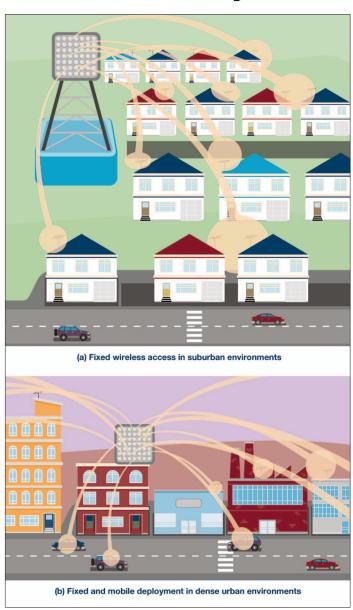
### **Bits-to-Beams:**

# Technologieentwicklung für 5G-Millimeterwellen-Funksysteme

Als die Mobilfunkbranche mit der Entwicklung der fünften Mobilfunkgeneration (5G) begann, schien 2020 in weiter Ferne. Inzwischen befindet sich 2020 in greifbarer Nähe und wird mit Gewissheit den Beginn des 5G-Jahrzehnts einläuten.







Autor: Dr. Thomas Cameron Analog Devices www.analog.com Fast täglich berichtet die Presse über neue Feldversuche sowie kommende kommerzielle 5G-Rollouts und bescheinigt damit der Mobilfunkbranche eine sehr spannende Zeit.

# Viele Herausforderungen

Momentan liegt der Schwerpunkt der Branche bei 5G auf der Anwendungskategorie Enhanced Mobile Broadband (eMBB), die eine extrem hohe Datenrate zur Verfügung stellt und Dienste mit hohen Bandbreiten unterstützt. Dabei sind Beamforming-Techniken für unterschiedliche Frequenzbänder im Midband (3,4 bis 3,7 GHz) und im Highband (28 GHz) nötig. Auch entstehen erste Anwendungsfälle, zum Beispiel die Industrieautomation, welche von der geringen

Latenz der 5G-Netzwerkarchitektur profitieren.

Erst vor wenigen Jahren diskutierte die Branche über die Möglichkeit, das Spektrum im Millimeterwellenbereich für den Mobilfunk zu nutzen und die Herausforderungen für Entwickler von Funksystemen zu umreißen1. In kurzer Zeit ist sehr viel geschehen und die Mobilfunkbranche hat sich von ersten Prototypen hin zu erfolgreichen Feldversuchen rasant entwickelt. Heute steht die Mobilfunkbranche kurz vor den ersten kommerziellen Einsätzen von 5G im Millimeterwellenbereich. Viele der ersten Implementierungen sind feste oder ortsungebundene Funkanwendungen. Darüber hinaus wird es in naher Zukunft jedoch auch echte mobile Connectivity bei Frequenzen im Millimeterwellenbereich geben.

Die ersten Standards sind vorhanden und die Technologie entwickelt sich schnell. Zudem ist viel Wissen in den Einsatz von Millimeterwellensystemen eingeflossen. Trotz großer Fortschritte müssen Entwickler von Funksystemen auch zukünftig viele Herausforderungen meistern. Einige Herausforderungen für HF-Entwickler erläutert der folgende Beitrag. Er hat drei Schwerpunkte. Im ersten Teil wird auf einige der vorrangigen Einsatzfälle für die Millimeterwellenkommunikation eingegangen und die anschließende Analyse vorbereitet. Der zweite und dritte Teil widmet sich den Architekturen und der Technologie für auf Millimeterwellen basierte Basisstationssysteme. Der zweite Teil erörtert Technologie für die Beamformer und erläutert, wie die erforderliche Übertragungsleistung die Wahl der Technologie für das System-Frontend beeinflusst.

Obwohl der Beamformer in der Presse weitgehend im Fokus

Linkbudget 200-m-Verbindung bei 28 GHz/800 MHz Bandbreite	Downlink (Basisstation)	Uplink (CPE)
Antennenelemente	256	64
Gesamtausgangsleistung am PA (dBm)	33	19
Antennengewinn (dB)	27	21
Tx EIRP (dBm)	60	40
Pfadverlust (dB)	135	135
Empfangsleistung (dBm)	-75	-95
thermisches Grundrauschen (dBm)	-85	-85
Rx-Rauschzahl (dB)	5	5
SNR pro Rx-Element (dB)	5	-15
Rx-Antennengewinn (dB)	21	27
Rx-SNR nach Beamforming (dB)	26	12

Tabelle 1: Beispiel einer 5G-Basisstation

steht, gibt es einen ebenso wichtigen Teilbereich des Funksystems, die Umwandlung der Bits in Millimeterwellenfrequenzen (Bits to Millimeter Wave Frequency). Vorgestellt wird hier ein Signalkettenbeispiel für diesen Systemteilbereich. Zusätzlich werden neue Bauteile von Analog Devices für diesen RF-Bereich vorgeschlagen, die Entwickler von Funksystemen dafür nutzen können.

