitze von ca. 110 ns bei einem DVB-T-Signal von 8 MHz treten Amplitudenwerte, die 12 dB über dem Effektivwert liegen, bei der Hüllkurvenbetrachtung durchschnittlich etwa jede Sekunde auf. Bei 15 dB sind es dann bereits nur noch alle 60 Tage. Anders ausgedrückt tritt eine Signalspitze, die 12 dB über dem Effektivwert liegt, durchschnittlich alle 7,6 Millionen Samples bei der Signalanalyse auf.

Ohne Kenntnis der Amplitudenwahrscheinlichkeit entsteht der Eindruck, dass ein Messwert realistisch ist, da er trotz Verdopplung oder Verzehnfachung des Messintervalls praktisch stabil bleibt. Der gemessene Wert wird dann u. U. fälschlich als Crest-Faktor angenommen.

Weiterhin ist zu sicherzustellen, dass die Dynamik des Messgerätes ausreichend ist und nicht bereits ein Wandler oder ein ZF-Verstärker den Crest-Faktor begrenzt. Bei manchen Messgeräten wird diese Dynamik über den Wert „Margin“ angezeigt. Auch eine zu gering gewählte ZF-Bandbreite oder ein steilflankiges ZF-Filter können das Ergebnis beeinträchtigen.

Da das OFDM-Signal bei einem einzelnen Sender in der Praxis jedoch stark limitiert auftritt, führen Messungen im Sekunden- oder Minutenbereich meistens zu ausreichenden Ergebnissen. Anhand der CCDF wird ersichtlich, wann die Begrenzung einsetzt. Die Amplitudenwahrscheinlichkeit verringert sich dabei zunehmend gegenüber dem idealen Signal, siehe Abb. 4.

Die schwarze Kurve zeigt ein Rauschsignal und die blaue Kurve ein typisches DVB-T-Signal an einem Senderausgang bei der Hüllkurvenbetrachtung, gemessen mit dem Spektrumanalysator R&S[®]FSU. Das Rauschsignal ist in diesem Fall das Rauschen des Messgerätes bei abgeschlossenem Empfängereingang.

Ab ca. 7 dB setzt die Begrenzung des Senders ein und nimmt danach stark zu. Auch bei einer deutlich längeren Messung wird der gemessene Crest-Faktor von 9,6 dB nur noch geringfügig ansteigen, da die Kurve hier schon sehr steil abfällt. Beim Rauschsignal wurde aus den 10 Millionen Abtastwerten zu Abb. 4 ein Crest-Faktor von 12,13 dB ermittelt, was sehr gut mit der statistischen Theorie übereinstimmt.

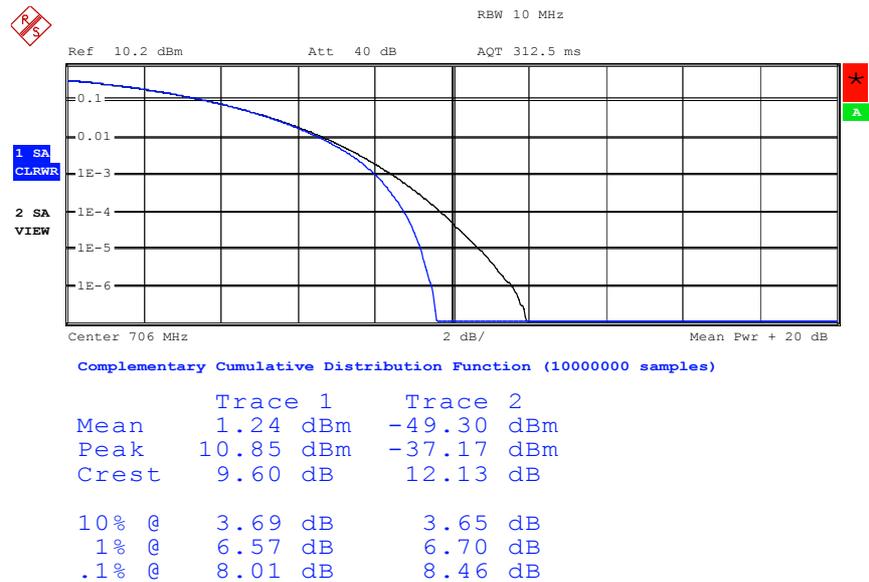


Abb. 4: CCDF von weißem Rauschen und einem DVB-T Signal nach einem Leistungsverstärker (Hüllkurvenbetrachtung) mit R&S®FSU gemessen

Da sich die Kurve bei 12 dB noch mit dem idealen Verlauf aus Abb. 3 deckt und keine Begrenzung erkennbar ist, kann davon ausgegangen werden, dass der tatsächliche Crest-Faktor dieses realen Rauschsignals deutlich höher liegt. Diese Messung zeigt auch, dass für den angezeigten Bereich der CCDF die Dynamik des A/D-Wandlers ausreichend hoch ist und noch keinen Einfluss auf die Messung hat.

Messgeräte wie der Spektrumanalysator R&S®FSU oder R&S®FSP bzw. der DVB-T-Messempfänger R&S®EFA von Rohde & Schwarz ermöglichen eine Crest-Faktor-Messung bei gleichzeitiger Darstellung der CCDF. Die Auswertung erfolgt hierbei nach der Hüllkurvenbetrachtung bzw. im Basisband. Beim Messempfänger R&S®EFA kann zusätzlich das Signal nach der Trägerbetrachtung ausgewertet werden, da auch das modulierte Signal in der Zwischenfrequenz ZF abgetastet wird, was einer Abtastung des HF-Signals gleichkommt. Die Art der Messung kann mit Softkey-Tasten umgeschaltet werden und wird am rechten Bildschirmrand angezeigt, siehe Abb. 9. Die Stellung „CCDF(RF)“ entspricht hierbei der Trägerbetrachtung, die Stellung „CCDF(ENV)“ der Hüllkurvenbetrachtung. In [2] und [3] ist die Funktionsweise dieser Messgeräte genauer beschrieben.

Abb. 5 zeigt ein modulierte HF-Signal (blau) mit seiner Hüllkurve (rot) und den zugehörigen Abtastwerten, wie sie von einem Messgerät erfasst werden. Bei der direkten Abtastung des HF- bzw. ZF-Signals ergibt sich für ein reines CW-(*Continuous-Wave*-) Signal wegen der Sinus-Funktion ein Crest-Faktor \hat{U}/U von 3,01 dB. Da die Hüllkurve beim CW-Signal konstant ist, wird bei der Abtastung des Hüllkurvensignals bzw. bei der Ermittlung im Basisband ein Crest-Faktor von 0 dB angezeigt. Neben der unterschiedlichen Amplitudenverteilung ergibt sich je nach Messmethode also auch ein Unterschied von 3,01 dB bei der Bestimmung des Crest-Faktors.

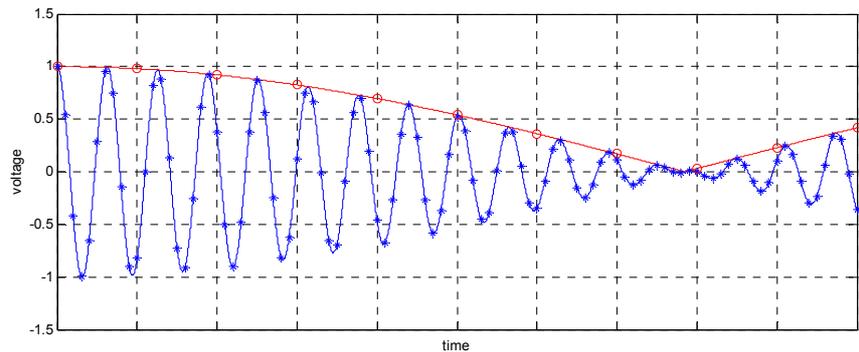


Abb. 5: Zeitsignal $u_{RF}(t)$ bzw. $u_{IF}(t)$ mit Hüllkurve und Abtastwerten

Ausgangssignal eines DVB-T-Senders

Wie weiter oben beschrieben ist der Crest-Faktor des Ausgangssignals eines DVB-T-Senders in der Praxis deutlich geringer als der nach (5) berechnete theoretische Wert. Für diese Limitierung sind im Wesentlichen der D/A-Wandler bei der Signalerzeugung und der Leistungsverstärker verantwortlich.

