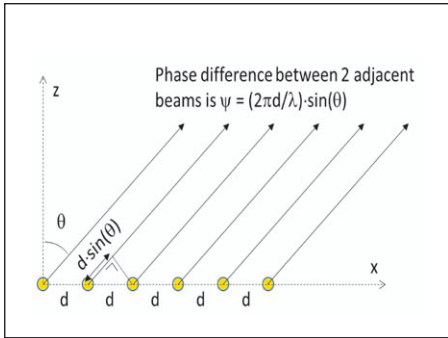
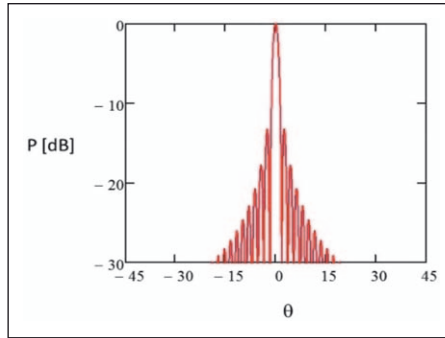


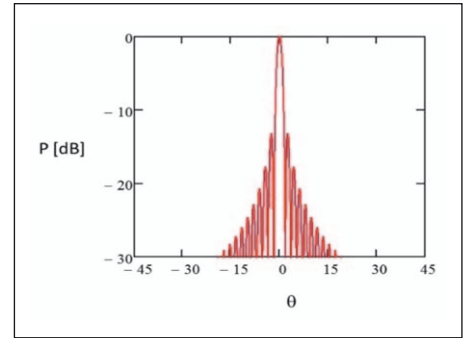
# Strahlformung für 5G-Kommunikationssysteme



**Bild 1:** Ein eindimensionales Antennen-Array, in dem alle Elemente die gleiche Phase aufweisen, richtet seinen Strahl auf  $\theta = 0^\circ$



**Bild 2:** Nebenkeulen-Muster für ein eindimensionales Antennen-Array, in dem alle Elemente die gleiche Phase aufweisen und einen Strahl bei  $\theta = 0^\circ$  erzeugen. Das Array besteht aus 64 Elementen



**Bild 3:** Das gleiche Array, nur mit verschobener Phase bei allen Elementen, um einen Strahl bei  $\theta = 20^\circ$  zu formen

5G-Kommunikationsstandards versprechen in den nächsten zehn Jahren eine tausendfache Steigerung der Mobilfunk-Datenkapazität. Da die Datenmenge, die auf einem Kanal kodiert werden kann, dann ihre theoretische Grenze erreicht, bedarf es einer Kombination aus Frequenz-, Zeit- und Raum-Multiplexing, um die Mehrzahl an Kanälen bereitzustellen, die erforderlich ist, um bei einer so hohen Aggregation Daten vom Sender zum Empfänger zu transportieren. Welche Möglichkeiten gibt es? Man kann sich der MIMO-Technik (Multiple Input, Multiple Output) bedienen, wie sie bei WLAN zum Einsatz kommt. Wir können neue Frequenzbänder nutzen, u.a. einige im Millimeter-Wellenlängenbereich, wenn die Regulierer sie freigeben. Wir können auch Techniken entwickeln, die mm-Wellen-Signale erzeugen, um eine direktere Verbindung zwischen Sender und Empfänger zu erhalten und so der hohen Dämpfung im freien Raum entgegenwirken.

## Pfadverluste bei mehreren Antennen vermeiden

Warum ist gerade bei Millimeterwellen die Dämpfung so hoch? Man stelle sich eine Kommunikationsverbindung zwischen einer Basisstation und einem Smartphone vor, die mit mm-Wellen-Frequenzen arbeitet. Das Smartphone verfügt über eine isotrope Antenne, die in/aus alle/n Richtungen gleichmäßig sendet und empfängt. Der Pfadverlust zwischen den Sende- und Empfangsantennen berechnet sich wie folgt [1]:

$$\frac{P_{RX}}{P_{TX}} = G_{RX} G_{TX} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{1}{4\pi R^2}$$

