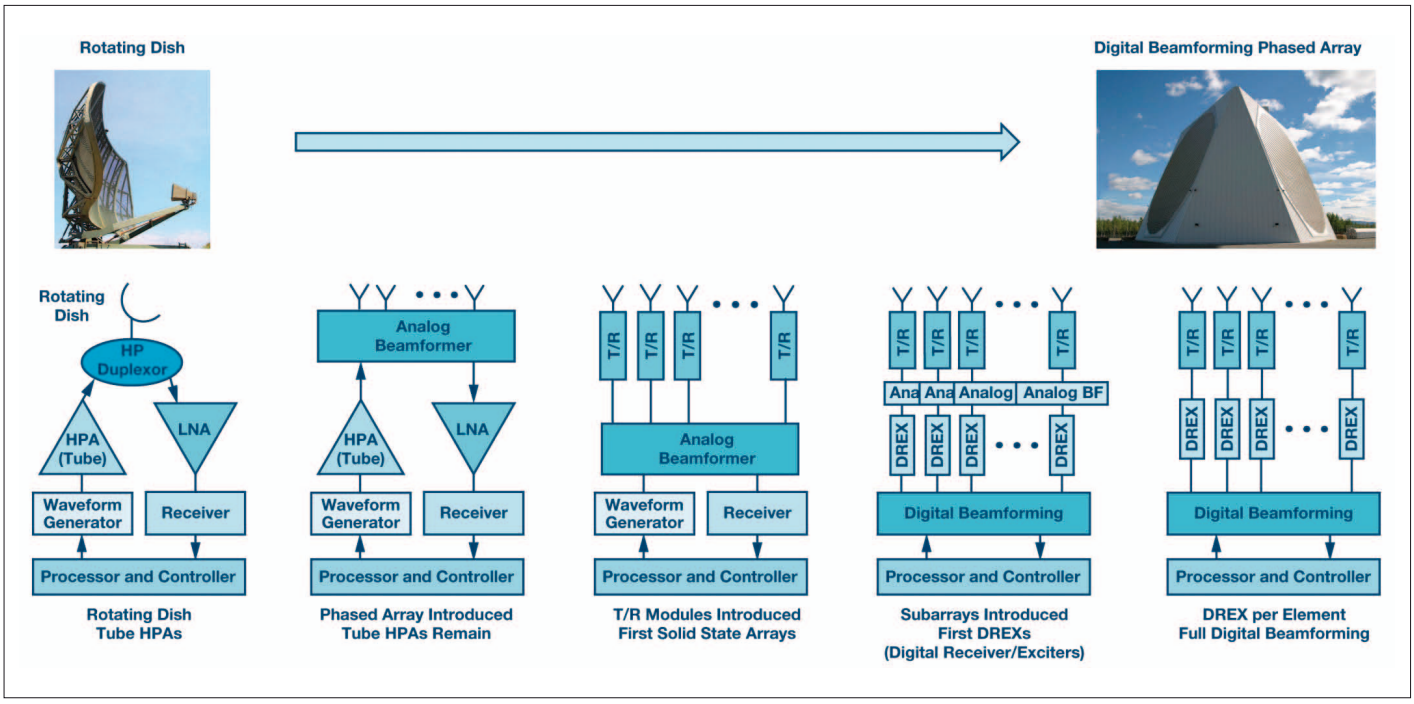
# Hochfrequenz-Elektronik für Phased-Array-Applikationen




***Die Entwicklung des Phased-Arrays. Von den Anfängen der Radare mit rotierenden Parabolantennen bis hin zu den neusten digitalen Phased-Arrays mit vielen Elementen gab es kontinuierlich technologische Fortschritte***

**Hier beantwortet Peter Delos von Analog Devices, Inc. Fragen zu einem wichtigen Zukunftsthema.**

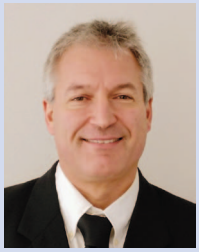
Dieser Artikel fügt einige der Diskussionen, die in den verschiedenen Foren im Internet regelmäßig auftauchen, zu einer umfassenden Darstellung zusammen. Er beginnt mit einer kurzen Geschichte der Phased-Array-Entwicklung, diskutiert Architekturtrends und -Herausforderungen, gibt Einblicke in die jüngsten Entwicklungen und zeigt Links zu Artikeln und Webcasts, die weitere Details zu den verschiedenen Themenschwerpunkten enthalten.

