

Ein scharfer Blick auf kleine Zellen

Dieser Artikel befasst sich mit Basisstationsklassen mit relativ geringer Leistung (Femto, Pico, Micro).

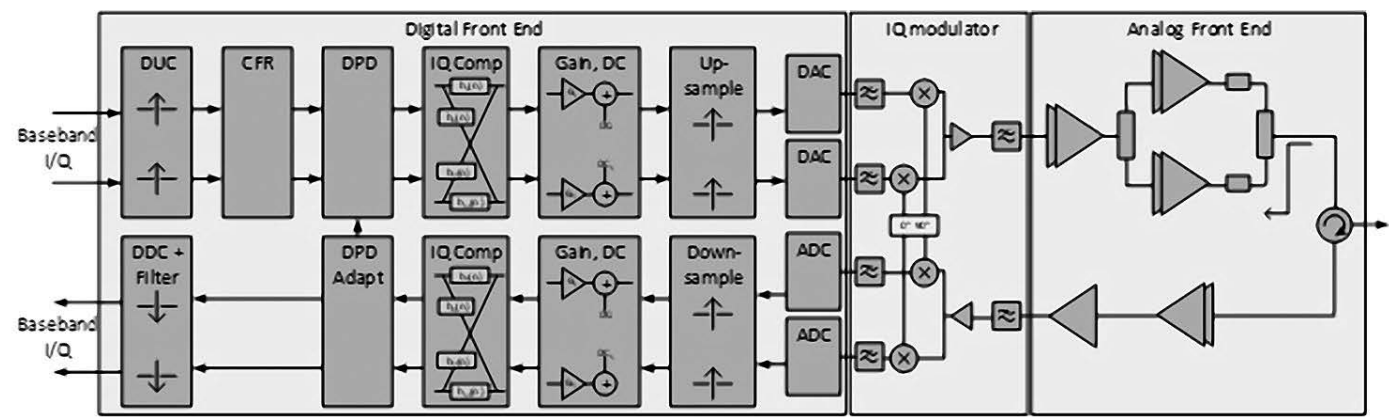


Bild 2: Typische Frontend-Architektur eines Small-Cell-Funkmoduls

Zu den Vorteilen von 5G für Verbraucher und Unternehmen zählen höhere Datendurchsätze, geringere Latenzzeiten und erhöhte Netzzuverlässigkeit. Auf der Funkseite wird dies durch die Nutzung höherer HF-Bandbreiten – über 100 MHz hinaus – in den Sub-6-GHz-Bändern (wie den gängigen C-Bändern) sowie durch Modulationsverfahren höherer Ordnung (256-QAM) ermöglicht. Beide Faktoren stellen in Verbindung mit den strengen 3GPP-Anforderungen an die HF-Spektrums-Konformität hohe Anforderungen an HF-Entwickler hinsichtlich der Optimierung auf Systemebene.

Zwei Ansätze

Betrachtet man die HF-Anforderungen für FR1-Basisstationen (<6 GHz), lassen sich zwei Ansätze zur Definition des Systems unterscheiden. Erstens die von 3GPP standardisierte Definition (in der Normenreihe 38.104 für 5G), siehe Tabelle 1. Die von 3GPP definierten Basisstationsklassen sind wichtig, da sie die minimalen HF-Anforderungen festlegen, die das Produkt erfüllen muss. Beispiele hierfür sind die Fehlervektoramplitude (EVM) des Sendesignals (die sich aus der Modulationsordnung ergibt) sowie das Nachbarkanal/Leck-Verhältnis (ACLR) und andere unerwünschte Signalübertragungen (z.B. HF-Störspitzen) außerhalb des beabsichtigten Sendefrequenzspektrums. Diese Mindestanforderungen an die HF-Leistung unterscheiden sich je nach Basisstationsklasse und sind im Allgemeinen für Produktklassen mit geringerer Leistung (z.B. Local Area) weniger streng. Zusätzlich zu den 3GPP-Basisstationsklassen können wir eine Marktsegmentierung definieren, die typische Produkte umreißt, die von Mobilfunknetz-Betreibern (MNOs) oder in privaten Netzwerken eingesetzt werden, siehe Tabelle 2. Es gibt keine standardisierten Definitionen dieser Zelltypen, daher ist zu beachten, dass diese Definition eine gewisse Flexibilität

aufweist. Um diese Basisstationsklassen mit relativ geringer Leistung (Femto, Pico, Micro) geht es hier.