In der Praxis werden die I- und Q-Signale des DVB-T-Basisbandsignals mit einem D/A-Wandler erzeugt, der das Signal durch seine maximale Aussteuerbarkeit begrenzt und damit den Crest-Faktor bereits stark verringert. Die Aussteuerungsgrenze liegt dabei je nach Qualitätsanforderung ca. 15 dB über dem Effektivwert; dies entspricht einer Crest-Faktor-Limitierung auf 15 dB. Um den D/A Wandler richtig anzusteuern, erfolgt diese Limitierung bereits in der digitalen Signalverarbeitung auf Zahlenebene.

Da hier das Basisband (Betrag aus I und Q) vor der Modulation betrachtet wird, handelt es sich um eine Hüllkurvenbetrachtung. Auf die Signalqualität wirkt sich die Limitierung von 15 dB praktisch noch nicht aus, da die damit abgeschnittenen Signalspitzen nur äußerst selten auftreten: beim I- und Q-Signal mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 2×10^{-8} .

Innerhalb eines Senders erfolgt die größte Limitierung des DVB-T-Signals beim Leistungsverstärker. Die Endstufe wird soweit angesteuert, dass bereits häufig auftretende Signalspitzen deutlich über dem 1 dB-Kompressionspunkt liegen.

Eine Kompression der Verstärkerkennlinie bedeutet, dass hohe Signalspitzen geringer verstärkt werden als der Effektivwert. Dies führt zu einer geringeren Amplitudenwahrscheinlichkeit für hohe Signalspitzen. Die Sättigungsleistung des Verstärkers bestimmt die maximal mögliche Spitzenleistung und damit den Crest-Faktor.

Mit einer Vorverzerrung des Basisbandsignals werden hohe Signalspitzen im Pegel angehoben, um dem Kompressionsverhalten des Verstärkers entgegenzuwirken. Dies ändert jedoch nichts an der Sättigungsleistung des Verstärkers und damit am Crest-Faktor. Die Gesamtübertragungskennlinie bis hin zur Sättigungsleistung wird jedoch linearisiert, so dass die Amplitudenwahrscheinlichkeit für hohe Signalspitzen erhöht wird.

Über eine Regelung wird die effektive Ausgangsleistung konstant gehalten. Ein Messgerät wird deshalb bei eingeschalteter Vorverzerrung einen höhe-

Bestimmung und Anwendung des Crest-Faktors

ren Crest-Faktor anzeigen, wenn das Messintervall gleich bleibt (siehe Abb. 6).

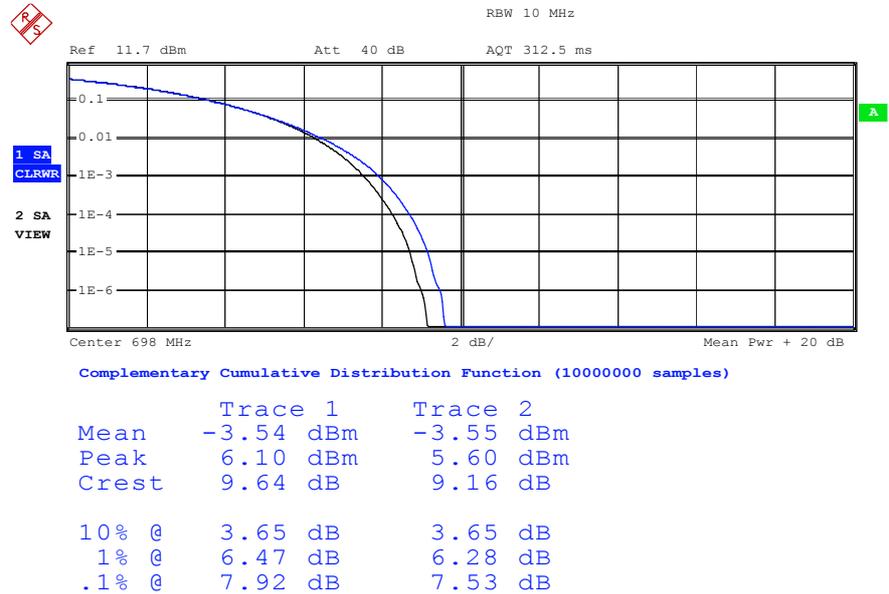


Abb. 6: CCDF am Senderausgang mit und ohne Vorverzerrung (Hüllkurvenbetrachtung)

Ein hoher Crest-Faktor ist jedoch kein Qualitätsmaß für einen Sender. Nur durch eine gezielte Übersteuerung des Leistungsverstärkers lassen sich hohe Wirkungsgrade und damit ein wirtschaftlicher Betrieb erreichen. Diese Übersteuerung macht sich in der Signalqualität bemerkbar. Durch Verzerrungen an der nichtlinearen Verstärkerkennlinie entstehen Intermodulationsprodukte, die sich als Schultern unter- und oberhalb des Nutzspektrums am Spektrumanalysator zeigen.

Diese Intermodulationsprodukte existieren jedoch auch im Nutzkanal, sie können allerdings nur mit speziellen Messgeräten „sichtbar“ gemacht werden. Im Konstellationsdiagramm macht sich diese Limitierung durch kleine „Signal-Wolken“ bemerkbar. Die Signalvektoren der 64QAM-modulierten Einzelträger treffen nicht mehr exakt in die Mitte der Entscheidungsfenster.

Abb. 7 zeigt eine Simulation eines hart limitierten DVB-T-Signals (grüne Kurve) mit dem zugehörigen Konstellationsdiagramm. Das Spektrum mit den Intermodulationsprodukten („Schultern“) ist in Abb. 8 dargestellt.

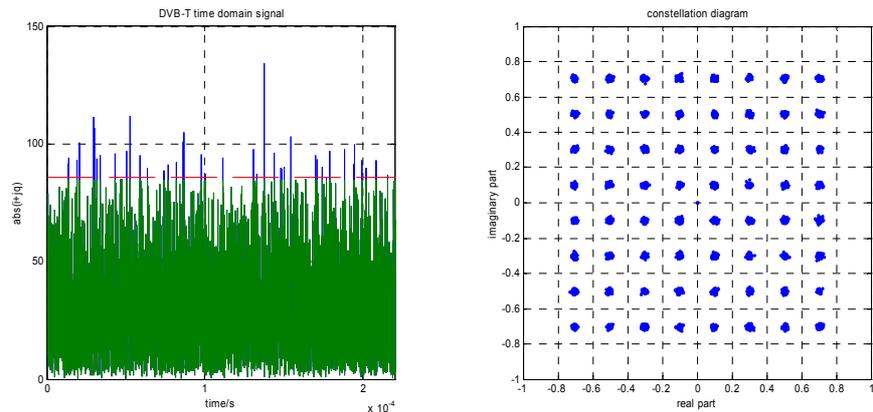


Abb. 7: Zeitsignal und Konstellationsdiagramm eines limitierten DVB-T-Signals

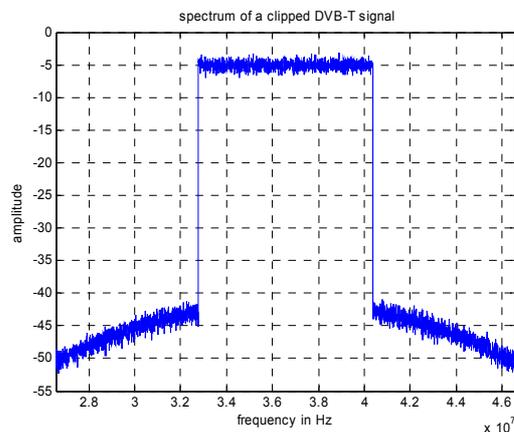


Abb. 8: Spektrum des limitierten DVB-T-Signals

Ausgangsbandpass

Am Ausgang des Senders befindet sich in der Regel ein Bandpassfilter. Dieses befreit das Sendesignal außerhalb des Nutzfrequenzbereichs weitgehend von Intermodulationsprodukten, die durch Nichtlinearitäten des übersteuerten Leistungsverstärkers entstanden sind. Durch die hohe Flankensteilheit des Filters kommt es jedoch zu einer Verformung der Hüllkurve. Als Folge steigt der Crest-Faktor des limitierten Signals wieder etwas an.