### *Warum ist das Thema „HF-Elektronik für Phased-Arrays" derzeit von Bedeutung?*

Die Hochfrequenz-Elektronik für Phased-Array-Applikationen erlebt derzeit rasante Fortschritte. Sie hat sich durch Integration und Miniaturisierung stark weiterentwickelt. Viele Applikationen profitieren inzwischen von diesen Verbesserungen. Die vollständige Integration großer Teile der Signalkette in integrierte Schaltungen hat speziell die Phased-Array-Antennen ermöglicht und aktuelle Systeme verfügen getrieben durch neueste IC zunehmend über analoge oder digitale Strahlformung.

### *Welche Kompetenzen kann Analog Devices hier vorweisen?*

Bei Analog Devices erhalten wir hierzu regelmäßig Anfragen. Das komplette Portfolio



*Unser Interview-Partner Peter Delos ist technischer Leiter der Aerospace and Defense Group bei Analog Devices in Greensboro, North Carolina. Er erhielt seinen B.S.E.E. von Virginia Tech im Jahr 1990 und seinen M.S.E.E. von NJIT im Jahr 2004. Peter verfügt über mehr als 25 Jahre Branchenerfahrung. Die meiste Zeit seiner Karriere verbrachte er mit der Entwicklung fortschrittlicher RF/Analog-Systeme auf Architektur-, PWB- und IC-Ebene. Derzeit konzentriert er sich auf die Miniaturisierung von Hochleistungsempfängern, Wellenformgeneratoren und Synthesizern für Phased-Array-Anwendungen. Er ist unter peter.delos@analog.com zu erreichen.*