# Einsatzszenarien und Ausbreitung

Bei der Entwicklung von Technologie ist es wichtig, deren späteren Einsatz zu verstehen. Alle Entwicklungsaufgaben erfordern Kompromisse und mit entsprechendem Knowhow können kreative Innovationen entstehen. Bild 1 zeigt zwei Szenarien im 28- und 39-GHz-Spektrum. Bild 1a veranschaulicht den Einsatzfall eines drahtlosen Teilnehmeranschlusses (Fixed Wireless Access, FWA), bei dem versucht wird, Haushalten in ländlichen Bereichen die Übertragung von Daten mit hoher Bandbreite zu ermöglichen. In einem solchen Fall befindet sich die Basisstation meist auf einem Mast oder Turm und muss aus Gründen der Wirtschaftlichkeit ein großes Gebiet abdecken.

Bei den ersten Implementierungen wird von einer Outdoorzu-Outdoor-Abdeckung ausge-

gangen, bei der die Teilnehmermodems (Customer Premises Equipment, CPE) im Freien montiert sind und der Link so aufgebaut ist, dass er die beste Over-the-Air-Verbindung ermöglicht. In der Annahme, dass die Antenne nach unten ausgerichtet ist und die Benutzer eine feste Position haben, ist möglicherweise kein großer vertikaler strahllenkender Bereich (Steering Range) erforderlich. Allerdings kann die übertragene Leistung recht hoch sein und über 65 dBm EIRP (Equivalent Isotropic Radiated Power) betragen, um die Funkabdeckung zu maximieren und bestehende Infrastruktur zu nutzen.

Bild 1b skizziert ein dicht besiedeltes städtisches Gebiet, in dem sich die Basisstation an einem niedrigeren Standort, beispielsweise auf einem Dach oder an einer Hausfassade, befindet – zukünftig vielleicht auf Straßenlaternen oder anderen Befestigungen auf Straßenniveau montiert.

Auf jeden Fall muss diese Art von Basisstation eine vertikale Abtastung (Vertical Scanning) ermöglichen, um Signale über die gesamte Gebäudefassade zu liefern – mit der weiteren Verbreitung von Mobilgeräten früher oder später vielleicht auch an mobile oder ortsungebundene Nutzer am Boden (Fußgänger und Fahrzeuge).

In diesem Fall muss die übertragene Leistung nicht unbedingt so hoch sein wie im Falle des dicht besiedelten städtischen Gebietes. wobei sich Niedrigenergiefenster (Low-E-Glas) bei der Durchdringung vom Außen- in den Innenbereich als problematisch erwiesen hat. Wie gezeigt, ist eine höhere Flexibilität im Strahlabtastungsbereich (Beam Scanning Range) erforderlich, und zwar auf der horizontalen und der vertikalen Ebene. Die wichtigste Erkenntnis an dieser Stelle ist, dass es keine Patentlösung gibt. So bestimmt das jeweilige Einsatzszenario die Beamforming-Architektur, die wiederum die Wahl der HF-Technologie beeinflusst.

Ein praktisches Beispiel mit einem einfachen Linkbudget soll die Anforderungen an die Übertragungsleistung einer Millimeterwellen-Basisstation gemäß Tabelle 1 veranschaulichen. Der zusätzliche Pfadverlust, verglichen mit dem bei Mobilfunkfrequenzen, ist eine große Hürde bei Millimeterwellenfrequenzen. Darüber hinaus sind Hindernisse wie Gebäude, Laub oder Menschen zu berücksichtigen.

Es gibt eine Fülle von Arbeiten, die sich in den letzten Jahren mit der Ausbreitung bzw. Übertragung bei Millimeterwellen beschäftigen. Einen guten Überblick enthält der Artikel "Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks-with a Focus on Propagation Models." [2] Darin werden mehrere Modelle diskutiert und verglichen und die Abhängigkeit des Pfadverlustes von der Umgebung veranschaulicht sowie Szenarien mit und ohne Sichtverbindung (Line-of-Sight, LOS, bzw. Non-Line-of-Sight, NLOS) verglichen. Ohne hier auf Details einzugehen, lässt sich im Allgemeinen sagen, dass ein NLOS-Szenario für eine feste Mobilfunkimplementierung herangezogen werden sollte, wobei die gewünschte Reichweite und die Geländebeschaffenheit zu berücksichtigen sind.