Anforderungen an die HF-Konformität

Wie oben erwähnt, definieren 3GPP 38.104 und verwandte Standards wichtige Anforderungen an die HF-Konformität auf Basis der jeweiligen Leistungsklasse. Es gibt separate Anforderungskataloge für die Send- und Empfangsleistung. Zu den wichtigsten Anforderungen, die sich auf die digitale und analoge Sendekette auswirken, gehören die Fehlervektoramplitude und das Nachbarkanal/Leck-Verhältnis.

Anforderungen an die Fehlervektoramplitude

Die EVM ist ein Maß für die Verzerrung (wobei „Fehler“ hier als Differenz zwischen dem beabsichtigten und dem tatsächlich gesendeten Signal definiert ist) der Übertragung, definiert in 3GPP 38.104, Kapitel 6.5. Das Nachbarkanal/Leck-Verhältnis (ACLR) (s. folgenden Abschnitt) und die EVM-Leistung stehen insofern in Zusammenhang, als beide ein Maß für die Verzerrung sind. Der Vollständigkeit halber führen wir daher für jedes Modulationsschema die von 3GPP festgelegten Mindestanforderungen an die EVM-Leistung auf, siehe Tabelle 3.

Quelle:
Design Considerations:
5G Small Cell Radios
NXP Semiconductors
www.nxp.com
Richardson RFPD
www.richardsonrfpd.com

Base Station Class	Distance (m)	Power
Local Area	>2	≤250 mW/24 dBm
Medium Range	>5	≤6.3 W/38 dBm
Wide Area	>35	No upper limit

Tabelle 1: 3GPP-Basisstationsklassen (FR1)

Cell Type	Location	Users	Radius (m)	RF Power	MIMO
Femto	Indoor	10s	10s	100 mW/20 dBm	2R2T..4R4T
Pico	Indoor/Outdoor	<100	100	250 mW/24 dBm	4R4T
Micro	Outdoor	100..1000	<1000	<10 W/40 dBm	4R4T..8R8T
Macro	Outdoor	<1000	<5000	100 W/50 dBm	4R4T
MMIMO	Outdoor	<100	<5000	<200 W/53 dBm	16R16T..64R64T
FR2	Indoor/Outdoor	<100	<1000	<75 dBm	100s

Tabelle 2: Marketing-Segmentierung

Leistungsabstand zum Nachbarkanal (Adjacent Channel Leakage Power Ratio)

Das ACLR ist das Verhältnis der (gefilterten, mittleren) Leistung auf dem zugewiesenen Kanal zur (gefilterten, mittleren) Leistung auf einer benachbarten Kanalfrequenz. 3GPP definiert zwei Grenzwerte für ACLR: den ACLR-Grenzwert der Basisstation und den absoluten Basisgrenzwert für ACLR der Basisstation. Gemäß dem Kapitel „Mindestanforderungen für BS-Typ 1-C“ gilt für jeden Antennenanschluss der jeweils weniger strenge Grenzwert. Die ACLR-Grenzwerte sind als Abweichungen von der Trägerfrequenz definiert, und zwar als Funktion der Frequenz, wie in Bild 1 unten für den ACLR-Grenzwert der Basisstation dargestellt, s. auch Tabelle 4.

Der ACLR-Grenzwert der Basisstation wird durch ein quadratisches Filter definiert, dessen Durchlassbandbreite der Bandbreite des gesendeten Signals (BWConfig) entspricht, das auf die zugewiesene Kanalfrequenz zentriert ist, und dessen Unterdrückung auf den Frequenzen der benachbarten Kanäle gemäß den Tabellen festgelegt ist (grafisch dargestellt in Bild 1 oben). Das ACLR wird im Allgemeinen als relativer Abstand in dB zur Kanalfrequenz definiert.