*Analog Devices, Inc.*
*www.analog.com*

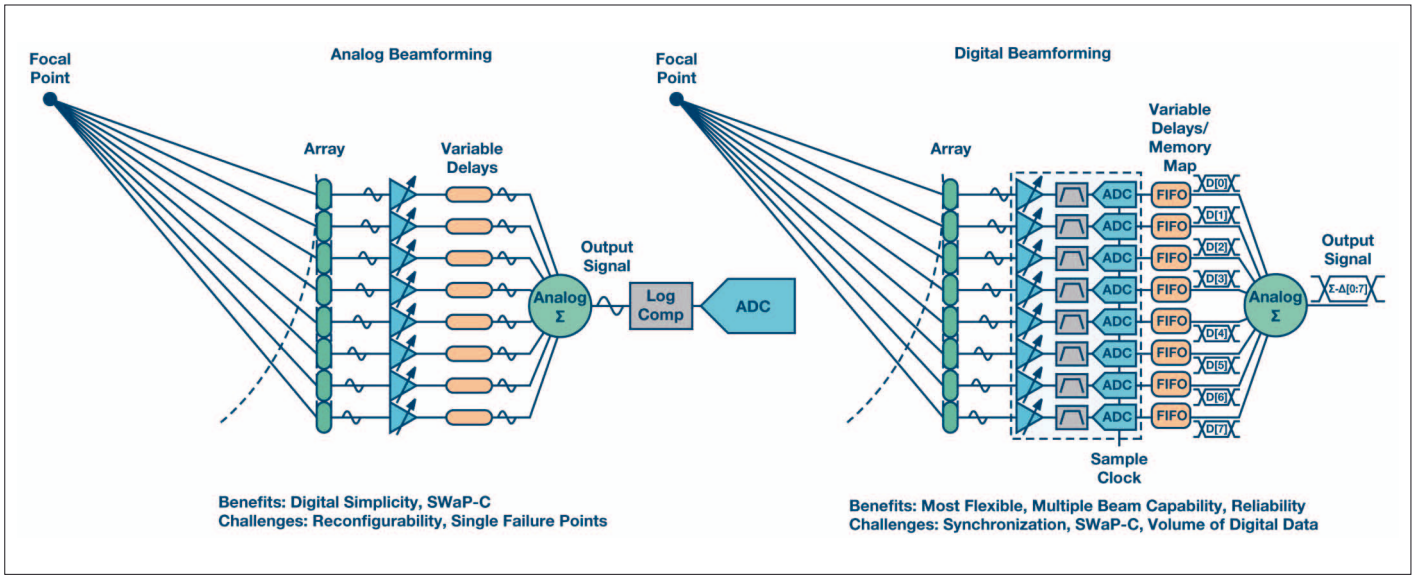



***Bild 1: Analoge vs. digitale Strahlformung***

der Firma bietet eine Antennen-zu-Bit-Lösung, die über HF bis hin zu Hochgeschwindigkeits-Wandlern, Transceivern, PLLs und Power reicht. Zusammen mit fortschrittlichen Integrationstechniken bieten wir auch Expertise in der Systemarchitektur. Unsere Entwicklungen finden viel Beachtung, da sie die gesamte HF-Signalkette abdecken und die Phased-Arrays der Zukunft ermöglichen.

### *Beginnen wir mit den Phased-Arrays. Wo stehen wir heute?*

Ein Großteil der frühen Phased-Array-Entwicklungen zielte auf Radar-Anwendungen, so bekam man über die Entwicklung der Radar-Antennen einen guten Einblick in die modernen digitalen Strahlformantennen. Die Entwicklung des Radars wurde während des Zweiten Weltkriegs und ab da stark beschleunigt. Nach dem Zweiten Weltkrieg wurden die meisten der heute für die Wellenform- und Radarverarbeitung verwendeten Erkenntnisse in zahlreichen staatlichen Laboratorien und Organisationen gewonnen.

Eine wichtige Funktion der Radarsignalverarbeitung ist die Impulskompression. Sie wird durch Modulationsarten wie lineare Frequenzmodulationen (LFMs) und Phasencodes ermöglicht, bei denen ein Impuls am Ausgang eines abgestimmten Filters wesentlich kürzer ist als der gesendete Impuls. Die Höhe der Impulskompression steht in direktem Zusammenhang mit der Signalbandbreite, eine Erkenntnis der sechziger Jahre. Man könnte sagen, die Geburtsstunde des Radars begann mit der Impulskompression. Neue Erkenntnisse und Implementierungen führten schließlich zum modernen Phased-Array.

Die ersten Implementierungen hatten rotierende Parabolantennen, gespeist mit hoher HF-Leistung aus Röhrenverstärkern. Die rotierende Schüssel wurden erstmals in den leistungsstarken Radargeräten durch Phased-Array-Antennen ersetzt. Die Hochleistungs-Röhrenverstärker (HPAs) wurden weiterverwendet und die Sendesignalkette war wie folgt: Röhren-HPAs – Hohlleiterverteilung – Phasenschieber – Strahlerelemente. Die Strahlschwenkung erfolgte rein analog.

Für den Empfang konnten mehrere Strahlmuster erstellt werden, dies war aber komplex und teuer, sodass man sich typischerweise auf wenige Empfangskeulen beschränkte. Antennensysteme für Monopuls-Radare waren so möglich. Der erste Schritt in Richtung Solidstate-Phased-Arrays war die Einführung von Sende-/Empfangs-Modulen (T/R), angebracht an jedem Strahlerelement, wobei die ersten Implementierungen immer noch analoges Strahlformen mit vergleichbarer Backend-Verarbeitung verwendeten. Das T/R-Modul besteht aus einem Halbleiter-HPA zum Senden, einem rauscharmen Verstärker (LNA) zum Empfangen und entweder einem Zirkulator oder einem Schalter zum Steuern der Richtung der Antenne beim Senden oder Empfangen.

Zurzeit erleben wir die Migration zu digitalen Strahlform-Phased-Arrays. Hybride Architekturen, bestehend aus analogen strahlformenden Subarrays mit Empfängern und ADCs hinter jedem Subarray, ermöglichen es der digitalen Strahlformung, viele Keulen innerhalb des Subarray-Musters zu bilden. Alle Elemente eines digitalen Phased-Arrays beinhalten je einen Empfänger und einen Wellenformgenerator. Das digital strahlformende Phased-Array mit jedem so ausgerüsteten Element ist der Wegbereiter für echt software-definierte Antennenmuster. Viele Strahlenkeulen können gleichzeitig in mehrere verschiedenen Richtungen geformt und die Antennenmuster adaptiv gesteuert werden, einschließlich der Nullstellen. Aufgrund der Programmierbarkeit auf Systemebene sind digitale Phased-Arrays mit jedem Element für viele Antennenarchitekten zum Ziel geworden. Die Aufmachergrafik skizziert die Entwicklung des Phased-Arrays.