Im hier erwähnten Beispiel geht es um eine Basisstation im städtischen Außenbereich mit einer Reichweite von 200 m. Angenommen wurde ein Pfadverlust von 135 dB bei einem Outdoorzu-Outdoor-Link ohne Sichtverbindung. Bei der Durchdringung vom Außen- in den Innenbereich kann der Pfadverlust sogar 30 dB größer sein. Wenn hier dagegen das LOS-Modell annehmen würden, kann der Pfadverlust in etwa nur 110 dB betragen. In diesem Fall werden 256 Elemente in der Basisstation und 64 Elemente in der Ausrüstung am Standort des Endanwenders (Customer Premise Equipment, CPE) angenommen. In beiden Fällen kann die Ausgangsleistung mit einer Siliziumimplementierung erreicht werden. Die Verbindung wird als asymmetrisch angenommen, was eine gewisse Erleichterung beim Uplinkbudget mit sich bringt. Die durchschnittliche Verbindungsqualität in diesem Fall sollte im Downlink eine Quadratur-Amplituden-Modulation mit 64 Stufen (QAM64) und im Uplink QAM16 ermöglichen.

Die Verbindungsqualität im Uplink lässt sich verbessern, indem man, falls erforderlich, die Übertragungsleistung im CPE bis zu den jeweiligen gesetzlichen Grenzwerten erhöht. Dehnt man die Reichweite der Verbindung auf 500 m aus, wird der Pfadverlust um etwa 150 dB steigen. Dies ist machbar,

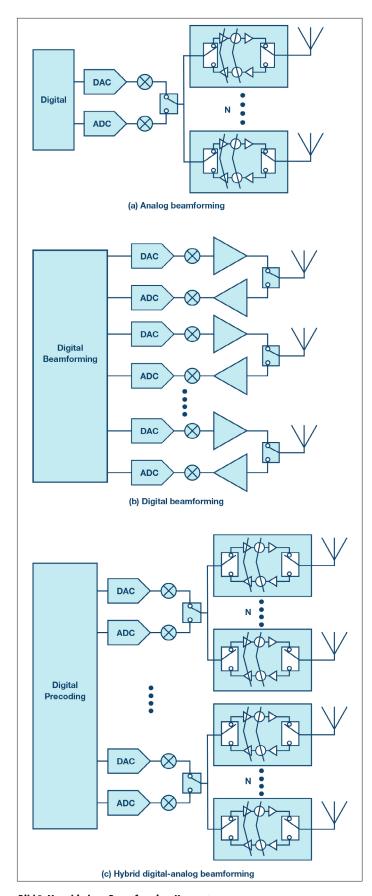


Bild 2: Verschiedene Beamforming-Konzepte

Funksysteme im Uplink und im Leistungsbedarf erheblich.

erhöht aber die Komplexität der Downlink. Außerdem steigt der

# Millimeterwellen-**Beamforming**

Es gibt analoge, digitale und hybride Konzepte zur Formung des Antennensignals (Bild 2), wobei das analoge Beamforming (ABF) in den letzten Jahren viel diskutiert wurde. Beim ABF werden die digitalen Signale in und aus Breitband-Basisbandoder ZF-Signale gewandelt. Ein Funkempfänger übernimmt die Auf- und Abwärtswandlung. Bei Hochfrequenz (z.B. 28 GHz) wird der einzelne HF-Pfad in mehrere Pfade aufgeteilt. Dort findet das Beamforming statt, indem die Phase jedes Pfads so gesteuert wird, dass ein Beam im Fernfeld in Richtung des betreffenden Benutzers geform wird. Dies ermöglicht es, einen Strahl pro Datenpfad zu lenken. Theoretisch lässt sich mit dieser Architektur jeweils ein Nutzer bedienen.

Der digitale Beamformer entspricht genau dem, wonach es sich anhört. Die Phasenverschiebung ist rein in der digitalen Schaltung implementiert und wird über ein Transceiver-Array in das Antennenarray eingespeist. Vereinfacht gesagt, befindet sich an jedem Antennenelement ein individueller Empfänger. Allerdings könnten in der Praxis je nach gewünschter Sektorenform mehrere Antennenelemente pro Funksystem vorhanden sein.