Eine Messung des Sendesignals vor und nach dem Bandpass mit dem DVB-T-Messempfänger R&S[®] EFA zeigt Abb. 9. Links ist das Sendesignal vor dem Bandpass und rechts nach dem Bandpass bei der Trägerbetrachtung dargestellt. Diese Crest-Faktor-Vergrößerung ist abhängig von der vorangegangenen Limitierung und der Filtersteilheit. Ein unlimitiertes Signal führt auch nach dem Bandpassfilter nicht zu einer Erhöhung des Crest-Faktors, bei stark limitierten Signalen ist der Effekt besonders groß. Messungen und Simulationen haben gezeigt, dass das Bandpassfilter den

Crest-Faktor eines DVB-T-Senders typischerweise um 0,5 dB bis 1,5 dB vergrößert.

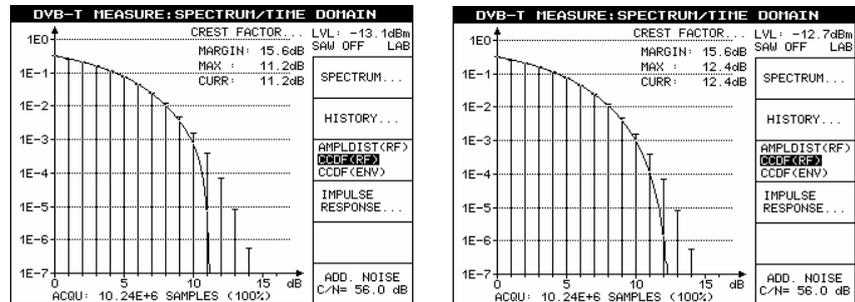


Abb. 9: Ausgangssignal eines DVB-T-Senders vor und nach dem Bandpassfilter (Trägerbetrachtung)

Zusammenschaltung mehrerer Sender auf eine Antenne

Die Zusammenschaltung zweier unabhängiger Sender mit gleicher Leistung und gleichem Crest-Faktor auf eine gemeinsame Antennenleitung führt zu einer möglichen Verdopplung der Amplituden (gleiche Phase, max. Betrag). Die Spitzenleistung liegt damit viermal höher als beim Einzelsender. Gleichzeitig verdoppelt sich die Effektivleistung, so dass bei jeder Verdopplung der Senderzahl der Crest-Faktor um 3,01 dB ansteigt. Auch hier gilt (5) für die Ermittlung des Gesamt-Crest-Faktors von n Sendern mit jeweils gleichen Crest-Faktor CF_c .

Bei Sendeanlagen mit mehreren Sendern können sich durch die Zusammenschaltung sehr hohe Werte von über 20 dB (P_{PEP}/P_{AVG}) ergeben, da im Unterschied zu einem Einzelsender in der Regel keine weiteren Baugruppen folgen, die den Crest-Faktor begrenzen.

Neben der Erhöhung des Crest-Faktors ändert sich auch die Amplitudenverteilung, wie ein Blick auf die CCDF veranschaulicht. Abb. 10 zeigt die Simulation eines hart limitierten DVB-T-Signals bei der Trägerbetrachtung sowie die Überlagerung von 2 und 3 gleichartigen Sendesignalen. Zum Vergleich ist auch die CCDF für weißes Rauschen dargestellt. Bei der Überlagerung mehrerer limitierter Sender gleicht sich das Gesamtsignal also immer mehr dem weißen Rauschen an.

Bestimmung und Anwendung des Crest-Faktors

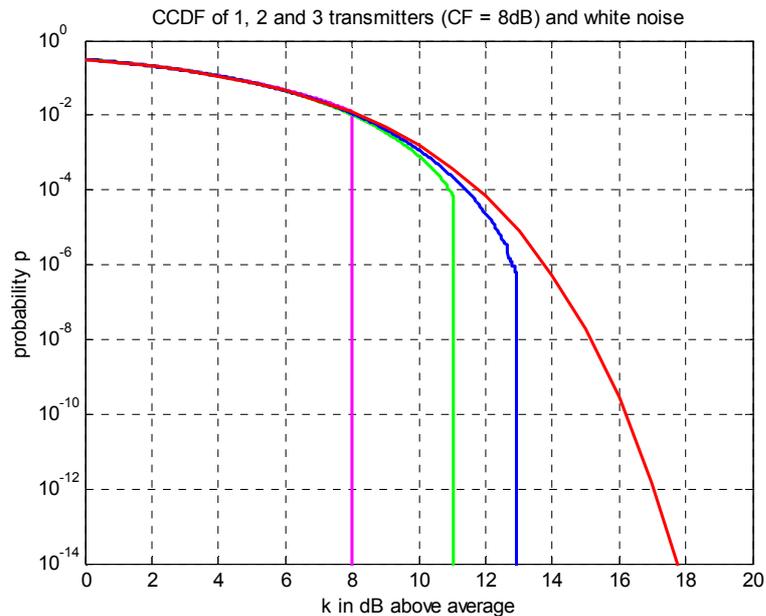


Abb. 10: Von links nach rechts: CCDF von 1, 2 und 3 Sendern mit CF = 8 dB sowie von weißem Rauschen (Trägerbetrachtung)

Wegen der Aussteuerungskennlinie des Leistungsverstärkers setzt in der Praxis die Begrenzung weniger abrupt ein, das Verhalten ist aber prinzipiell das gleiche. Der Abfall der Amplitudenwahrscheinlichkeit wird im Diagramm um die Erhöhung des Crest-Faktors nach rechts verschoben.

Abb. 11 zeigt links die Messung eines realen, stark in der Begrenzung des Verstärkers betriebenen DVB-T-Signals bei der Trägerbetrachtung. Im rechten Bild ist die Überlagerung zweier gleichartiger Sender aber mit unterschiedlicher Modulation dargestellt. Auch hier nähert sich die Amplitudenverteilung des Summensignals dem weißen Rauschen an.