### *Können Sie den Unterschied zwischen analoger und digitaler Strahlformung näher erläutern?*

Bei der analogen Strahlformung befindet sich hinter jedem Strahlerelement ein Phasenschieber und ein geregelter Verstärker für den HF-Bereich. Die Strahlrichtung wird durch Steuern der HF-Phase jeden Strahlers vor dem Kombiner gebildet. Eine Amplitudenabsenkung kann angewendet werden, um die Nebenkeulenpegel der Antenne zu unterdrücken. Beim digitalen Strahlformen wird ein ähnlicher Prozess durchgeführt, nur eben als komplett digitales Verfahren. Für jedes Strahlerelement gibt es komplette Empfänger mit ADCs, die Strahlformung erfolgt im digitalen Bereich, Phasenverschieber werden digital auf jeden Kanal angewendet und eine gewichtete Summe bildet das Antennenmuster. Da der Strahl digital erzeugt wird, lassen sich viele Antennenstrahlmuster gleichzeitig aus denselben ADC-Daten erzeugen. Dies wird durch Duplizieren der digitalen

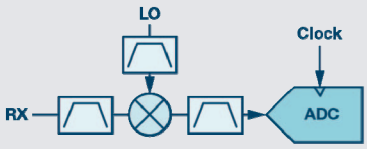
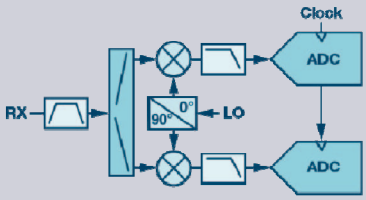
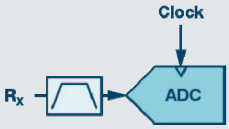
| | | | |
|---|---|---|---|
| Heterodyne |  | ▶ Bewährt / zuverlässig<br>▶ Hohe Leistung<br>▶ Optimale Störanfälligkeit<br>▶ Hoher Dynamikbereich<br>▶ EMV-Immunität | ▶ SwaP<br>▶ Viele Filter |
| Direct Conversion |  | ▶ Maximaler ADC BW<br>▶ Einfachste WB-Option | ▶ Unterdrückung der Spiegelfreq. (Image rejection)<br>▶ I/Q-Saldo<br>▶ In-Band IF-Oberschwingungen<br>▶ LO-Störungen<br>▶ Störfestigkeit (IP2)<br>▶ DC- und 1/f-Rauschen |
| Direct Sampling |  | ▶ Kein Mischen<br>▶ Jetzt auch im L-/S-Band einsetzbar | ▶ ADC-Eingang BW<br>▶ Verstärkung nicht über die Frequenz verteilt |

***Bild 2: Die verschiedenen Architekturen. Obwohl nur der Empfänger dargestellt wird, gelten die Topologien auch für die Signalketten der Wellenformgeneratoren***

Strahlform-Zeitverzögerung und Summierungsstrukturen erreicht. Es handelt sich um eine Form der Parallelverarbeitung, die mehrere Keulen erzeugt, die unabhängig voneinander aus dem gleichen ADC-Datenstrom programmierbar sind. Theoretisch könnte dies auf eine sehr große Anzahl von Keulen ausgedehnt werden. In der Praxis bestimmt die Fähigkeit der digitalen Verarbeitung das realisierbare Limit. Um die Verarbeitung mit praktischen Datenraten zu verbinden, definieren einige Systeme ein Strahl-Bandbreiten-Produkt. Dies ermöglicht einen Kompromiss zwischen der Anzahl der Keulen und der Bandbreite pro Keule. Bild 2 illustriert den Vergleich.

### *Welche Vor- und Nachteile sind zu nennen?*

Ein Vorteil des analogen Beamformings ist die einfache Implementierung. Es werden nur wenige Datenwandler eingesetzt, und damit ergibt sich ein gut beherrschbarer digitaler Entwicklungsaufwand. Die Herausforderung besteht aber darin, dass eine analoge Strahlformungsstruktur für jede Keule geschaffen werden muss. Nach der Strahlformung ergeben sich aber einige Fehlerquellen. Für kostengünstige Systeme mit niedriger Keulenanzahl ist die analoge Strahlformung jedoch eine gute Lösung und wird die erste Wahl sein für kostensensitive Antennensysteme.

