Leif C. Stange (Autor)

Integrationstechnik und Aufbauarchitekturen für aktive Antennensysteme im Millimeterwellenbereich

https://cuvillier.de/de/shop/publications/2494

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: https://cuvillier.de

Einleitung

Der drahtlosen Kommunikation ist in den letzten Jahrzehnten eine immer größere Bedeutung zugekommen. Neben den klassischen Anwendungen in den Bereichen des Rundfunks, der Richtfunktechnik und des Sprechfunks, hat die Datenkommunikation sich im Laufe der letzten Jahre zu einem sehr großen Markt entwickelt. Ausschlaggebend für diese Entwicklung war nicht zuletzt die Wandlung des ARPANET von einem ursprünglich militärisch und wissenschaftlich genutzten Datennetz zum dem öffentlich zugänglichen Informationsmedium Internet, das heute nahezu allgegenwärtig ist. Während die leitungsgebundene Telekommunikations-Infrastruktur (Telefon- und schnelle Glasfasernetze) nur zur Anbindung ortsfester Nutzer zum Einsatz kommen kann, eröffnet die drahtlose Kommunikation über terrestrische Mobilfunknetze oder über Satelliten auch mobilen Nutzern den Zugang zum Internet.

Die Satellitenkommunikation wird bisher überwiegend für den Fernsehrundfunk bei Frequenzen im X-Band (11/12 GHz) und Ku-Band (14/15 GHz) und zur Datenkommunikation im C-Band (5/6 GHz) und Ku-Band für ortsfeste Nutzer eingesetzt. Ihr Vorteil gegenüber der leitungsgebundenen Kommunikation ist die relativ kostengünstige Erschließung dünn besiedelter Gebiete und die flexible Einteilung der verfügbaren Ressourcen (Übertragungsbandbreiten), die es den – vornehmlich professionellen – Nutzern ermöglicht, die gemieteten Ressourcen kurzfristig ihrem Bedarf anzupassen. Die Anbindung mobiler Nutzer ist bei diesen konventionellen Satellitensystemen nur in sehr eingeschränktem Maße durch portable Erdfunkstellen (Terminals) vorgesehen, wie sie z.B. für Fernsehübertragungen verwendet werden. Darüber hinaus existieren Satellitensysteme für die Anbindung mobiler Nutzer zur See (z.B. InmarSat [1]), die allerdings aufgrund ihres Betriebs bei niedrigen Frequenzen im L-Band (1 bis 2 GHz) und S-Band (2 bis 4 GHz) nur sehr schmalbandige Übertragungen erlauben.

Die im Zuge der Verbreitung des Internets und des Mobilfunks aufgekommenen übersteigerten Erwartungen an die Kommunikationsmärkte in der Mitte der 1990er Jahre brachte eine Vielzahl von kommerziellen Satelliten-Programmen hervor. Diese verfolgten auch das Ziel, die Lücke in der Versorgung mobiler Nutzer durch neue Satellitensysteme zu schließen. Die geplanten Systeme setzten zu einem großen Teil auf Satelliten in niedrigen und mittleren Erdorbits (engl. *low/medium earth orbit* – LEO/MEO) [2, 3], da deren Herstellung und Installation kostengünstiger ist als bei den klassischen geostationären Systemen (engl. *geo-stationary earth orbit* – GEO). Die begrenzte Abdeckungsfläche

der niedrig fliegenden Satelliten sollte durch ihre große Anzahl ausgeglichen werden. Als prominente Beispiele sind hier Iridium (ursprünglicher Systemführer: Motorola) mit 66 LEO-Satelliten [4, 5] und Teledesic (ehemalige Teilhaber: Microsoft und Boeing) mit ursprünglich 840 (!), später 288 Satelliten zu nennen [6, 7]. Neben diesen schon sehr ehrgeizigen Zielen sollte ein großer Teil der geplanten Systeme in bis dahin kaum erschlossenen höheren Frequenzbändern (Ka-Band, 20/30 GHz und V-Band, 40/50 GHz) betrieben werden, um die verfügbaren Übertragungsbandbreiten zu erhöhen [3].