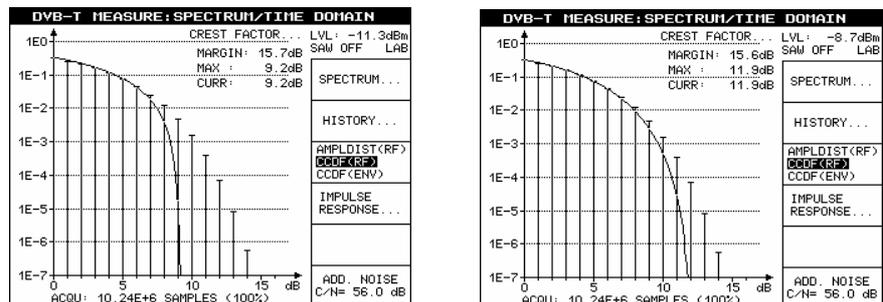


Abb. 11: CCDF eines Einzelsenders und der Zusammenschaltung von zwei Sendern (Trägerbetrachtung)

Mit zunehmender Zahl der auf eine Antennenleitung zusammengeschalteten Sender wird es immer schwieriger, den Crest-Faktor des Summensignals messtechnisch zu ermitteln. Geht man von einem typischen Crest-

Bestimmung und Anwendung des Crest-Faktors

Faktor von 10 dB (P_{PEP}/P_{AVG}) bei einem Einzelsender aus, beträgt er bei 2 Sendern bereits 13 dB. Bei einer höheren Senderzahl macht alleine das seltene Auftreten der Signalspitzen eine Messung praktisch unmöglich.

Ein weiteres Problem ist die erforderliche Messbandbreite, da die Sender über einen großen Frequenzbereich verteilt sein können. Statt einer Messung ist es hier praktikabler, den Crest-Faktor des Summensignals aus den Messwerten der Einzelsender zu ermitteln. Bei der Berechnung der Amplitudenwahrscheinlichkeit kann je nach Betrachtungsweise die Rayleigh- bzw. die Normalverteilung herangezogen werden. Bei Amplitudenwerten bis ca. 3 dB unter dem Spitzenwert besteht kaum eine Abweichung gegenüber den theoretischen Werten der beiden Verteilungsfunktionen, darüber nimmt die Wahrscheinlichkeit dann ab, siehe Abb. 11.

k in dB	CCDF bei der Normalverteilung	CCDF bei der Rayleigh-Verteilung	Durchschnittliches Auftreten der Modulationsspitzen ausgehend von 109,375 ns Signaldauer (Rayleigh-Verteilung)
0	$3,173 \times 10^{-1}$	$3,679 \times 10^{-1}$	300 ns
1	$2,618 \times 10^{-1}$	$2,840 \times 10^{-1}$	385 ns
2	$2,080 \times 10^{-1}$	$2,049 \times 10^{-1}$	533 ns
3	$1,577 \times 10^{-1}$	$1,358 \times 10^{-1}$	805 ns
4	$1,130 \times 10^{-1}$	$8,109 \times 10^{-2}$	1,4 μ s
5	$7,540 \times 10^{-2}$	$4,237 \times 10^{-2}$	2,6 μ s
6	$4,604 \times 10^{-2}$	$1,869 \times 10^{-2}$	5,6 μ s
7	$2,516 \times 10^{-2}$	$6,650 \times 10^{-3}$	16 μ s
8	$1,200 \times 10^{-2}$	$1,818 \times 10^{-3}$	60 μ s
9	$4,832 \times 10^{-3}$	$3,558 \times 10^{-4}$	0,3 ms
10	$1,567 \times 10^{-3}$	$4,548 \times 10^{-5}$	2,4 ms
11	$3,882 \times 10^{-4}$	$3,412 \times 10^{-6}$	32 ms
12	$6,863 \times 10^{-5}$	$1,310 \times 10^{-7}$	0,83 s
13	$7,932 \times 10^{-6}$	$2,158 \times 10^{-9}$	51 s
14	$5,387 \times 10^{-7}$	$1,232 \times 10^{-11}$	2,5 Stunden
15	$1,877 \times 10^{-8}$	$1,855 \times 10^{-14}$	68 Tage
16	$2,790 \times 10^{-10}$	$5,106 \times 10^{-18}$	679 Jahre
17	$1,452 \times 10^{-12}$	$1,724 \times 10^{-22}$	20 Millionen Jahre
18	$1,973 \times 10^{-15}$	$3,979 \times 10^{-28}$	$8,7 \times 10^{12}$ Jahre
19	$4,967 \times 10^{-19}$	$3,155 \times 10^{-35}$	$1,1 \times 10^{20}$ Jahre
20	$1,524 \times 10^{-23}$	$3,720 \times 10^{-44}$	$9,3 \times 10^{28}$ Jahre

Tabelle 1: CCDF bei Signalen mit Normalverteilung und Rayleigh-Verteilung

Je höher der Crest-Faktor, desto mehr spielt neben der thermischen Belastbarkeit auch die Spannungsfestigkeit eine Rolle, um Antennenweichen, HF-Leitungen und Antenne richtig zu dimensionieren, um einen Überschlag zu verhindern. Entscheidend ist hier der Crest-Faktor bei der

Trägerbetrachtung, da sich aus ihm die maximale Spannungsamplitude berechnet lässt.

Weiterhin interessiert, wie häufig mit einer hohen Signalspitze gerechnet werden kann. Die Amplituden des modulierten HF-Signals sind bei DVB-T praktisch normalverteilt (Trägerbetrachtung). Eine einzelne hohe Spitze des Hüllkurvensignals enthält viele Schwingungen der Trägerfrequenz, da sie deutlich über der *Symbol Clock Rate* des DVB-T-Signals liegt (bei 650 MHz etwa 70 HF-Schwingungen).

Von Interesse sind jedoch nicht die vielen Überschreitungen während einer DVB-T-Spitze, sondern die Häufigkeit, mit der die Modulationsspitzen auftreten. Diese lässt sich mit Hilfe der Rayleigh-Verteilung ermitteln. Ausgehend von der kürzesten Signaldauer von 109,375 ns eines DVB-T-Signals mit 8 MHz Bandbreite erhält man für ein ideales Signal die durchschnittliche Zeitdauer, die vergeht, bis der Effektivwert um einen Faktor k überschritten wird (siehe Tabelle 1).

Abb. 12 zeigt eine Spitze des modulierten HF-Signals, wie sie bei DVB-T typischerweise auftritt.

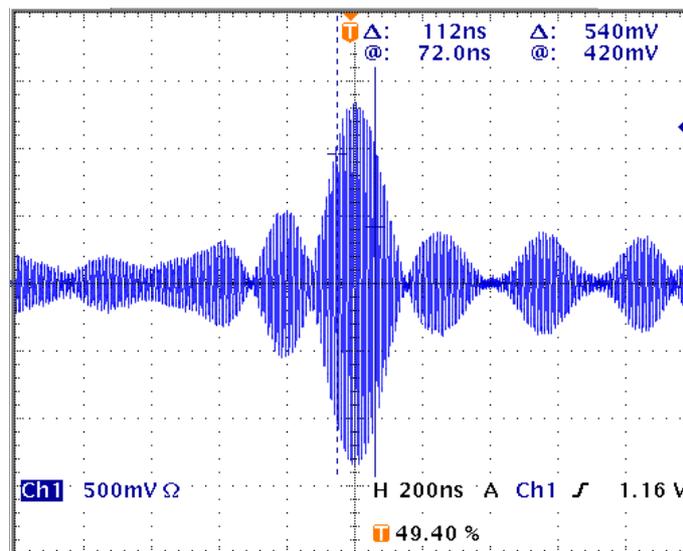


Abb. 12: Modulationsspitze bei einem DVB-T-Signal

Beispiel: 5 DVB-T-Sender sollen über eine Weiche auf eine Antenne geschaltet werden. Der Crest-Faktor der einzelnen Sender wurde nach dem Bandpass mit 11 dB (P_{PEP}/P_{AVG}) ermittelt, die effektive (thermische) Sendeleistung beträgt 1 kW je Sender.

Mit (5) ergibt sich ein Crest-Faktor von 18 dB bei der Hüllkurvenbetrachtung bzw. von 21 dB bei der Trägerbetrachtung. Die Effektivleistung beträgt den fünffachen Wert eines Einzelsenders, also 5 kW. Über den Zusammenhang $U = \sqrt{P \cdot R}$ ergibt sich eine effektive HF-Spannung von 500 V an der 50-Ω-Antenne.