Die Vorteile der digitalen Strahlformung liegen in der Flexibilität durch mehrere programmierbare Keulen gleichzeitig in unterschiedliche Richtungen. Leider sind die Herausforderungen beträchtlich, einschließlich der großen Menge an digitalen Daten, der Synchronisation und der physikalischen Größenbeschränkungen für die Elektronik, die hinter jedem strahlenden Element benötigt wird. Trotz dieser Herausforderungen kann die digitale Strahlformung immer noch eine kostengünstige Architektur sein, wenn viele Keulen gleichzeitige von einer einzigen Antenne erzeugt werden.

Ein Kompromiss ist der Mix aus analoger und digitaler Strahlformung. In diesem Fall werden die Strahler-Elemente im analogen Bereich zu Subarrays geformt, dann können Keulen innerhalb des Subarray-Musters digital gebildet werden. Das kann man als eine hybride Architektur betrachtet, die auch sehr beliebt ist, wenn digitales Beamforming gewünscht wird, aber volldigitales Beamforming aufgrund der vielfältigen Herausforderungen oder wegen der Systemkostenbeschränkungen nicht praktikabel ist.

### *Können Sie ihren Anteil in RF-Frontends beschreiben?*

Zuerst definieren wir das RF-Frontend. Dieses besteht typischerweise aus dem T/R-Modul zusammen mit der analogen Strahlformung. In allen diesen Bereichen entwickeln wir Produkte. Neue HPAs und LNAs werden regelmäßig angekündigt, um die Marktanforderungen zu erfüllen. Es gibt auch verlustarme, leistungsstarke Schalter, die im Frontend ein schnelles Umschalten zwischen Senden und Empfang ermöglichen. Diese können in T/R-Module als Komplettlösung integriert werden, wenn dies für Kundenanwendungen sinnvoll ist.

Die Industrie arbeitet intensiv an der Verbesserung der GaN-Technologie für HPAs und LNAs. Motiviert durch zahlreiche Publikationen die z.B. deren höhere Leistungsdichte und höhere Durchbruchspannungen beschreiben. Für Phased-Array-Anwendungen gibt es zusätzliche Motivation. Bei höheren Betriebsspannungen fließt geringerer Strom in die Stromverteilung, was zu einer Effizienzsteigerung des Gesamtsystems führt. Die höheren Durchbruchspannungen führen zu einer längeren Lebensdauer der LNAs und können in einigen Fällen Frontend-Limiter überflüssig machen, die zu einem insgesamt niedrigeren Empfängerrauschen führen, auch wenn die GaN-LNA-Rauschwerte leicht über denen der GaAs-LNA liegen.