wobei  $P_{RX}$  und  $P_{TX}$  die empfangene bzw. gesendete Leistung, sowie  $G_{RX}$  und  $G_{TX}$  die Gewinne der Empfangs- bzw. Sendantennen sind. Der Pfadverlust entsteht teilweise durch die Dämpfung infolge der Energieausbreitung des Signals in den freien Raum. Mit zunehmendem Abstand  $R$  zwischen Sender und Empfänger nimmt die Dämpfung quadratisch zu:  $1/4\pi R^2$ . Der andere, für die Pfadverluste verantwortliche Faktor ist die Energiemenge, welche die Empfangsantenne erfassen kann. Dies wird durch die effektive Antennenöffnung (Apertur) geregelt (definiert durch  $\lambda^2/4\pi$ ) und nimmt mit dem Quadrat der Wellenlänge ab.

Ein Wechsel der Signalfrequenz von 3 auf 30 GHz (und damit eine kürzere Wellenlänge) erhöht die Pfadverluste um 20 dB. Als Ausgleich kann man die Zahl der Empfangsantennen erhöhen. Dies erfordert aber 100 Antennenelemente, die ein 30-GHz-Signal empfangen, um die gleiche Apertur und Empfangsleistung wie mit der Original-Antenne bei 3 GHz zu erhalten.

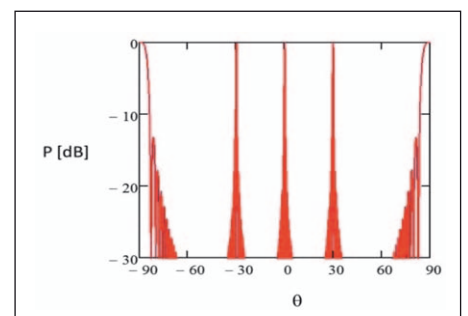
## Strahlformungen in Antennenanordnungen

Wie wird ein solches Antennen-Array aufgebaut? Die einfachste Form besteht aus  $N$  Elementen, die in gleichen Abständen  $d$  eng aneinander angebracht sind (Bild 1).

Sind alle Elemente in einer solchen Anordnung isotrop, haben den gleichen Gewinn und werden über ein Signal angesteuert, das die gleiche Phase und Leistung hat, zeigt der daraus resultierende Strahl direkt aus

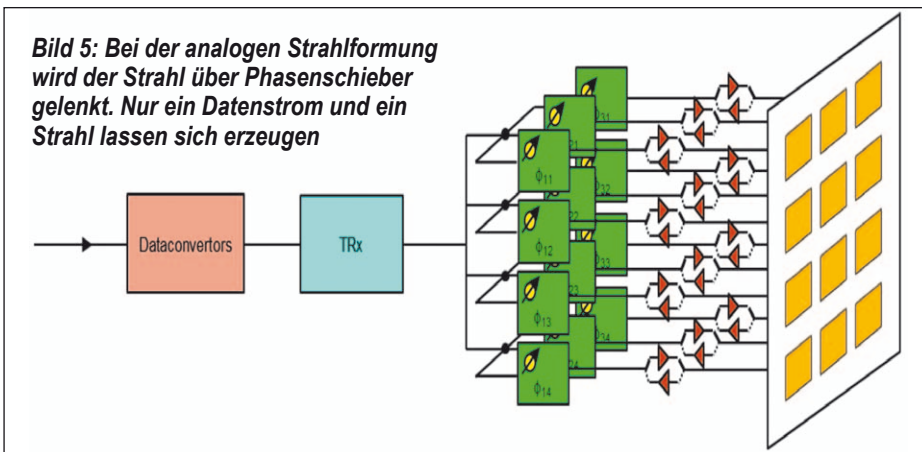
der Ebene, auf der sie montiert sind, d.h. in  $z$ -Richtung. Das resultierende Feld ist in Bild 2 als Funktion von  $\theta$  dargestellt, dem Winkel zwischen der  $z$ -Achse und der Erfassungsrichtung, wenn der Abstand zwischen den Array-Elementen  $d = \lambda/2$  (die halbe Wellenlänge) beträgt. Wird eine Phasendifferenz zwischen benachbarten Array-Elementen angelegt, lässt sich der Strahl abwinkel, z.B. um  $20^\circ$  (Bild 3).