Digitales Beamforming ermöglicht die höchste Kapazität und Flexibilität und schafft die Voraussetzung für die Roadmap hin zu Multi-User-MIMO bei Millimeterwellenfrequenz, ähnlich wie Midband-Systeme. Es ist hochkomplex und, angesichts derzeit verfügbarer Technologie, wird sowohl in HF- als auch in Digitalschaltkreisen übermäßig viel DC-Leistung verbraucht. Trotz allem wird aufgrund der zukünftigen technologischen Entwicklung das digitale Beamforming für Millimeterwellen-Funksysteme sich verbreiten.

Das praktischste und effektivste Beamforming-Konzept der nahen Zukunft ist der hybride digital/analoge Beamformer, der im Wesentlichen digitales und analoges Beamforming kombiniert und in einem Bereich mehrere Beams gleichzeitig erzeugt (Spatial-Multiplexing, SM). Indem man Leistung in Richtung der gewünschten Nutzer mit schmalen Beams lenkt. kann die Basisstation das gleiche Spektrum wiederverwenden, um gleichzeitig mehr als nur einen Nutzer zu bedienen.

Während es verschiedene Konzepte für den in der Literatur beschriebenen Hybrid-Beamformer gibt, ist das hier gezeigte Subarray-Verfahren das praktischste und im Wesentlichen eine Wiederholung der Schritte von analogen Beamformern. Aktuelle Systeme unterstützen zwei bis acht digitale Beams, die sich gleichzeitig für einzelne Nutzer nutzen lassen. Alternativ können zwei oder mehr MIMO-Layer für eine geringere Anzahl an Nutzern zur Verfügung gestellt werden.

#### Genauer betrachtet

Lassen Sie uns etwas tiefer in die Technologieauswahl für den Analog-Beamformer eintauchen. Bild 3 zeigt den Funktionsblock, auf dem der Hybrid-Beamformer aufbaut. Für die hier durchgeführte Betrachtung wurde das analoge Beamforming-System in die Blöcke digital, Bits-zu-Millimeterwellen und Beamformer aufgeteilt. Bei einem praktischen System, das man so nicht partitionieren würde, würde man alle Millimeterwellen-Bauteile in unmittelbarer Nähe platzieren, um Verluste abzuschwächen. Warum der Aufbau jedoch so erfolgte, wird im Folgenden deutlich

Die Beamformer-Funktion wird durch viele Faktoren beeinflusst, beispielsweise Segmentform und -reichweite, Leistungspegel, Pfadverlust und thermische Einschränkungen. Zudem erfordert dieser Bereich von Millimeterwellensystemen noch eine gewisse Flexibilität, während die Branche lernt und reift. Und zusätzlich wird es weiterhin viele Übertragungsleistungspegel geben, die erforderlich sind,

um Implementierungsszenarien von Small Cells bis Macro Cells abzudecken.

Andererseits kommt das Bits-zu-Millimeterwellen-Funksystem für eine Basisstation mit weitaus geringerer Flexibilität aus und kann größtenteils von der aktuellen Release 15 Spezifikation abgeleitet werden.3 Anders ausgedrückt, ein Entwickler kann das gleiche Funksystem in Verbindung mit mehreren Beamformerkonfigurationen wiederverwenden. Dies ist nicht anders als bei aktuellen Mobilfunksystemen, bei denen der kleine Signalbereich über Plattformen gleich und die Eingangsstufe auf den jeweiligen Einsatzfall zugeschnitten ist.

Basierend auf das Fortschreiten möglicher Technologien soll dies für die Signalkette abgebildet werden, wenn wir vom digitalen Bereich zur Antenne übergehen. Sicherlich werden die digitalen und Mixed-Signal-Bereiche in CMOS-Massenprozessen hergestellt. Entsprechend der Anforderungen der Basisstation könnte die gesamte Signalkette in CMOS entwickelt werden. Wahrscheinlicher iedoch ist eine Mischung aus Technologien, mit der sich die optimale Leistungsfähigkeit für die Signalkette erzielen lässt.

Zum Beispiel nutzt eine gebräuchliche Konfiguration CMOS-Wandler mit einer hochleistungsfähigen SiGe-BiCMOS-ZF-zu-Millimeterwellen-Wandlung. Der Beamformer kann, wie gezeigt, entsprechend der Systemanforderungen in mehreren Technologien implementiert werden. Darum geht es als nächstes. Je nach Wahl der Antennengröße und benötigter Übertragungsleistung kann es in ein hochintegriertes Siliziumkonzept implementiert werden. Alternativ ist eine Kombination aus Silizium-Beamformer mit diskretem PA und LNA möglich.