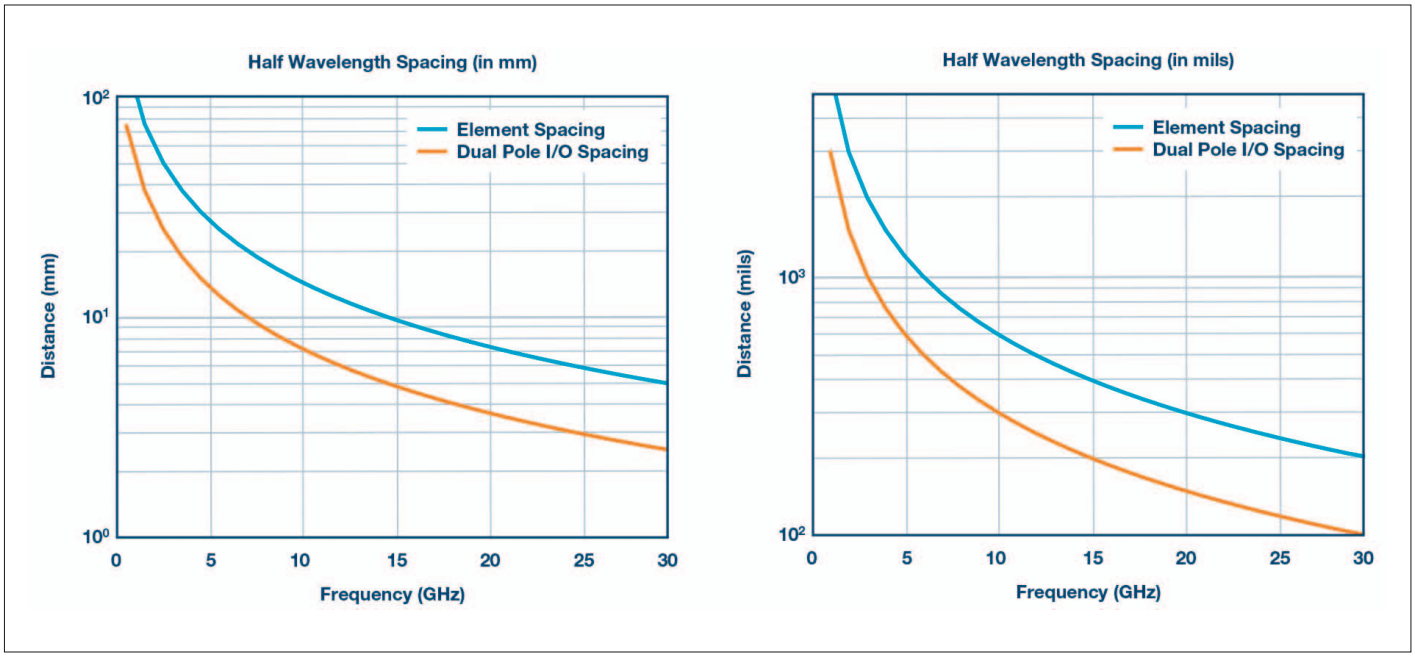



***Bild 3: Halbe Wellenlänge Elementabstand vs. Frequenz***

Für analoge Strahlformer haben wir kürzlich den ADAR1000 vorgestellt. Dies ist ein X- und Ku-Band-4:1-analoger Strahlformer. Zusätzlich zu allen erforderlichen analogen Strahlformungsfunktionen wurde für die HPA/LNA-Impulsformung eine einzigartige Gate-Steuerung integriert. Das schnelle Ein- und Ausschalten wurde durch die Steuerung von Gate und nicht von Drain erreicht. Dieser Ansatz erübrigt das Schalten eines hohen Stroms über Drain. Wir bieten Anwendungshinweise mit Schaltungen für das Gate-Switching und solche die zeigen, wie der ADAR1000 die Steuerung der T/R-Module unterstützt.

### *Welche sind einige der heute implementierten Architekturen für Empfänger und Wellenformgeneratoren?*

Die Architekturen des Empfängers und des Wellenformgenerators lassen sich grob in drei Varianten unterteilen: Heterodyn, Direkt-I/Q Sampling und Inband-Direktabtastung. Es gibt Vor- und Nachteile jeder Architektur, abhängig von der Anwendung. Wir kennen sie alle und entwickeln ICs, die alle Architekturen unterstützen. Bild 2 veranschaulicht die verschiedenen Architekturen. Obwohl nur der Empfänger dargestellt wird, gelten die Topologien auch für die Signalketten der Wellenformgeneratoren.

Das seit 100 Jahren bekannte Heterodyne-Konzept ist bewährt und kann bei richtiger Frequenzplanung eine hervorragende Performance erbringen. Leider ist es das komplizierteste Verfahren. Es benötigt typischerweise die meiste Leistung und den größten physischen Speicherbedarf im Verhältnis zur verfügbaren Bandbreite. Die Frequenzplanung stellt außerdem bei großen Bandbreiten eine große Herausforderung dar. Es ist auch die am wenigsten programmierbare Technik, außer es ist zusätzliche Hardware enthalten, um zwischen einer Vielzahl von Filter- und LO-Pfaden zu wechseln. Einer der neueren Trends ist, moderne Hochgeschwindigkeitswandler und Transceiver einzusetzen, die mit höheren Zwischenfrequenzen arbeiten können. Dies kann Frequenzpläne vereinfachen, Mischstufen eliminieren und Komplexität reduzieren.