Viele Systeme kamen aufgrund unrealistischer Planungen nie über die Projektierungsphase hinaus, andere scheiterten an der zu geringen Nachfrage nach den Diensten. Insgesamt erweist sich der kommerzielle Einsatz von LEO/MEO-Systemen heute nur als Ergänzung von bestehenden geostationären Satelliten zur Vergrößerung des Abdeckungsbereichs als profitabel [8]. Nach der Konsolidierung der Märkte im Laufe der letzten Jahre bestätigte sich allerdings der vorher unsichere Trend zur Erschließung der höheren Frequenzbänder [9, 10], insbesondere des Ka-Bands, da die bei niedrigeren Frequenzen verfügbaren Bandbreiten den ständig wachsenden Bedarf nicht mehr befriedigen können. Die für die nähere Zukunft geplanten Satelliten sind zum größten Teil geostationäre Plattformen, die von den großen Satellitenbetreibern zur Erweiterung ihrer Flotten eingesetzt werden sollen und deren Kommunikations-Nutzlast zumindest zum Teil aus einer Ka-Band-Ausrüstung besteht (z.B. [11, 12]).

Elektronisch gesteuerte und aktive Antennensysteme

Während für die ortsfeste Kommunikation mit Satelliten sehr effiziente und kostengünstige fest installierte Parabolreflektorantennen eingesetzt werden können, kommen für die Anbindung mobiler Nutzer an Breitband-Satellitennetze nur nachführbare Antennen in Frage. Sie kompensieren die Bewegungen der mobilen Plattform, indem sie ihre Strahlkeule laufend neu auf den Satelliten ausrichten. Die Forderung der Nachführbarkeit lässt sich auf verschiedene Arten implementieren: ganz naheliegend in Form einer mechanisch gesteuerten Antenne oder mit einem elektronisch gesteuerten Antennensystem, das auf der Plattform fixiert ist.

Um die elektronische Nachführung zu ermöglichen, sind elektronisch gesteuerte Antennen stets als Gruppenantennen (engl. *antenna arrays*) ausgeführt [13–15]. Sie bestehen aus einem Ensemble kleiner Antennenelemente, die zumeist (aber nicht notwendigerweise) in einem regelmäßigen Raster angeordnet sind und so eine größere Antennenapertur bilden. Bei einer Gruppenantenne für die Satellitenkommunikation beläuft sich die Anzahl der Antennenelemente je nach Streckenbilanz des Satellitensystems auf bis zu mehrere tausend. Durch die rechnergesteuerte elektronische Manipulation der Phasen und Amplituden der Sende- bzw. Empfangssignale an den einzelnen Elementen lässt sich die Schwenkung der Strahlkeule ohne mechanische Bewegung des Antennensystems realisieren.

Elektronisch gesteuerte Antennen weisen gegenüber ihren mechanisch gesteuerten Verwandten mehrere wichtige Vorteile auf:

- Die Nachführung der Strahlkeule ist trägheitslos und im Wesentlichen nur durch die Leistung der Rechnereinheit begrenzt, die die Nachführung kontrolliert.

- Die Kontrolle der Signalamplituden und -phasen an den einzelnen Antennenelementen erlaubt nicht nur die Schwenkung der Strahlkeule, sondern auch die Veränderung der Richtcharakteristik abseits der Hauptstrahlrichtung. Das ermöglicht u.a. die Anpassung an bestimmte Umgebungsbedingungen (engl. *adaptive beamforming*), z.B. im Empfangsfall die Unterdrückung von Störquellen aus bestimmten Richtungen (engl. *adaptive nulling*).

- Der Aufbau als Gruppenantenne erhöht die Zuverlässigkeit, da die Anzahl an möglichen Fehlern, die zum Totalausfall führen können (engl. *single-point failures*), extrem reduziert wird. Während eine mechanisch gesteuerte Antenne eine Vielzahl solcher Fehlerpunkte aufweist (z.B. Motor, Motorsteuerung, Antrieb, Wälzlager, zentrale HF-Elektronikeinheit, ...), führt der Ausfall einzelner Antennenelemente im elektronisch gesteuerten System nur zu einer leichten graduellen Abnahme der Leistungsfähigkeit (engl. *graceful degradation*).