Eine Analyse der Beziehung zwischen Transmitter-Leistung und Wahl der Technologie wurde in bisherigen Arbeiten vorgestellt [4, 5] und wird hier nicht vertieft. Bild 4 zeigt eine Zusam-

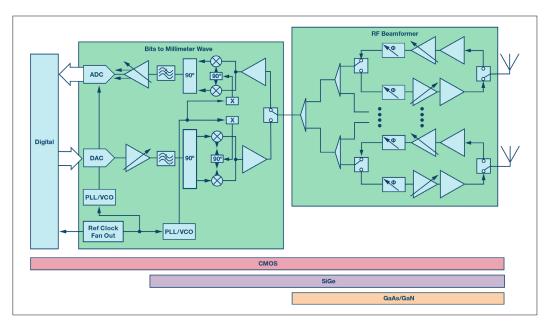


Bild 3: Blockdiagramm eines analogen Beamforming-Systems

menfassung der Analyse. Bei der Wahl der Technologie für den Leistungsverstärker sind die notwendige Transmitter-Leistung, der Äntennengewinn (mit Zahl der Elemente) und die HF-Leistung der gewählten Technologie zu betrachten. Wie die Grafik zeigt, lässt sich die gewünschte EIRP mit weniger Antennenelementen erreichen, wenn II-V-Technologien in der Eingangsstufe (geringe Integration) oder ein siliziumbasiertes Konzept mit hoher Integrationsdichte zum Einsatz kommt. Jede Vorgehensweise hat ihre Vor- und Nachteile und bei der praktischen Implementierung geht es um die jeweiligen Engineering-Kompromisse aus Größe, Gewicht, DC-Leistungsaufnahme und Kosten.

Um eine EIRP von 60 dBm für den Fall aus Tabelle 1 zu erreichen, folgert die Analyse aus der Präsentation "Architectures and Technologies for the 5G mmWave Radio" [5], dass die optimale Antenne zwischen 128 und 256 Elemente enthält, wobei die geringere Anzahl nur mit GaAs-Leistungsverstärkern erreicht wird. Die Antennen mit 256 Elementen lässt sich mit Beamformern in jeder Silicon HF-IC-Technologie realisieren.

Im Folgenden wird das Problem aus einer anderen Perspektive untersucht. Eine EIRP von 60 dBm ist ein übliches Designziel für einen drahtlosen Teilnehmeranschluss (FWA). Je nach gewünschter Reichweite der Basisstation und der Umgebung kann dieser Wert jedoch höher oder niedriger sein. Wegen der vielen Varianten der Einsatzszenarien mit hohen Bäumen, Straßenschluchten oder großen Freiflächen gibt es ein großes Spektrum an Pfadverlusten, denen Entwickler als Herausforderung von Fall zu Fall gegenüber stehen. Zum Beispiel kann in einer dicht besiedelten städtischen Umgebung unter Annahme von LOS das EIRP-Ziel sogar nur 50 dBm sein.

Es gibt Definitionen und veröffentlichte Spezifikationen sowie Übertragungsleistungsgrenzen der FCC entsprechend der Geräteklasse 3,6 Hier werden die 3GPP-Terminologie für Basisstationen vefolgt [3]. Die Geräteklasse gibt mehr oder weniger die Wahl der Technologie für den Leistungsverstärker vor (Bild 5). Es ist zwar keine exakte Wissenschaft, doch lässt sich erkennen, dass sich Mobilgeräte gut für CMOS-Technologie eignen und eine relativ geringe Anzahl an Antennen die erforderliche Übertragungsleistung erzielen kann.

Diese Art Funksystem muss eine sehr hohe Integrationsdichte aufweisen und hohe leistungseffizient anbieten, damit die Anforderungen an portable Geräte erfüllt werden.

Die Local-Area-Basisstation (Small Cell) und Consumer Premise Equipment haben ähnliche Anforderungen und umfassen einen ähnlichen Bereich an Technologien, wobei CMOS am unteren Bereich der Leistungsübertrager genutzt wird und SiGe BiCMOS im höheren Bereich. Medium-Range-Basisstationen eignen sich ideal für SiGe-BiC-MOS-Technologie und ermöglichen einen kompakten Formfaktor.