In beiden Fällen bilden sich unerwünschte Nebenkeulen neben dem Hauptstrahl. Werden die Array-Elemente weiter auseinander angeordnet, nimmt die Stärke der Nebenkeulen zu, bis der Abstand  $d$  der Signalwellenlänge  $\lambda$  entspricht. Unerwünschte Strahlbildung mit der gleichen Leistung wie der Hauptstrahl tritt bei  $+90^\circ$  und  $-90^\circ$  auf. In Bild 4 ist der Abstand  $d$  doppelt so groß wie die Wellenlänge, und unerwünschte Nebenkeulen entstehen bei  $\pm 30^\circ$  und  $\pm 90^\circ$ . Diese Nebenkeulen sind an sich nicht erwünscht, da sie die Wahrscheinlichkeit erhöhen, dass sich die Antennen-Arrays gegenseitig stören. In der Praxis ist es nicht möglich, eine isotrope Antenne zu bauen, da alle physi-



**Bild 4:** Gitterkeulen erscheinen im Abstrahlmuster der Anordnung wenn die Abstände der internen Antennen gleich der Wellenlänge sind, in diesem Fall  $d = 2\lambda$

Rik Jos  
Fellow RF Technology  
Ampleon  
www.ampleon.com



kalischen Antennen ein bestimmtes Antennenmuster aufweisen. Die Möglichkeit, sie elektrisch zu lenken ist damit begrenzt.

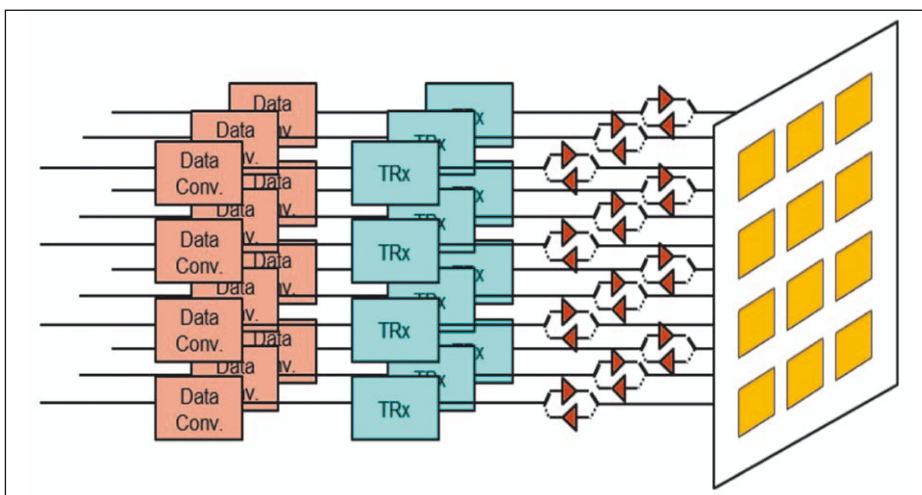
## Analoge und digitale Strahlformung

Wie werden die Phasenverschiebungen erzeugt, die zur Lenkung des Strahls erforderlich sind? Analoge Strahlformung erfolgt im HF-Bereich mittels Phasenschiebern, die sich vor jeder Antenne befinden (Bild 5). Ein einzelner Datenstrom wird über eine Reihe von Datenwandlern und einen Transceiver gehandhabt. Nach dem Transceiver wird der Sende-Datenstrom so oft aufgeteilt, wie Array-Elemente vorhanden sind. Das Signal in jedem Zweig wird durch einen Phasenschieber geleitet, verstärkt und dann in das Array-Element gespeist. Analoge Strahlformung im HF-Pfad ist einfach und erfordert nur minimale Hardware. Damit ist sie die kostengünstigste Art, eine strahlformende Anordnung zu erstellen. Der Nachteil ist, dass das System nur einen Datenstrom handhaben und nur einen Signalstrahl erzeugen kann.