Die absoluten Grundgrenzwerte für den ACLR der Basisstation sind in Tabelle 5 unten aufgeführt und werden in dBm/MHz angegeben (daher über einen viel kleineren

Bandbreitenabschnitt als der ACLR-Grundgrenzwert der Basisstation, der über eine 3GPP-Kanalbandbreite definiert ist).

Betrachten wir als Beispiel eine Basisstation für den Nahbereich (Picozelle) mit einer Nennausgangsleistung von 24 dBm und einem einzelnen 100-MHz-5G-NR-Träger. Dabei lassen wir vorerst die HF-Verluste und -Ineffizienzen außer Acht und betrachten nur den Ausgang (Antennenanschluss) gemäß den 3GPP-Spezifikationen.

Spektrale Leistungsdichte (PSD) in dBm/MHz:

$$\begin{aligned} \text{PSD [dBm/MHz]} &= 24 \text{ dBm} - 10\log_{10}(\text{BW[Hz]}/1 \text{ MHz}) \\ &= 24 - 20 = 4 \text{ dBm/MHz} \end{aligned}$$

Definieren wir nun die Leistungsgrenzen:

- ACLR-Basisgrenzwert, einheitlich für die Offsets A, B, C, D: relativ zum Träger und gemessen über die Trägerbandbreite: 45 dBc
- Absolute ACLR-Grundgrenze: in PSD ausgedrückt: -32 dBm/MHz
relativ zum Träger: 4 dBm/MHz - -32 dBm/MHz oder 36 dB Versatz vom Träger

Da die weniger strenge Anforderung gilt, ist die absolute ACLR-Grundgrenze der Grenzwert, der am ehrgeizigsten angestrebt werden sollte. Beachten Sie, dass dieser mit einem schmalen Filter spezifiziert ist als die ACLR-Grundgrenzwertspezifikation – vermutlich, um einen höheren Pegel nahe am gewünschten Signal zu erfassen. Wenn der Rauschpegel relativ flach ist und Störspitzen begrenzt sind, wird meist der absolute Grundgrenzwert angewendet.

Architektur des Funk-Frontends

Die digitale Basisbandverarbeitung (Schicht 1 oder physikalische Schicht/PHY) sowie die Schichten 2 und 3 (Medium Access Control/MAC, Radio Link Control/RLC, Packet Data Convergence Protocol/PDCP) werden typischerweise durch eine Kombination aus digitalem Signalprozessor (DSP), Hardware-Beschleuniger (für Vorwärtsfehlerkorrektur, Verschlüsselung und andere

rechenintensive Funktionen) und Allzweckprozessor (GPP) gestellt.

Das digitale Frontend (DFE) bereitet die vom Basisband-Verarbeitungssystem erzeugten Signale auf, multiplext sie und leitet sie an den HF-Leistungsverstärker zur Übertragung weiter. Ein digitaler Aufwärtswandler empfängt die vom Basisband erzeugten Träger, formt deren Impulse und summiert sie gemäß dem vorgeschriebenen Muster des Trägers unter Verwendung von Überabtastung und Filterung. Das DFE kann eine Spitzenfaktor-Reduktion (CFR) zur Begrenzung des Spitzen-zu-Durchschnitt-Leistungsverhältnisses (PAPR) sowie zur Signallinearisation mittels digitaler Verzerrung (DPD) einsetzen; beides kann den Wirkungsgrad des Leistungsverstärkers erhöhen. Nach der digitalen Aufwärtskonvertierung, der HF-Filterung (zur Entfernung unerwünschter Emissionen außerhalb des Bandes) und der Verstärkung (einschließlich der Endstufe des Leistungsverstärkers) gibt es häufig weitere Komponenten, die die HF-Leistung, die 3GPP-Konformität und den HF-Ausgangsleistungspegel beeinflussen können, etwa der Antennen-Sende-/Empfangsschalter, der Koppler für Leistungsmessungen und die Implementierung des DPD-Rückkopplungspaths sowie das HF-Bandpassfilter. Es ist zu erwarten, dass die Ausgangsleistung an der Antenne aufgrund dieser Verluste 2...3 dB unter der Leistung am Ausgangspin des Leistungsverstärkers liegt.