Für das obere Ende (Wide-Area-Basisstationen) gibt es eine Reihe von Technologien, deren Einsatz sich aus Kompromissen aus Antennengröße und Technologiekosten ergibt. Während SiGe BiCMOS im 60-dBm-EIRP-Bereich eingesetzt werden kann, sind GaAs- oder GaN-Leistungsverstärker praktikabel für höhere Leistungen.

Bild 5 zeigt anhand aktueller Technologie, dass die Branche große Fortschritte macht. [5] ist zu entnehmen, dass eine der wichtigsten Herausforderungen für Entwickler darin besteht, die DC-Leistungseffizienz von Mil-

hf-praxis 6/2019 5

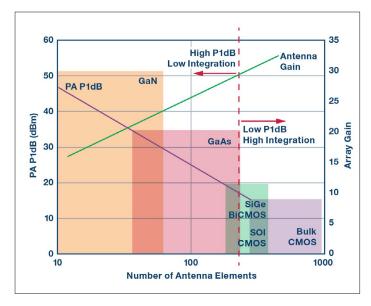


Bild 4: Beziehung zwischen benötigter Transmitter-Leistung, Größe der Antenne und Wahl der Halbleitertechnologie für eine Antenne mit einer äquivalenten isotropen Strahlungsleistung (EIRP) von 60 dBm [5]

limeterwellen-Leistungsverstärkern zu verbessern.

Mit der Entstehung neuer Technologien und PA-Architekturen werden sich die gezeigten Kurven verschieben und für die High-Power-Basisstationen werden Strukturen mit höherer Integrationsdichte zur Verfügung stehen. Einen guten Überblick über die Fortschritte bei PA-Technologie enthält die Präsentation "A Short Survey on Recent Highly Efficient cmWave 5G Linear Power Amplifier Design." [7]

Als Zusammenfassung des Beamformer-Abschnitts ist die oben gemachte Aussage noch einmal zu betonen und festzuhalten, dass es derzeit keine Patentlösung gibt und eine Vielzahl an Frontend-Entwicklungen nötig sind, um die unterschiedlichen Anwendungsfälle von Small Cells bis hin zu Macro Cells zu adressieren.

# Von Bits zu Millimeterwellen und umgekehrt

Kommen wir nun zum Bits-zu-Millimeterwellenfunk im Einzelnen und untersuchen die Herausforderungen in diesem Teil des Systems. Es ist wichtig, die Bits mit hoher Genauigkeit in Millimeterwellen und zurück zu wandeln, um Modulationstechniken höherer Ordnung wie zum Beispiel die Quadratur-Amplituden-Modulation mit 64 Stufen (QAM64) und in zukünftigen Systemen möglicherweise sogar QAM256 zu unterstützen. Eine der größten Herausforderungen für die neuen Funksysteme ist die Bandbreite. Die Millimeterwellen-Funksysteme für die fünfte Mobilfunkgeneration müssen Bandbreiten von nominal 1 GHz oder höher verarbeiten.

Die Höhe der Bandbreite richtet sich danach, wie das Spektrum in der Praxis zugeordnet ist. Während eine Bandbreite von 1 GHz bei 28 GHz 3,5% bedeutet, stellt die gleiche Bandbreite bei einer ZF von beispielsweise 3 GHz wesentlich größere Herausforderungen bei der Entwicklung und erfordert führende Technologie, damit ein Hochleistungsdesign realisiert werden kann.

Das Beispiel in Bild 6 zeigt das Blockdiagramm eines hochleistungsfähigen Bits-zu-Millimeterwellen-Funksystems mit Bauteilen aus dem HF- und Mixed-Signal-Produktportfolio von Analog Devices. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Signalkette zusammenhängende 8 × 100 MHz NR Frequenzblöcke (Carrier) bei 28 GHz mit außergewöhnlicher Error Vec-

tor Magnitude (EVM), sprich Abweichung der übertragenen Symbole von der Idealkonstellation, unterstützt. Eine nähere Erläuterung der Signalkette und deren demonstrierte Leistungsfähigkeit enthält das Video "5G Millimeter Wave Base Station" [8] von Analog Devices.

Betrachten wir nun die Wandler. Im Bild 6 wird direktes High-ZF-Transmitter-Launching und High-ZF-Empfänger-Sampling gezeigt, wo die Wandler auf der Zwischenfrequenz senden und empfangen. Die Zwischenfrequenz muss so hoch wie auf angemessene Weise erreichbar sein, um störendes Image-Filtering bei HF zu vermeiden und die ZF auf 3 GHz und höher zu bringen. Erfreulicherweise arbeiten führende Wandler bei dieser Frequenz.