Die maximale HF-Amplitude bei den höchsten Modulationsspitzen ist um 21 dB höher als der Effektivwert und beträgt 5.610 V, entsprechend beträgt die maximale Spitzenleistung

Bestimmung und Anwendung des Crest-Faktors

$P_{PEP} = 315 \text{ kW}$. Aus Tabelle 1 kann man nun die Amplitudenwahrscheinlichkeit dieser maximalen Spitze ablesen. Sie beträgt ca. $4 \cdot 10^{-28}$, entsprechend tritt sie bei einem idealen Signal durchschnittlich nur alle $8,7 \cdot 10^{12}$ Jahre auf. In der Praxis ist diese bereits vernachlässigbare Wahrscheinlichkeit noch geringer, da die Begrenzung der Verstärker schon weiter unterhalb einsetzt.

Ab ca. 3 dB unterhalb der maximalen Leistungsspitze kann davon ausgegangen werden, dass die Amplitudenwahrscheinlichkeit bereits gut mit dem theoretischen Wert der Rayleigh-Verteilung übereinstimmt. Leistungsspitzen, die bei der Hüllkurvenbetrachtung 15 dB über dem Effektivwert liegen, treten durchschnittlich alle 68 Tage auf. Dies entspricht einer HF-Amplitude von ca. 4.000 V. Amplitudenwerte, die im Sekundenbereich auftreten, liegen bei $\geq 3.000 \text{ V}$.

Soll die Anzahl der Sender auf 10 erhöht werden, verdoppelt sich die maximale Spitzenspannung auf 11.200 V. Bei Modulationsspitzen, die durchschnittlich wieder alle 68 Tage auftreten, überschreitet die HF-Amplitude eine Schwelle von 5.610 V. Vergleicht man bei der Verdopplung der Senderzahl die HF-Amplitude bei gleichen mittleren Zeitabständen bzw. bei gleicher Amplitudenwahrscheinlichkeit, so ergibt sich gegenüber der Verdopplung beim theoretischen Spitzenwert lediglich ein um Faktor $\sqrt{2}$ höherer Wert für die Schwelle. Dies entspricht auch der Erhöhung der Effektivleistung.

Die oben berechneten Werte der Spitzenspannung beziehen sich auf ein ideal angepasstes 50- Ω -System. Für die Dimensionierung der Leistungskomponenten muss zusätzlich noch die maximale Erhöhung der Spitzenspannung durch die mögliche Fehlanpassung im System berücksichtigt werden.

Ab einem Crest-Faktor von ca. 15 dB bis 17 dB bei der Hüllkurvenbetrachtung ist die Amplitudenwahrscheinlichkeit so gering, dass er für die Berechnung der Spannungsfestigkeit ab hier als konstant angenommen werden kann. Bei Sendeanlagen ab etwa 5 Sendern kann daher mit einem konstanten Crest-Faktor von 15 dB bis 17 dB (P_{PEP}/P_{AVG}) gerechnet werden. Der genaue Wert kann abhängig von der geplanten Sicherheit anhand von Tabelle 1 durch den Anwender festgelegt werden. Bei der Zuschaltung weiterer Sender muss dann nur noch die Erhöhung der Effektivleistung bei gleichem Crest-Faktor berücksichtigt werden.

3 Der Crest-Faktor bei der Erzeugung eines DVB-T-Signals

Der folgende zweite Teil dieser Applikationsschrift beschreibt den Signalweg eines DVB-T-Senders von der Modulation im Basisband bis hin zum HF-Signal und die Auswirkungen auf den Crest-Faktor und die Amplitudenverteilung.

Signalerzeugung im Basisband

Die Signalerzeugung soll exemplarisch für ein DVB-T-Signal mit 8 MHz Bandbreite im 2K-Modus mit 64QAM beschrieben werden. Zunächst ein paar kurze Definitionen zum DVB-T-Signal [4]:

Beim 2K-Modus werden von den theoretisch 2048 Trägern nur 1705 benutzt. Die *Symbol Clock Rate* ist mit 64/7 MHz festgelegt. Wird die theoretische Trägerzahl 2048 durch die *Symbol Clock Rate* dividiert, ergibt sich eine Symboldauer von 0,224 ms.

Der Frequenzabstand der 1705 Träger ist so gewählt, dass die Träger jeweils in den Nullstellen des $\sin(x)/x$ -Modulationsspektrums der anderen Träger liegen (Orthogonalität). Er errechnet sich aus dem Kehrwert der Symboldauer und beträgt 4,464 kHz. Daraus ergibt sich eine Bandbreite des OFDM-Signals von 7,607 MHz (= [Trägerzahl - 1] / Symboldauer).

Jeder dieser 1705 Träger ist einzeln mit 64QAM moduliert und kann 64 definierte Zustände annehmen. In einem kartesischen Koordinatensystem mit I (= Realteil) und Q (= Imaginärteil) als Koordinatenachsen ergibt sich ein Konstellationsdiagramm mit 64 möglichen Zuständen für den Signalvektor (siehe Abb. 13).

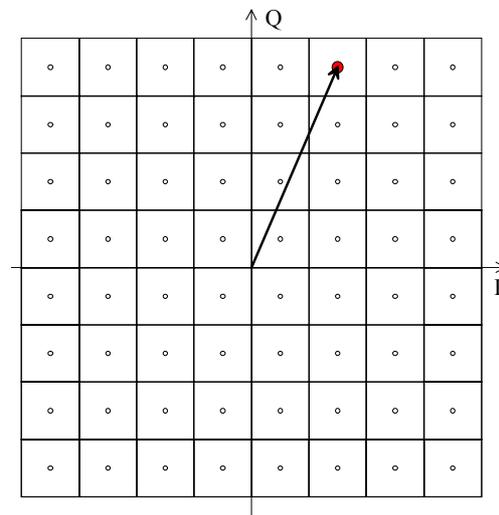


Abb. 13: Konstellationsdiagramm

Der Zustand eines Trägers zu einer zeitlichen Periode wird dabei allgemein als Symbol bezeichnet. Ein DVB-T-Symbol entspricht dem Gesamtzustand aller 1705 Träger. Die Symboldauer T_u ist dabei die Periodendauer, in der dieser Zustand erhalten bleibt, bis das nächste Symbol folgt. Dieser Zu-

Der Crest-Faktor bei der Erzeugung eines DVB-T-Signals

stand wird noch um die Dauer des Guard-Intervalls verlängert, was im Weiteren jedoch nicht berücksichtigt werden soll.

Die 64 möglichen Zustände jeden Trägers sind durch den vorgeschalteten Coder so bestimmt, dass sich statistisch betrachtet eine scheinbar zufällige Verteilung ergibt. Scheinbar deshalb, weil ja eine gewollte Information übertragen wird. Alle 64 Zustände eines Trägers kommen über lange Zeit betrachtet also gleich oft vor, es ist keiner bevorzugt.

Werden ein oder mehrere aufeinander folgende DVB-T-Symbole mittels IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) in den Zeitbereich transformiert, so ergibt sich ein komplexes Signal, dessen Real- (I) und Imaginärteil (Q) gleichermaßen positive wie negative Werte enthält (siehe Abb. 14).