Digitale Strahlformung, bei der jede Antenne über ihren eigenen Transceiver und Datenwandler verfügt, kann mehrere Datenströme handhaben und erzeugt mehrere Strahlen gleichzeitig aus einer Anordnung (Bild 6). Die Phasenunterschiede, die erforderlich sind, um einen Strahl zu erzeugen, werden im Basisband erzeugt. Damit lassen sich auch mehrere Strahlensätze erstellen und auf die Array-Elemente überlagern. Eine Antenne kann damit mehrere Strahlen erzeugen, von denen jeder sein eigenes Signal trägt und mehrere Nutzer abdeckt – mit einer Anordnung und einem Satz an Spektrum-Ressourcen. Dieser Ansatz erfordert mehr Hardware und belastet die Signalverarbeitung im Digitalbereich mehr als beim analogen Ansatz.

## Strahlformung, Massive MIMO und Kanal-Zustandsinformation

Digitale Strahlformung kann ein Signal von einem Sender auf einen Empfänger richten, sofern beide in Sichtweite sind. Sind sie es nicht, werden Nutzer nur durch Strahlen erreicht, die durch Gebäude, Bäume und



**Bild 6: Bei der digitalen Strahlformung wird der Strahl durch Basisband-Verarbeitung geformt. Mehrere Datenströme und Strahlen lassen sich gleichzeitig erzeugen**

andere Objekte zerstreut wurden. Zerstreute Strahlen weisen 20 bis 30 dB mehr Pfadverluste auf als Strahlen auf Sichtweite. Es macht daher Sinn, viele Strahlen zu verwenden, um sicherzustellen, dass die Summe der zerstreuten Signale am Empfänger genug Energie bereitstellt, um die Kommunikation richtig interpretieren zu können.

Diese zerstreuten Low-Power-Strahlen stören nur in der Nähe des Nutzers. Andere Nutzer in der Nähe hören nur einen leichten Anstieg der Hintergrundgeräusche. Eine Antennen-Anordnung dient somit mehreren Nutzern – jedem mit einer Vielzahl von Strahlen, die zerstreut sind, solange die Anzahl von Elementen im Array die Zahl der Nutzer überschreitet. Dies wird als Massive MIMO bezeichnet.

Massive MIMO lässt sich erweitern, indem eine Antennen-Anordnung mit  $N$  Elementen um  $N$  einzelne Antennen ersetzt wird, die weit genug in der Umgebung verteilt sind, z.B. auf separaten Gebäuden, Laternenmasten etc. Zeitliche Verzögerungen bei den verteilten Antennen stellen sicher, dass

Signale für jeden Nutzer sich nur positiv an deren Standort stören.

Wie erwähnt strahlt eine Antennen-Anordnung mit Elementabständen, die kleiner als die Signalwellenlänge sind, nur sehr wenig Energie in unerwünschte Richtungen ab. Für eine Reihe weit verteilter Antennen trifft dies nicht zu. Hier lassen sich die Signale konfigurieren, um konstruktiv am Standort des Nutzers zu stören. Sie stören also nicht destruktiv in andere Richtungen und können daher keine Störungen und Leistungsverluste verursachen.

Die für die Phasenverschiebungen und damit für die Strahlformung erforderlichen Informationen ergeben sich aus den Kanal-Zustandsinformationen. Man erhält diese indem das UE einen Pilotton sendet und die Basisstation die Phasenverschiebungen zwischen den verschiedenen Pfaden misst, denen das Signal zwischen dem UE und der Basisstation-Antennenelemente folgt.

Damit dies korrekt funktioniert, muss der Pfad vom Sender zum Empfänger der gleiche sein, wie der Pfad vom Empfänger zum

Sender. Sie müssen die gleiche Frequenz aufweisen, und das Gesamtsystem muss Time-Division-Duplexing verwenden. Die Phasenverschiebung der Signale zwischen Antennen kann nur die verschiedenen Pfadlängen bei einer Frequenz kompensieren. Bei großen Signalbandbreiten sollte die Zahl der Pilotfrequenzen zunehmen, um das Kanalverhalten richtig zuzuordnen.

Digitale Strahlformung bietet die vielseitigste Lösung für künftige 5G-Mobilfunksysteme, ist aber auch die teuerste und komplexeste Umsetzung. Es wird daher erwartet, dass die ersten 5G-Systeme eine Kombination aus analoger und digitaler Strahlformung bieten werden, damit entsprechende Kompromisse zwischen der Systemleistungsfähigkeit und den Kosten getroffen werden können.