Der AD9172 ist ein zweikanaliger 16-Bit-Hochleistungs-D/ A-Wandler, der mit Abtastraten bis 12,6 GSample/s arbeitet. Das Bauteil verfügt über eine JESD204B-Schnittstelle mit acht Lanes und 15 GBit/s und enthält einen leistungsfähigen DAC-Taktmultiplizierer sowie digitale Signalverarbeitungsfunktionen, die Direct-to-RF-Signalerzeugung bis 6 GHz ermöglichen. Im Empfänger befindet sich der AD9208, ein 14-Bit-Dual-A/D-Wandler mit 3 GSample/s. Das Bauteil enthält einen integrierten Puffer sowie einen Abtast-und-Halte-Schaltkreis. Bei der Entwicklung des AD9208 standen Kriterien wie geringe Leistungsaufnahme, kleine Abmessungen und einfache Handhabung im Vordergrund. Der A/D-Wandler ermöglicht in Kommunikationsanwendungen die direkte HF-Abtastung breitbandiger Signale bis über 5 GHz.

In den Übertragungs- und Empfangs-ZF-Stufen werden digital in der Verstärkung programmierbare Verstärker (Digital Gain Amplifiers) empfohlen, die unsymmetrische in symmetrische Signale und umgekehrt wandeln, damit keine Baluns benötigt werden. Hier gezeigt sind der ADL5335 in der Übertragungskette und der ADL5569

in der Empfangskette als Beispiele für Hochleistungs-Breitbandverstärker.

Für die Auf- und Abwärtswandlung zwischen ZF und Millimeterwellen eignen sich der Breitband-Aufwärtswandler ADMV1013 und der Abwärtswandler ADMV1014. Die Breitband-Frequenzwandlungs-Bauteile arbeiten von 24,5 bis 43,5 GHz. Aufgrund der breiten Frequenzabdeckung können Entwickler sämtliche aktuell definierte 5G-Millimeterwellenspektren (3GPP-Bänder n257, n258, n260 und n261) mit nur einem Funksystem abdecken.

Beide unterstützen eine ZF-Schnittstelle bis 6 GHz und zwei Frequenzwandlungs-Betriebsarten und enthalten einen 4× Lokaloszillator-Multiplizierer mit LO-Eingang von 5,4 bis 11,75 GHz (Bild 6). Der ADMV1013 ermöglicht die direkte Wandlung vom Basisband-I/Q zu HF sowie Einseitenband-Aufwärtswandlung von ZF. Ferner bietet er eine Wandlungsverstärkung von 14 dB bei einem Ausgangs-IP3 von 24 dBm. Implementiert in einer Einseitenbandwandlung, wie im Bild gezeigt, bietet das Bauteil eine Seitenband-Unterdrückung von 25 dB. Der ADMV1014 unterstützt die direkte Wandlung von HF zu Basisband-I/Q und Abwärtswandlung mit Image-Unterdrückung auf ZF. Das Bauteil bietet eine Wandlungsverstärkung von 20 dB mit einer Rauschzahl von 3,5 dB und einem Eingangs-IP3 von -4 dBm. Die Seitenband-Unterdrückung in der Image-Unterdrückungsbetriebsart beträgt 28 dB.

Die letzte Komponente in der HF-Kette ist der Breitband-Silizium-SPDT-Schalter ADRF5020. Der Switch bietet eine Einfügungsdämpfung von 2 dB und eine Isolation von 60 dB bei 30 GHz.

Abschließend werden die Frequenzquellen erörtert. Da der Lokaloszillator wesentlich zum EVM-Budget beitragen kann, ist es wichtig, für die Millimeterwellen-LO-Erzeugung eine

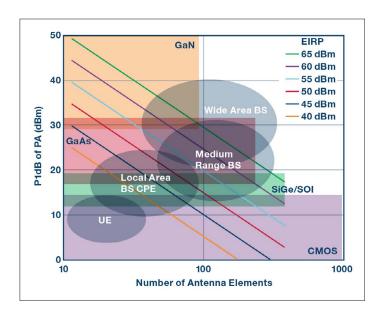


Bild 5: Geeignete Technologie für Millimeterwellen-Funksysteme mit unterschiedlichen Formfaktoren je nach Transmitter-Leistung [5]

Quelle mit niedrigem Phasenrauschen zu verwenden.