Spitzen-zu-Mittelwert-Leistungsverhältnis und Crest-Faktor

Das Spitzen-zu-Durchschnitts-Leistungsverhältnis (PAPR) ist das Verhältnis zwischen der Spitzen- und der Durchschnittsamplitude des Signals – gemessen entweder als quadrierte Spitzenamplitude (Spitzen-zu-Durchschnitts-Leistung) oder als Spitzenamplitude einer Wellenform geteilt durch den Effektivwert der Wellenform (Crest-Faktor). Multicarrier-Anwendungen, wie OFDM bei 5G, weisen ein sehr hohes PAPR von 8 bis 15 dB auf.

Modulation Scheme (PDSCH)	Required EVM
QPSK	17.5%
16 QAM	12.5%
64 QAM	8%
256 QAM	3.5%
1024 QAM	2.5% (≤ 4.2 GHz) 2.8% (> 4.2 GHz)

Tabelle 3: (Mindest-)EVM-Anforderungen an den Sender

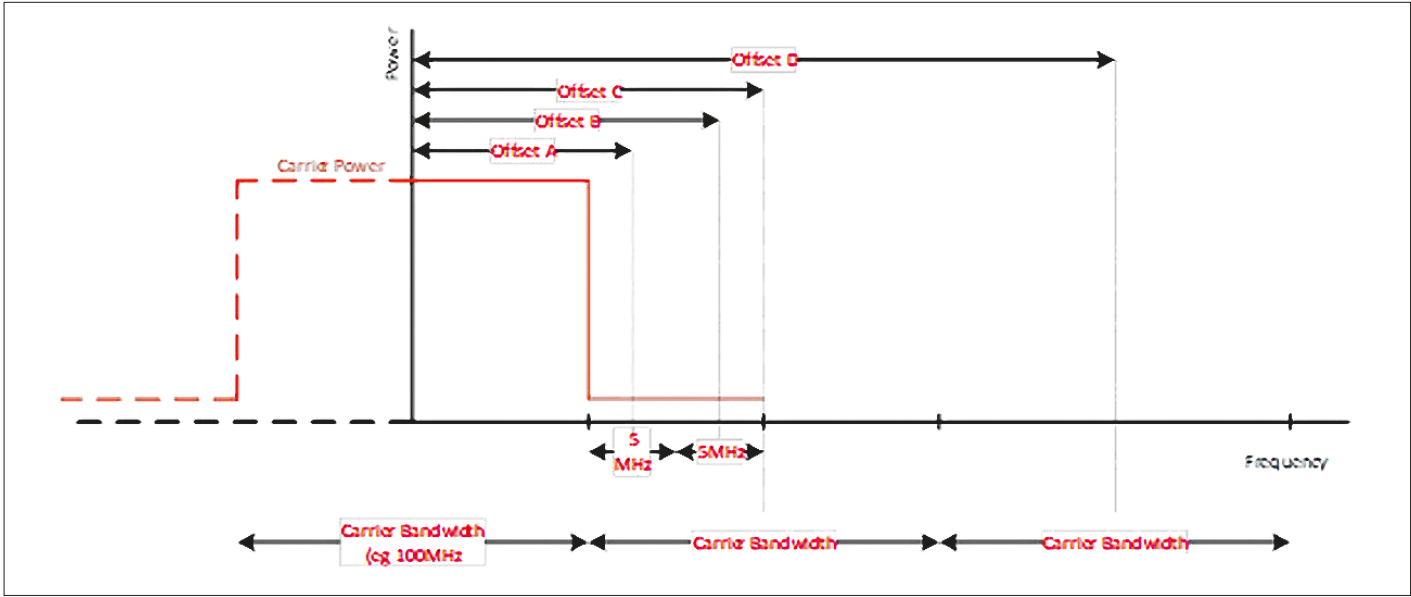


Bild 1: ACLR-Frequenzdefinitionen

PAPR- bzw. Spitzenfaktor-Messergebnisse werden in einem Diagramm anhand der komplementären kumulativen Verteilungsfunktion (CCDF) dargestellt, wobei die Prozentwerte auf der vertikalen Achse angeben, wie oft die Signalleistung über der auf der horizontalen Achse angegebenen Durchschnittsleistung liegt. Die horizontale Achse zeigt den Wert in dB an, um den die tatsächliche Leistung über der Durchschnittsleistung liegt. Das PAPR ist wichtig, da die Sendekette, um (nahezu) 100% des Signals korrekt zu übertragen, in der Lage sein muss, nicht nur den Haupt-/Durchschnittssignalpegel zu bewältigen, sondern auch den Signalpegel, der von dem Anteil des Signals ausgeht, der die Spitzenwerte aufweist. Das bedeutet, dass die Sendekette für den PAPR-Wert in dB als Sicherheitsmarge ausgelegt werden muss. Wenn man beispielsweise eine Sendekette mit einer Durchschnittsleistung von 24 dBm für ein 5G-Signal mit 10 dB PAPR entwickelt, muss man sie für $(24 + 10 =) 34$ dBm Spitzenleistung auslegen. Das ist der Pegel, den die Endstufe (PA) aussenden muss, ohne die Signalqualität wesentlich zu beeinträchtigen. Dies ist offensichtlich ein wichtiges Thema beim Systemdesign und

zugleich eine Ursache für Ineffizienzen in den Entwürfen.

Daher wird bei Mobilgeräten (Uplink) die Wellenform auf Single-Carrier-FDMA (SC-FDMA) umgestellt, die im Vergleich zu OFDMA einen um etwa 3 dB geringeren PAPR aufweist. Alternativ kann der Crest-Faktor des OFDMA-Signals der Basisstation durch eine Technik namens Crest-Faktor-Reduktion (CFR) verringert werden.

Optimierung auf Systemebene