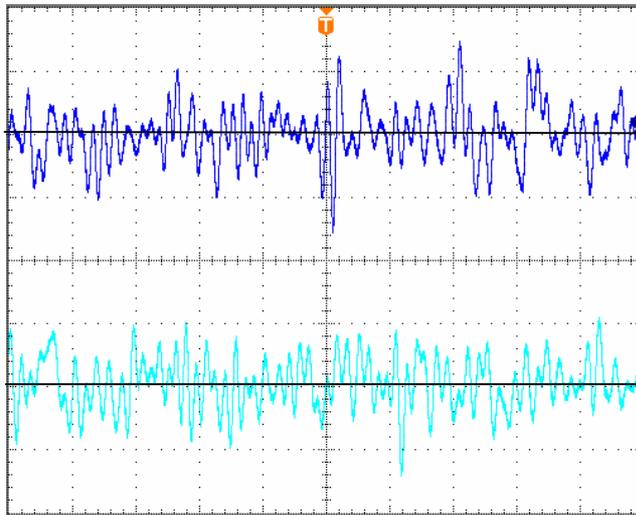


Abb. 14: I- und Q-Signal im Zeitbereich

Durch die IFFT ergibt sich für I und Q jeweils ein Zeitsignal, das praktisch einem bandbegrenztem weißen Rauschen entspricht.

Die Bandbreite des Basisbandsignals beträgt 3,803 MHz. Dies entspricht der halben Modulationsbandbreite des HF-Signals. Aus dem Kehrwert der *Symbol Clock Rate* des DVB-T-Signals errechnet sich die kürzeste Dauer der Signalspitzen innerhalb dieses Zeitsignals. Theoretisch beträgt sie 109,375 ns, jedoch sind die Signalspitzen stark verrundet. Die reale Minimaldauer lässt sich am besten an einzelnen, stark hervortretenden Signalspitzen ablesen.

Die Effektivwerte der beiden Zeitsignale $u_i(t)$ und $u_q(t)$ errechnen sich aus den quadratischen Mittelwerten und sind beide gleich groß. Das Signal wird zunächst quadriert und anschließend gemittelt. Aus dem Ergebnis wird schließlich die Wurzel gezogen, um wieder eine lineare Größe zu erhalten.

$$U_{eff,i,q} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (u_{i,q}(t))^2 dt} \quad (6)$$

Um die Nulllinie herum ist die Amplitudenhäufigkeit am größten, bei höheren Amplitudenwerten (positiv und negativ) nimmt sie ab. Der lineare Mit-

telwert beträgt dabei 0 (siehe Abb. 14). Diese Verteilung der Amplituden über der Aussteuerung bezeichnet man als Amplituden-Dichte-Verteilung oder verallgemeinert als Wahrscheinlichkeits-Dichte-Funktion $p(u)$.

Beim weißen Rauschen entspricht die Verteilung der Amplituden einer Gauß- oder Normalverteilung (siehe Abb. 15). Die Streuung σ ist dabei der Effektivwert des Signals. Dies gilt prinzipiell auch für das I- und Q-Signal.

$$p(u) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

Die Wahrscheinlichkeit $p(u)$ für das Auftreten eines konkreten Amplitudenwertes u ist hiernach unendlich gering. Um eine Aussage treffen zu können, multipliziert man $p(u)$ mit einem Intervall Δu und erhält damit die Wahrscheinlichkeit dafür, dass Amplitudenwerte in dieses Intervall fallen.

Da der Crest-Faktor für ein normalverteiltes und in der Amplitude unlimitiertes Signal unendlich hoch ist ($CF \rightarrow \infty$), lässt sich für ihn kein Wert angeben. Andererseits geht die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten dieses Crest-Faktors gegen Null ($P \rightarrow 0$). Interessanter ist daher die Fragestellung: Wie wahrscheinlich ist es, dass eine Amplitude (Signalspitze) auftritt, die um einen Faktor k größer ist als der Effektivwert σ ?

Zur Berechnung dieser Wahrscheinlichkeit wird folgendes Integral der Wahrscheinlichkeits-Dichte-Funktion gebildet:

$$P_{i,q} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{k\cdot\sigma}^{\infty} e^{-\frac{u^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

Dies entspricht dem Flächeninhalt der rechten schraffierten Fläche aus Abb. 15 (hier: $k = 2$). Da negative Amplituden genauso häufig sind wie positive, genügt es, eine Seite der Glockenkurve zu integrieren, was nur mit Hilfe numerischer Integration gelingt. Anschließend muss das Ergebnis noch mit 2 multipliziert werden. Für das Beispiel $k = 2$ aus Abb. 15 ergibt sich dann die Wahrscheinlichkeit $P = 2 \cdot 0,0228$, also 4,55%.

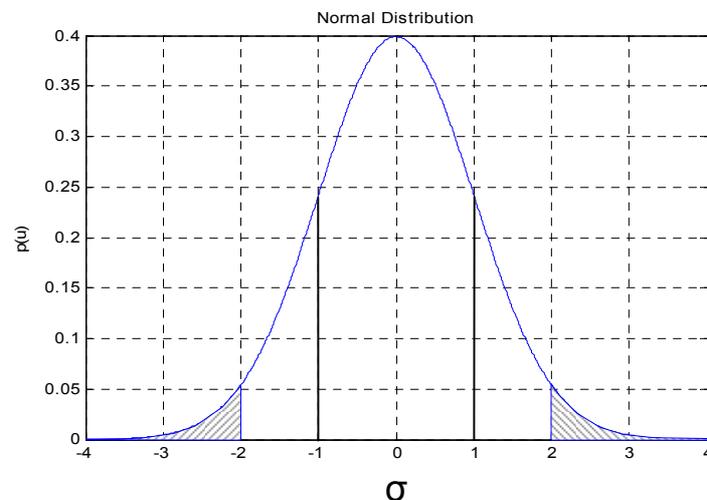


Abb. 15: Normalverteilung

Beim I- und Q-Signal im Basisband ist der Crest-Faktor jedoch limitiert. Es lässt sich also ein konkreter Wert für den Crest-Faktor angeben.

Der theoretisch höchste Spitzenwert tritt ein, wenn alle 1705 Träger mit maximalen Betrag und gleicher Phase angesteuert sind. Dabei addieren sich alle Spannungsvektoren zu einer maximalen Spitzenspannung. Für den Crest-Faktor bei 1705 Trägern ergibt sich ein Wert von 32,32 dB (Hüllkurvenbetrachtung).

Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Signalspitze, die über diesem Wert liegt, beträgt beim weißen Rauschen 10^{-373} und ist daher nur von theoretischer Bedeutung. Beim DVB-T-Signal sind die Träger jedoch je nach Modus mit QPSK, 16QAM oder mit 64QAM moduliert. Da sich eine 16QAM- oder 64QAM-Modulation auf die Hüllkurve auswirkt, hat bereits jeder Einzelträger einen Crest-Faktor CF_c . Das QPSK-Signal hat dagegen einen Crest-Faktor von 0 dB, da die Umtastung hart, also ungefiltert erfolgt.

Bei einem mit 64QAM modulierten Träger beträgt der Crest-Faktor CF_c im Basisband ca. 3,7 dB. Die höchstmögliche Spannungsspitze von I oder Q nach der IFFT im 2K-Modus liegt dann 36 dB über diesem Effektivwert. Der Crest-Faktor \hat{U}/U im Basisband beträgt also theoretisch 36 dB. In der Praxis wird dieser Wert durch den folgenden D/A-Wandler bzw. in der digitalen Signalverarbeitung aber auf ca. 15 dB begrenzt.

Modulation der Trägerfrequenz

Beim nächsten Schritt der Signalaufbereitung wird die Information aus I und Q mit einem I/Q-Modulator (siehe Abb. 16) auf einen Hochfrequenzträger aufgebracht, um das Signal aussenden zu können. Vor dem Modulator ist je Signaleingang ein Tiefpassfilter geschaltet, um unerwünschte Produkte der Signalaufbereitung aus dem I- bzw. Q-Signal zu entfernen.