Das direkte Abtastverfahren wird seit langem eingesetzt, es muss aber mit Geschwindigkeiten betrieben werden, die der direkten HF-Abtastung entsprechen und eine große Eingangsbandbreite bereitstellen. Heute sind Hochgeschwindigkeitswandler für die direkte Abtastung im S-Band und höher verfügbar, einige sind in den Referenzen aufgeführt. Die Abtastung mit GSPS-Raten mit analogen Eingangsbandbreiten über 6 GHz werden bei den neuesten Hochgeschwindigkeitswandlern neu angeboten. Die direkte Abtastung höherer Frequenzen ist dabei weiterhin im Trend, bedingt durch neue Datenkonverter. Da in den FinFET-CMOS-Knoten der nächsten Generation Transistoren für immer höhere Frequenzen eingesetzt werden und die parasitäre Kapazitäten weiter reduziert, sind neue Datenwandlerfamilien möglich, die einen erheblichen Einfluss auf das zukünftige Design von HF-Systemen haben können.

Direktwandlerarchitekturen nutzen die Datenwandler-Bandbreite am effizientesten. Die Datenwandler erfüllen das erste Nyquist-Kriterium, wo die Performance optimal ist und die Tiefpassfilterung einfacher. Die beiden Datenwandler arbeiten zusammen, um I/Q-Signale abzutasten und so die Nutzbandbreite ohne Verschachtelung zu erhöhen. Die größte Herausforderung für die Direktwandlerarchitektur seit Jahren besteht darin, die I/Q-Balance aufrechtzuerhalten für akzeptable Werte bei Spiegelfrequenz-Unterdrückung, LO-Leckagen und DC-Offsets. In den letzten Jahren hat die gelungene Integration der gesamten Signalkette für die direkte Umwandlung in Kombination mit digitalen Kalibrierungen diese Herausforderungen wesentlich verbessert. Unsere Transceiver-Produktlinie basiert auf direkten Wandlerarchitekturen. Wenn die Leistung passt, sind diese die am besten verfügbaren wirtschaftlich integrierten Lösungen.

### *Gibt es weitere Vorteile durch die Verteilung der Wellenformgeneratoren und Empfänger in einem digitalen Strahlform-Array?*

Eines der Ziele der Systementwicklung mit verteilter HF-Elektronik ist eine Verbesserung des Dynamikbereichs durch die Kombination von Kanälen. Wenn zwei HF-Signale kombiniert werden, und die HF-Signale in Amplitude und Phase angepasst sind und das Rauschen in jedem der Kanäle nicht korreliert ist, gibt es eine 10logN-Kombi-

nationsverstärkung, die eine Verbesserung des Dynamikbereichs bewirkt. Wenn das Rauschen in den Kanälen korreliert ist, gibt es keine Verbesserung, wenn sie kombiniert werden. Daher ist eine der Bemühungen der Systemtechnik, Rauschursachen zu finden, die nicht korreliert. Korreliertes Rauschen kann von gemeinsamen Kanälen kommen, einschließlich Takten, LOs, Versorgung usw.

Bei großen Arrays ist die Verbesserung durch Kanalkombination erheblich. Beispielsweise können 100 Kanäle eine Verbesserung des Dynamikbereichs um 20 dB bringen, wenn die Rauschkomponenten alle unkorreliert sind. Wir haben unsere eigenen mehrkanaligen RF-Testplatinen entwickelt, um sicherzustellen, dass diese Parameter sowohl für die Verwendung unserer Komponenten durch unsere Kunden als auch für unsere eigenen internen Designs zur Verfügung stehen.

### *Befassen Sie sich mit den Problemen durch die physikalischen Abmessungen, denen Designer bei digitalen Strahlform-Phased-Arrays begegnen?*

Eine grundlegende physikalische Herausforderung ist der Elementeabstand in Abhängigkeit von der Wellenlänge, der sich mit zunehmender Betriebsfrequenz verringert. Viele Systeme setzen den Elementabstand auf die halbe Wellenlänge (Bild 3) oder weniger, um Rasterkeulen im Antennenmuster zu vermeiden. Im L- und S-Band ist es praktisch, die Elektronik in einem Abstand von allen Elementen unter Verwendung der neuesten Transceiver oder Direktabtastwandler einzubauen. Da die Frequenz mit dem X-Band (10 GHz) ansteigt, ist es schwierig, aber mit fortgeschrittener Integration möglich. Beim Ka-Band ist es eine große Herausforderung. Mit zunehmender Frequenz sind hybride Architekturen praktischer und ein 4:1-Strahlformer, wie der im ADAR1000, kann die Anzahl der Empfänger/Exciter um den Faktor 4 reduzieren und zusätzlichen Platz für die HF-Elektronik schaffen.