Die hier relevanten Fragen lauten: (1) Welche Kompromisse sind in einem HF-System zu berücksichtigen und (2) wie sind Optimierungsmaßnahmen anzugehen? Die Antworten hängen stets von den Optimierungszielen ab. Dieser Beitrag konzentriert sich auf den Aufbau eines Systems, das 3GPP-HF-konform und gleichzeitig auf das niedrigstmögliche Gleichstrom-Gesamtleistungsbudget optimiert ist, da der Stromverbrauch mit den Bereitstellungskosten für den Kunden, den Kosten für Stromversorgung und Kühlung sowie mit den Auswirkungen auf die Umwelt zusammenhängt.

Angesichts dieser Optimierung hinsichtlich des Gleichstromverbrauchs wird der Leistungsverstärker als der Teil des Systems mit dem höchsten Stromverbrauch identifiziert; daher sollte er so stromsparend wie möglich ausgelegt werden. Je höher die Ausgangsleistung, desto mehr Gleichstrom wird verbraucht, wobei der Wirkungsgrad die wichtigste Kennzahl ist. 5G-Systeme werden typischerweise im Zeitduplexverfahren (TDD) betrieben werden, was bedeutet, dass der Sender etwa 70% der Zeit in Betrieb ist.

Es sind einige Punkte zu beachten. Erstens hängen die HF-Wirkungsgrade vom Betriebsband ab, wobei als Faustregel gilt, dass niedrigere Frequenzbänder typischerweise höhere Wirkungsgrade erlauben. Die Wirkungsgrade im FR2-/Millimeterwellen-Bereich liegen bei wenigen Prozent, während moderne Low-Band-Leistungsverstärker mit bis zu 50% arbeiten. Zweitens sind niedrige Wirkungsgrade nicht verbindlich. Das HF-Signal lässt sich für die Übertragung effizienter gestalten, indem man es so anpasst, dass der PAPR gesenkt wird, wodurch der Leistungsverstärker näher an seiner Spitzenleistung betrieben werden kann (CFR).

BW_{Channel}	ACLR Basic Limit	Adjacent channel carrier	Adjacent channel filter	ACLR limit
5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100	BW_{Channel}	NR of same BW	Square (BW_{config})	45 dB
	$2 \times BW_{\text{Channel}}$	NR of same BW	Square (BW_{config})	45 dB
	$BW_{\text{Channel}}/2 + 2.5 \text{ MHz}$	5 MHz E-UTRA	Square (4.5 MHz)	45 dB
	$BW_{\text{Channel}}/2 + 7.5 \text{ MHz}$	5 MHz E-UTRA	Square (4.5 MHz)	45 dB

Tabelle 4: Grundgrenzwert für ACLR an der Basisstation

Drittens kann die Leistung des PAs durch Kompensation seiner Nichtlinearität mittels Linearisierung oder digitaler Vorverzerrung (DPD) gesteigert werden, wie im Originalbeitrag näher erläutert wird.