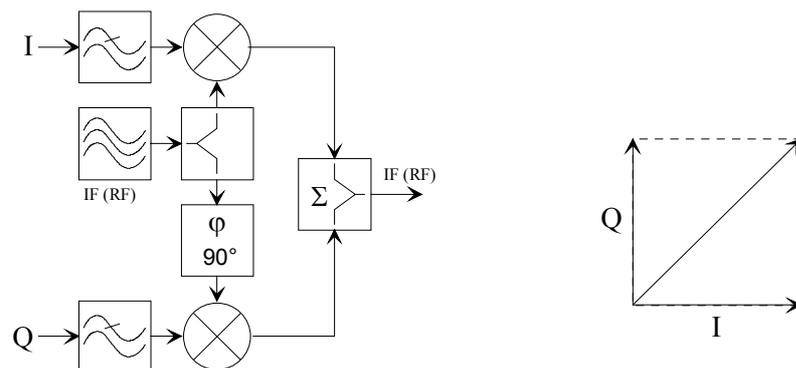


Abb. 16: I/Q-Modulator

Bei der Modulation wird die I-Komponente unmittelbar und die Q-Komponente mit einem um 90° phasenverschobenen Trägersignal multipliziert (gemischt). Anschließend werden beide Signale addiert.

Je nach Sendesystem wird das Signal entweder direkt oder über den Umweg einer Zwischenfrequenz auf die endgültige Sendefrequenz moduliert.

Der Crest-Faktor bei der Erzeugung eines DVB-T-Signals

Die Trägerfrequenz selbst ist dabei unterdrückt. Die Amplitude der Hochfrequenzschwingung entspricht dem Betrag des komplexen Signals aus Real- (I) und Imaginärteil (Q), vgl. Abb. 16 rechts:

$$u_e(t) = \sqrt{u_i(t)^2 + u_q(t)^2} \quad (9)$$

Der Betrag aus I und Q entspricht damit der Hüllkurve des modulierten HF-Signals. Der Effektivwert dieses Betragssignals ist um den Faktor $\sqrt{2}$ größer als der von I bzw. Q.

Das gleiche gilt für die Spitzenspannung. Der Crest-Faktor des Betragssignals ist also unverändert. Das Betragssignal hat jedoch nur noch positive Amplitudenwerte, der lineare Mittelwert ist damit >0 . Es ergibt sich eine andere Amplitudenverteilung als beim I- und Q-Signal (siehe Abb. 17).

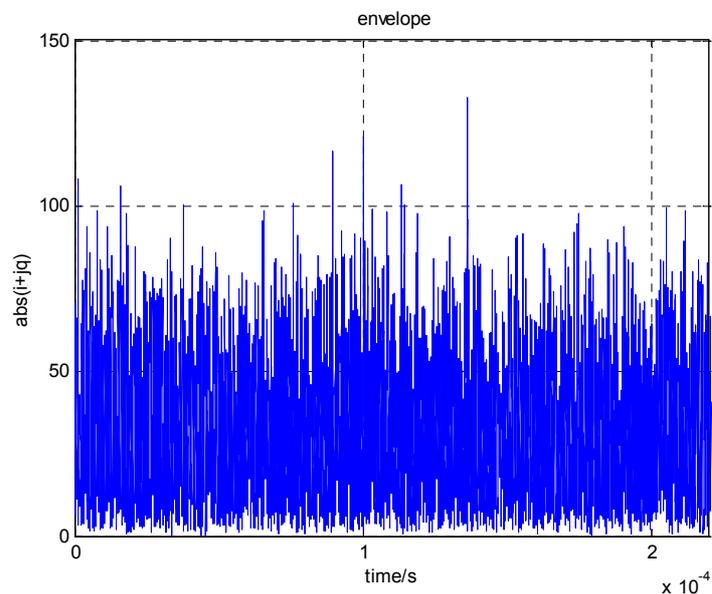


Abb. 17: Zeitsignal der Hüllkurve

Die Wahrscheinlichkeits-Dichte-Funktion wird durch eine Verbund-Wahrscheinlichkeits-Dichte [9] aus zwei unabhängigen Gaußverteilungen gebildet. Hieraus resultiert die Rayleigh-Verteilung $p(r)$:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad \text{mit} \quad u_r^2 = u_i^2 + u_q^2 \quad (10)$$

Abb. 18 zeigt den Funktionsverlauf einer Rayleigh-Verteilung.

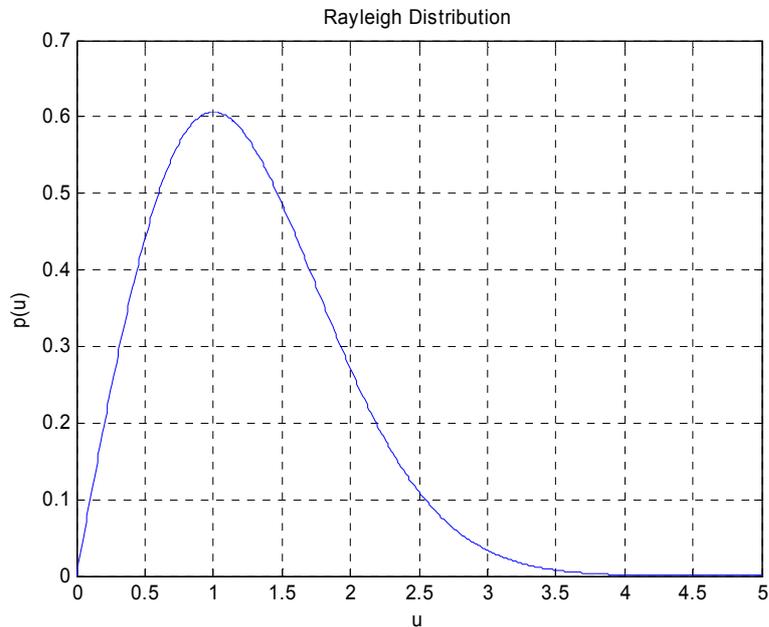


Abb. 18: Rayleigh-Verteilung

Um die Wahrscheinlichkeit zu errechnen, wie häufig Signalspitzen auftreten, die um einen Faktor k größer sind als der Effektivwert, wird wieder das Integral der Wahrscheinlichkeits-Dichte-Funktion gebildet:

$$P_r = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{k\cdot\sigma\cdot\sqrt{2}}^{\infty} e^{-\frac{u_r^2}{2\sigma^2}} \quad (11)$$

Da der Effektivwert des Hüllkurvensignals $\sqrt{2}$ größer ist als bei I bzw. Q, ist bei der Rayleigh-Verteilung der Effektivwert entsprechend $\sigma\cdot\sqrt{2}$. Es zeigt sich, dass beim Hüllkurvensignal die Wahrscheinlichkeit für die Überschreitung eines bestimmten Faktors $k\cdot\sigma\cdot\sqrt{2}$ deutlich geringer ist als beim weißen Rauschen, obwohl der Crest-Faktor des limitierten Signals absolut betrachtet gleich geblieben ist.

Betrachtet man das Zeitsignal $u_{RF}(t)$ des modulierten HF-Signals (siehe Abb. 5), besitzt dieses wie das I- oder das Q-Signal sowohl positive als auch negative Amplitudenwerte. Der lineare Mittelwert beträgt 0 und die Amplitudenverteilung folgt wieder einer Gaußverteilung.

4 Zusammenfassung

Bei der Angabe des Crest-Faktors für das modulierte HF-Signal am Ausgang eines DVB-T-Senders existieren mit der Hüllkurvenbetrachtung und der Trägerbetrachtung zwei mögliche und sinnvolle Betrachtungsweisen.