Der ADF4372 ist ein Breitband-Mikrowellen-Synthesizer mit integrierter PLL und einem VCO, der ein ultrageringes Phasenrauschen aufweist und 62.5 MHz bis 16 GHz liefert. Das Bauteil ermöglicht die Implementierung von Fractional-Noder Integer-N-PLL-Frequenz-Synthesizern, wenn es mit einem externen Schleifenfilter und einer externen Referenzfrequenz eingesetzt wird. Das VCO-Phasenrauschen bei 8 GHz beträgt -111 dBc/Hz für 100 kHz Offset und -134 dBc/Hz bei 1 MHz Offset.

Die Blockschaltung in Bild 6 ist ein guter Ausgangspunkt für Entwickler, die ein Millimeterwellen-Design in den 28- und 39-GHz-Bändern erwägen, welches sich für den Einsatz in einer Vielfalt von Beamforming-Frontends eignet, und ein leistungsstarkes Breitband-Funksystem benötigen. Der Selection Guide "RF, Microwave, and Millimeter Wave Products' von ADI enthält auch viele Bauteile, die Entwickler für andere Signalkettenarchitekturen oder ähnliche Hochfrequenzanwendungen einsetzen können.

#### Zusammenfassung

Millimeterwellenfunksysteme haben in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht und sind aus dem Labor in Feldversuche für den kommerziellen Einsatz eingezogen, die in den kommenden Monaten starten. Das sich stetig entwickelnde ECOsystem und neu entstehende Anwendungsfälle benötigen etwas mehr Flexibilität im Beamforming-Frontend. Wie erläutert, stehen geeignete Technologien und Konzepte für Antennendesigns zur Verfügung.

Der Breitbandcharakter des Funksystems (Bits-zu-Millimeterwellen) erfordert führende Technologie, wobei sich siliziumbasierte Technologie schnell entwickelt, um die Anforderungen in den Mixed-Signalund Small-Signal-Bereichen zu erfüllen. Ein Hochleistungs-Funksystem mit derzeit verfügbaren Bauteilen wurde als Beispiel vorgestellt.

Während sich das 5G-ECOsystem weiterentwickelt, wird Analog Devices seine führenden Technologien und Lösungen für die Signalkette zur Anwendung bringen, damit Kunden differenzierte Systeme für den neu entstehenden 5G-Millimeterwellenmarkt entwickeln können.

#### Referenzen

- [1] Thomas Cameron: "5G Opportunities and Challenges for the Microwave Industry" Microwave Journal, February 2016
- [2] Theodore S. Rappaport, Yunchou Xing, George R. Mac-Carthy, Jr., Andreas F. Molisch, Evangelos Melios, and Jianhua Zhang: "Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks-with a Focus on Propagation Models" IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Special Issue on 5G, November 2017
- [3] 3GPP 38.104 technical specification. Base Station (BS) Radio Transmission and Reception (Release 15)
- [4] Thomas Cameron: "RF Technology for the 5G Millimeter Wave Radio" Analog Devices, Inc., November 2016
- [5] Thomas Cameron: "Architectures and Technologies for the 5G mmWave Radio" ISSCC 2018, Session 4, mmWave

Radios for 5G and Beyond, February 2018

- [6] Fact Sheet "Spectrum Frontiers Proposal to Identify, Open up Vast Amounts of New High Band Spectrum for Next-Generation (5G) Wireless Broadband"
- [7] Donald C. Lie, Jill Mayeda, and Jota Lopez: "A Short Survey on Recent Highly Efficient cm-Wave 5G Linear Power Amplifier Design" 2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), Boston, MA, August 2017
- [8] "5G Millimeter Wave Base Station" Analog Devices, Inc.

#### **Zum Autor Dr. Thomas Cameron**

ist Director of Wireless Technology bei Analog Devices. In dieser Funktion leistet er Beiträge zu branchenführender Innovation bei integrierten Schaltkreisen für Mobilfunkbasisstationssysteme. Derzeit arbeitet er an der Forschung und Entwicklung von Funktechnologie für 5G-Systeme in Mobilfunk- und Millimeterwellenfrequenzbändern. Vor seiner aktuellen Position bei Analog Devices war er Director of Systems Engineering für die Communications Business Unit. Seinen Ph.D. in Electrical Engineering hat Thomas vom Georgia Institute of Technology erhalten. Er hält sieben Patente im Bereich Drahtlostechnologie und hat zahlreiche technische Paper und Artikel verfasst.