Der Spagat

Um die verschiedenen Auswirkungen von CFR und DPD zu veranschaulichen und das Gleichstrombudget des HF-Leistungsverstärkers für verschiedene Arten von Small Cells abzuschätzen, wurde eine Analyse anhand von drei Sendeleistungsszenarien durchgeführt, die die zu Beginn dieses Artikels definierten Klassen der Femto-, Pico- und Mikro-Basisstationen abdecken. Im Folgenden wird eine gängige Implementierung mit 100 MHz belegtem Spektrum im Band n78 (3,3 bis 3,8 GHz) angenommen.

Femto – 20 dBm mit GRF5536

In den unteren Ausgangsleistungsklassen geht der Kompromiss zwischen Energieeffizienz und Linearität zugunsten der Linearität – die zusätzliche Komplexität im digitalen Bereich, um mehr Leistung aus dem System herauszuholen, wiegt den potenziellen Vorteil nicht auf, mehr Leistung am HF-Ausgang zu erzielen. Der Guerrilla RF GRF5536 ist ein mehrstufiges HBT-Bauelement mit hoher Verstärkung und hoher Linearität für eine relativ bescheidene Sendeleistung von 22 dBm bzw. 160 mW bei einem 100-MHz-OFDMA-Signal (LTE) mit einem PAPR von 9,8 dB am Eingang. Unter der Annahme eines Verlusts von ca. 2 dB zwischen dem Leistungsverstärker und dem Antennenanschluss wird die HF-Leistung bei einem Design mit diesem Leistungsverstärker wahrscheinlich die für ein System der Femto-Klasse typische Marke von 20 dBm erreichen. Die Stromaufnahme dieses Bauteils beträgt 290 mA bei 5 V (1,45 W, 160 mW/1445 mW = 11% PA-Wirkungsgrad). Dieses Gerät ist als „lineare Leistungsstufe“ konzipiert, da es keine Vorverzerrung benötigt, um die EVM- und ACLR-Anforderungen zu erfüllen. Dies vereinfacht das Systemdesign, indem es den Bedarf an Rechenressourcen und andere Komplexitäten reduziert.

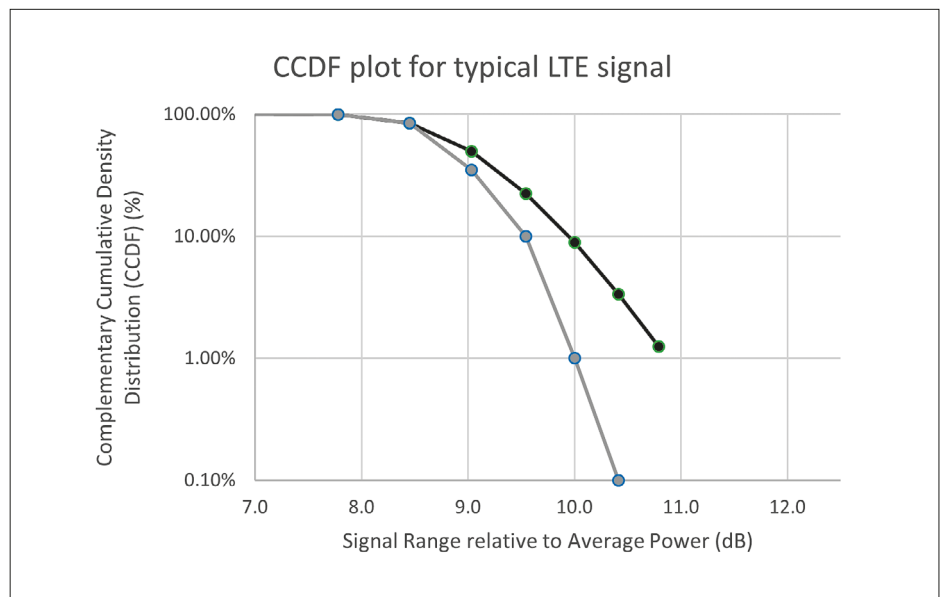


Bild 3: CCDF-Diagramm für ein typisches LTE-Signal, ohne (schwarz) und mit (grau) angewandeter CFR