Hüllkurvenbetrachtung

Da der Sender eine Leistung abgibt, bezieht sich die Angabe des Crest-Faktors meist auf das Verhältnis von Hüllkurvenspitzenleistung (P_{PEP}) zu effektiver (thermischer) Leistung (P_{AVG}) des Senders. Dagegen ist die Angabe der Ausgangsspannung eines Senders eher unüblich. Die effektive Leistung P_{AVG} ist dabei die Nennausgangsleistung, die mit thermischen Leistungsmessköpfen einfach gemessen werden kann.

Die Messung der Spitzenleistung P_{PEP} gestaltet sich ungleich schwieriger. Spitzenleistungsmessköpfe, die in der Lage sind, die seltenen und kurzen Leistungsspitzen in ganzer Höhe zu erfassen, sind kaum verfügbar.

Zu beachten ist, dass die Hüllkurvenspitzenleistung P_{PEP} auch eine effektive Leistung ist, die für die kurze Zeit einer Modulationsspitze abgegeben wird. Bei einem reinen CW-Signal, bei dem die Hüllkurve immer konstant ist, ergibt sich damit ein Crest-Faktor von 0 dB. Der Spitzenwert wird bei der Hüllkurvenbetrachtung also nicht auf den Spitzenwert der HF-Trägeramplitude, sondern auf den Spitzenwert der Modulationshüllkurve bezogen.

Da die Hüllkurve aus dem Betragssignal von I und Q gebildet wird, unterscheidet sich der Crest-Faktor-Wert P_{PEP}/P_{AVG} nicht von dem entsprechenden Wert im Basisband. Messgeräte wie der Spektrumanalysator R&S®FSU oder R&S®FSP bzw. der DVB-T-Messempfänger R&S®EFA von Rohde & Schwarz ermöglichen eine Crest-Faktor-Messung im Basisband.

Neben dem Crest-Faktor zeigen diese Messgeräte auch die Verteilung der Amplituden in Form einer CCDF an, deren Aussagekraft für das Signal höher ist als die alleinige Angabe des Crest-Faktor-Wertes.

Die Messung hoher Crest-Faktoren über 12 dB P_{PEP}/P_{AVG} ist aber auch mit diesen Messgeräten kaum mehr möglich. Der Grund dafür sind die geringen Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten solcher Signalspitzen bzw. die damit korrespondierenden hohen durchschnittlichen Zeitabstände.

Die Amplituden eines idealen DVB-T-Signals sind nach Hüllkurvenbetrachtung näherungsweise Rayleigh-verteilt.

Trägerbetrachtung

Bei der Bestimmung der Durchschlagfestigkeit von HF-Komponenten interessiert jedoch die Spitzenspannung des HF-Trägers. Sinnvoll ist daher die Berechnung des Crest-Faktors aus dem Verhältnis Spitzenspannung des HF-Signals zu Effektivwert. Bei dieser Trägerbetrachtung ergibt sich wie bei einem Sinus-Signal ein um 3,01 dB höherer Wert gegenüber der Hüllkurvenbetrachtung.

Der DVB-T-Messempfänger R&S®EFA ermöglicht auch eine Messung des Crest-Faktors \hat{U}/U des HF-Signals, da das Gerät neben dem Basisbandsignal auch das ZF-Signal abtastet. Angezeigt wird außerdem die Verteilung der Amplituden in Form einer CCDF. Bei der Betrachtung des HF-

Signals sind die Amplituden eines idealen DVB-T-Signals näherungsweise normalverteilt.

Angabe des Crest-Faktors

In Anbetracht des 3 dB-Unterschieds für den Crest-Faktor und der unterschiedlichen Amplitudenverteilungen bei der Hüllkurven- und der Trägerbetrachtung ist die Angabe des Crest-Faktors alleine noch ohne Aussagekraft.

Solche Werte sind damit nur zusammen mit einer Zusatzangabe der Berechnungsmethode bzw. der Betrachtungsweise gültig, z. B. P_{PEP}/P_{AVG} , „Hüllkurvenbetrachtung“, „Trägerbetrachtung“ oder „Ermittlung im Basisband“. Da mit steigenden Werten für den Crest-Faktor die Signalspitzen immer seltener auftreten, das Messergebnis also stark von der jeweiligen Messzeit abhängt, gehört zu einem Messwert zwingend die Angabe des Messintervalls bzw. der Anzahl der Abtastwerte. Eine gute Übersicht der Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von Signalspitzen bietet in diesem Zusammenhang die CCDF.

Der Crest-Faktor bei großen Sendeanlagen

Werden bei einer großen Anlage mehrere Sender mit unterschiedlichen Betriebskanälen auf eine Antenne geschaltet, vergrößert sich der Crest-Faktor mit jeder Verdopplung der Senderzahl um 3,01 dB. Dabei gibt es keine weitere Begrenzung der Leistungsspitzen, wie etwa in einem Leistungsverstärker, was bei der Auslegung der Spannungsfestigkeit der verwendeten Komponenten berücksichtigt werden muss.

Bei sehr hohen Crest-Faktoren ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Leistungsspitzen sehr gering. Über die Rayleigh-Verteilung kann der durchschnittliche Zeitabstand dieser Leistungsspitzen, deren Amplituden um einen Faktor k über dem Effektivwert liegen, bestimmt werden. Die Häufigkeit stimmt bis etwa 3 dB unterhalb des maximalen Spitzenwerts gut mit der Rayleigh-Verteilung überein. Oberhalb dieses Wertes nimmt sie im Vergleich zu den theoretischen Werten ab.

Bei Crest-Faktoren ab ca. 15 dB bis 17 dB bei der Hüllkurvenbetrachtung ist die Wahrscheinlichkeit für Leistungsspitzen so gering, dass noch höhere Werte vernachlässigt werden können. Das bedeutet, dass bei Anlagen ab ca. 5 Sendern mit einem konstanten Crest-Faktor von ca. 15 dB bis 17 dB gerechnet werden kann.

5 Literatur

- [1] dB or not dB? Application Note [1MA98](#), Rohde & Schwarz, 7/2005
- [2] Christoph Balz, Ermittlung der CCDF – Zwei Messmethoden im Vergleich, Neues von Rohde & Schwarz, Heft 172 (2001/III), S. 52 - 53
- [3] Sigmar Grunwald, Messung an MPEG2- und DVB-T-Signalen (4), Neues von Rohde & Schwarz, Heft 172 (2001/III), S. 44 - 48
- [4] Seamus O’Leary, Understanding Digital Terrestrial Broadcasting, Artech House, 2000
- [5] Andrea Goldsmith, Wireless Communications, Cambridge University Press 2005, S. 393 – 394
- [6] Walter Fischer, Digital Television, A Practical Guide for Engineers, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004
- [7] E. Schrüfer, Elektrische Messtechnik, Carl Hanser Verlag München, 1990
- [8] Friedrich Landstorfer, Heinrich Graf, Rauschprobleme in der Nachrichtentechnik, 2. Auflage 1991, Oldenbourgverlag München
- [9] Prof. Dr.-Ing. Dietmar Rudolph, Anwendungen der Fourier-Transformation, Teil 6, Skript zur Vorlesung Signale und Systeme, TFH Berlin

6 Weitere Informationen

Anfragen und Anregungen zu dieser Applikationsschrift sind immer willkommen. Bitte senden Sie sie per E-Mail an Broadcasting-Transmitters.rsd@rohde-schwarz.com.

Bitte besuchen Sie auch die Internetseite von Rohde & Schwarz www.rohde-schwarz.com. Hier finden Sie weitere Applikationsschriften und andere nützliche Informationen.



ROHDE & SCHWARZ GmbH & Co. KG · Mühldorfstraße 15 · D-81671 München · Postfach 80 14 69 · D-81614 München ·
Tel (089) 4129 -0 · Fax (089) 4129 - 13777 · Internet: <http://www.rohde-schwarz.com>

This application note and the supplied programs may only be used subject to the conditions of use set forth in the download area of the Rohde & Schwarz website.