Um diesen Herausforderungen gerecht zu werden, integrieren wir weiterhin ganze Sektionen der Signalketten. Mehrkanalige integrierte Transceiver und Wandler bilden die Basis für HF-Abtastung bei reduziertem Platzbedarf. Darüber hinaus werden das integrierte HF-Design in monolithische RFICs, SiPs (System im Gehäuse) und integrierte T/R-Module kontinuierlich weiterentwickelt. Die Kombination der mehrkanaligen Hochgeschwindigkeitswandler oder Transceiver mit den Fortschritten in der HF-Elektronik ermöglicht die Integration, die für moderne Phased-Array-Implementierungen erforderlich ist.

### *Können sie zum Schluss einige weiterführende Links/ Referenzen angeben?*

Das Phased-Array-Design deckt viele Aspekte der Technik ab, vom Radiofrequenz-Design über die Stromverteilung, das Hochgeschwindigkeits-Digitaldesign, das fortschrittliche Packaging bis hin zur digitalen Signalverarbeitung. Die Breite des Portfolios von Analog Devices deckt all diese Bereiche ab. Das umfassende Angebot von einem einzigen Unternehmen ist einzigartig in der HF/Mikrowellen-Industrie und ein Wegbereiter für Systemintegratoren, die Phased-Array-Antennensysteme entwickeln. Ich habe die Trends und einige weiterführende Überlegungen hier vorgestellt. Unter www.analog.com sind viele weitere technische Informationen sowie alle Produktdatenblätter online erhältlich. Die nachfolgend aufgeführten technischen Artikel, Webcasts und aktuelle ICs, die alle für Phased-Array-Anwendungen gelten, können der Auslöser für weitere Recherchen sein:


Masterson, Claire. “Massive MIMO and Beamforming: The Signal Processing Behind the 5G Buzzwords.” Analog Dialogue, Vol. 1, June 2017.

Delos, Peter. “Advanced Technologies Pave the Way for New Phased Array Radar Architectures.” Analog Devices, Inc., Nov. 2016.

Delos, Peter and Jarret Liner. “Unique Gate Drive Applications Enable Rapidly Switching On/Off for Your High Power Amplifier.” Analog Dialogue, Issue 148, Dec. 2017.

Delos, Peter, Michael Jones, and Mark Robertson. “RF Transceivers Enable Forced Spurious Decorrelation in Digital Beamforming Phased Arrays.” Analog Devices, Inc., Sept. 2018.

Delos, Peter. “System-Level LO Phase Noise Model for Phased Arrays with Distributed Phase-Locked Loops.” Analog Device, Inc., Nov. 2018.

Delos, Peter and Jarret Liner. “Improved DAC Phase Noise Measurements Enable Ultra-Low Phase Noise DDS Applications.” Analog Dialogue, Vol. 51, Aug. 2017.

Delos, Peter. “A Review of Wideband RF Receiver Architecture Options.” Analog Devices, Inc., Feb. 2017.

Brannon, Brad. “Some Recent Developments in the Art of Receiver Technology: A Selected History on Receiver Innovations over the Last 100 Years.” Analog Dialogue, Vol. 52, Aug. 2018.

Benson, Keith. “Advances in Phased Array Analog Beamforming Solutions.” Analog Devices, Inc. Webcast, Sept. 2017.

Delos, Peter. “Digital Beamforming Techniques for Phased Arrays.” Analog Devices, Inc. Webcast, Jan. 2017.

Jones, Michael. “Enabling Next-Generation EW and Phased-Array Systems.” Analog Devices, Inc. Webcast, 2018.

Henderson, Greg. “RF/Microwave Product Selector Guide.” Analog Devices, Inc. June 2018.

ADAR1000: Analog Beamformer. Analog Devices, Inc., 2019.

Phase Locked Loop (PLL) Synthesizers. Analog Devices, Inc., 2019.

AD9213. Analog Devices, Inc., 2019.

AD9208. Analog Devices, Inc., 2019.

AD9172. Analog Devices, Inc., 2019.

ADRV9009. Analog Devices, Inc., 2019. ◄