Pico – 24 dBm mit SKY66520

Weiter oben auf der Leistungskurve liegt die nächste Kategorie bei der Ausgangsleistung von 24 dBm oder ~0,25 W für die Antenne. Ein bekannter PA für diesen Markt ist der Skyworks SKY66520, ein hocheffizienter, breitbandiger 50-Ohm-MMIC für 3,3 bis 3,8 GHz. Bei diesen Ausgangsleistungen gewinnen die Gleichstromaufnahme (und die damit verbundenen Kühlkosten) an Bedeutung, und die Effizienzziele liegen höher (~25%). Bei diesen Werten zahlen sich die Kosten für die Vorverzerrung sehr schnell aus. Hinzu kommt, dass der SKY66520 eine Vorverzerrung im System erfordert, um die von 3GPP vorgegebenen ACLR- und EVM-Anforderungen zu erfüllen.

Mikro – 36 dBm mit A3M36SL039

Bei noch höheren Ausgangsleistungen dominiert die mit der Leistungsstufe verbundene Gleichstromaufnahme die Systemleistungsaufnahme. Der NXP A3M36SL039, ein vollintegriertes 50-Ohm-Leistungsmodul mit Doherty-Konfiguration und automatischer Vorspannungsregelung, liefert die entsprechende Ausgangsleistung bei

einem Wirkungsgrad von ca. 35% mithilfe von komplexer DPD, wobei die investierte Rechenleistung durch den Effizienzvorteil aufgewogen wird. In einer Small-Cell-Anwendung mit vier Antennen und 70% Sendeaktivität beträgt der mit dem Leistungsverstärker verbundene Gleichstromverbrauch: 4 (Antennen) × 4 W (36 dBm) × 70% (Sendeaktivität)/35% (Wirkungsgrad) = 32 W

Zusammenfassung

Das 5G-Systemdesign umfasst nicht nur die Optimierung auf Komponentenebene, sondern auch Kompromisse zwischen dem Energieverbrauch in verschiedenen Teilen des Systems, wie beispielsweise dem Modem-SoC und dem HF-Frontend (einschließlich des Leistungsverstärkers). Die Festlegung der Grenzen des Anwendungsfalls hilft dem Systementwickler, diese Kompromisse zu finden. In der Regel erfordern Sender mit geringer Sendeleistung (weniger als 15 dBm) weder CFR noch DPD und sind für kostensensible Systeme vorgesehen, die keine entsprechende Systemkomplexität zulassen. Mit steigender Leistung (15 bis 24 dBm) sorgt CFR für eine Verbesserung der Sendeleistung bei nur geringfügig höherer Systemkomplexität. In den meisten Fällen benötigen die bei diesen Leistungspegeln eingesetzten PAs kein DPD. Bei Leistungspegeln von 24 dBm und mehr ist DPD erforderlich, um die 3GPP-HF-Konformität mit den in diesen Systemen verwendeten PA-Architekturen zu erreichen. Bei höheren Leistungspegeln ist die digitale Komplexität, die mit CFR und DPD einhergeht, im Hinblick auf die Gleichstrom-Energieeffizienz fast immer den Nutzen wert. ◀

BS Class	ACLR Basic Limit	Power	Tolerance (normal)	Tolerance (extreme)
Cat A Wide Area	-13 dBm/MHz	Not defined	± 2 dB	± 2.5 dB
Cat B Wide Area	-15 dBm/MHz	Not defined	± 2 dB	± 2.5 dB
Medium Range	-25 dBm/MHz	≤38 dBm	± 2 dB	± 2.5 dB
Local Area	-32 dBm/MHz	≤24 dBm	± 2 dB	± 2.5 dB

Tabelle 5: Absolute Grundgrenze für ACLR der Basisstation