### Referenzen:

- [1] C.A. Balanis, „Antenna Theory, Analysis and Design“, 3. Ausgabe 2005, John Wiley & Sons, ISBN: 0-471-66782-X

## HF-Energie sorgt für Neuerungen in den Bereichen Kochen, Beleuchtung und Automobilelektronik

*Von Rob Hoeben  
Leiter der Multi-Market und RF Energy  
Business Unit*

HF-Leistungstransistoren finden sich primär in Mobilfunk-Infrastruktur-Anwendungen. Der Fortschritt bei LDMOS-basierten Transistoren und Chip-Gehäusen sorgt nun aber auch für Neuerungen in zahlreichen anderen Märkten, wie z.B. Kochgeräten, die seit 1947 mit einem Magnetron als Mikrowellen-Energiequelle arbeiten. Die heutigen, ausgereiften Produkte bieten nur noch wenige Neuerungen, um das Kochen oder das Aufwärmen von Speisen für den Anwender zu verbessern. Verbraucher haben sich an die heißen und kalten Stellen gewöhnt, die Mikrowellenherde im Essen verursachen, wünschen sich aber eine kürzere Kochzeit und gleichmäßig durcherhitztes Essen. Die Hersteller versuchen daher, das Magnetron durch eine Energiequelle auf Halbleiterbasis zu ersetzen, da sich damit die Ausgangsleistung, Frequenz und Phase besser regeln lassen, was zu einer wesentlich gleichmäßigeren Wärmeverteilung im Inneren des Herdes führt.

Eine weitere Anwendung mit großem Potenzial ist die Plasma-Beleuchtung. Hier bieten sich vor allem Bereiche an, die eine hohe Ausleuchtung erfordern, wie z.B. Sportstadien und Flughäfen, wo die Lampen auf hohen Masten montiert sind. Auch in Gewächshäusern ist ein Einsatz denkbar. Diese Anwendungen und viele andere erfordern eine Vollspektrum-Lichtquelle. LED-Leuchten können dies aufgrund ihrer Lichtausbeute (Lumen) oder ihres Spektrums nicht bieten. In der Regel kommen Natriumdampflampen in Gewächshäusern zum Einsatz. Mit ihrem natürlichen Tageslicht-Spektrum sind Plasma-Leuchten ein vollständiger Ersatz für direkte Sonneneinstrahlung.

Die dritte und letzte wichtige Anwendung ist die Plasma-Zündung, die Zündkerzen in Fahrzeugen ersetzen kann. Diese Technik steht noch am Anfang, wird aber sehr schnell an Interesse gewinnen. Mit Plasma lässt sich ein wesentlich besseres Kraftstoff-Luftgemisch erzielen, was zu einer effizienteren Zündung führt und somit weniger schädliche Abgase erzeugt. Damit soll sich der Kraftstoffverbrauch um 5% verringern – eine Größenordnung,

die bei Kraftfahrzeugen als beträchtlich angesehen wird.

Aus technischer Sicht hat sich LDMOS als erfolgreiche Prozesstechnologie für HF-Leistungselektronik etabliert. Mit modularen, pallet-basierten integrierten Anwendungen, wie einem Verstärker mit 50 Ohm Ein- und Ausgangswiderstand, können Hersteller von Haushaltsgeräten HF-Leistungselektronik einfach in ihre Designs integrieren.

Eine wesentliche Herausforderung beim Einsatz von HF-Energie für das Kochen ist die Last: das Essen, das gekocht werden soll. Hier sind die Umstände noch nicht vollständig geklärt, da Änderungen während des Kochens einen äußerst robusten Verstärker erfordern. Mit der Robustheit der Anwendung einher geht der Wirkungsgrad.

Für immer mehr Anwendungen, die seit über 50 Jahren nahezu keine oder nur geringe Fortschritte gemacht haben, werden sich nun mit HF-Energie völlig neue Perspektiven eröffnen.

■ Ampleon  
[www.ampleon.com](http://www.ampleon.com)