- Durch geeignete Erweiterungen ist die Ausbildung mehrerer Strahlkeulen und ihre unabhängige Formung und Schwenkung mit nur einem Antennensystem möglich.

Grundsätzlich können zwei unterschiedliche Ansätze für elektronisch steuerbare Antennen unterschieden werden: phasengesteuerte Gruppenantennen (engl. *phased arrays*) und Antennensysteme mit digitaler Strahlformung (engl. *digital beamforming* – DBF). Phasengesteuerte Gruppenantennen zeichnen sich durch die Integration von elektronisch gesteuerten Phasenschiebern und Amplitudenstellern an den einzelnen Antennenelementen aus, die die Beeinflussung der Strahlkeule ermöglichen. Systeme mit digitaler Strahlformung gehen hier noch einen Schritt weiter. Bei ihnen ist jedes Einzelelement mit vollständigen Sende- und/oder Empfangsschaltungen ausgestattet, die es in Verbindung mit einer Analog-Digital-Wandlung erlauben, die Signale der Einzelelemente in beliebiger Weise in einem Signalprozessor zu manipulieren und aufzubereiten. So kann eine maximale Flexibilität bei der Stahlformung und -steuerung erreicht werden. In diesem Sinne stellt das Konzept der digitalen Strahlformung theoretisch eine Universallösung für eine Antenne dar. In der Praxis beschränken die beteiligten Komponenten diese Universalität in mancher Hinsicht (Leistungsaufnahme, Bandbreite, Rauschen, Prozessorleistung). Durch die ständige Weiterentwicklung der Komponenten werden diese Beschränkungen jedoch immer weiter abgebaut.

Die digitale Strahlformung bietet neben den bereits genannten Vorteilen gegenüber phasengesteuerten Gruppenantennen weitere Vorzüge:

- Die Mehrkeulenfähigkeit lässt sich einfacher realisieren. Unter bestimmten Bedingungen erfordert sie im Gegensatz zu phasengesteuerten Gruppenantennen keinen zusätzlichen Schaltungsaufwand.

- Die Kontrolle aller Einzelsignale im Rechner ermöglicht den Einsatz von Suchalgorithmen zur Analyse der auf die Antenne einfallenden Signale und ihrer Richtungen. Diese Daten können zur Einstellung bzw. Korrektur des Richtdiagramms verwendet werden und erlauben somit eine wesentlich effektivere und schnellere Adaption des Systems an seine Umgebung. Im Idealfall benötigt ein solches adaptives Antennensystem mit digitaler Strahlformung keine Informationen über seine Position, Lage und Ausrichtung im Raum, sondern sucht selbstständig die gewünschte Gegenstelle anhand von Signaturen und optimiert nach der Verbindungsaufnahme laufend seine Richtcharakteristik für eine fehlerfreie Kommunikation auch bei widrigen Umgebungsbedingungen (Störquellen).

Die Bezeichnung *aktiv* bedeutet im Zusammenhang mit elektronisch gesteuerten Antennen, dass die Einzelelemente mit aktiver Elektronik (Verstärkern) ausgestattet sind. Phasengesteuerte Gruppenantennen können demnach weiter in passive und aktive Systeme eingeteilt werden. Bei den passiven Systemen findet die Signal-Verstärkung ausschließlich in einer zentralen HF-Elektronikeinheit statt. Bei aktiven Systemen wird die benötigte Gesamt-Verstärkung auf die Elemente aufgeteilt, die so jeweils nur einen kleinen Beitrag leisten müssen. Antennensysteme mit digitaler Strahlformung sind aufgrund des Einsatzes dedizierter Sender-/Empfängerschaltungen an jedem Element grundsätzlich aktiv.

Beim Aufbau eines aktiven Antennensystems mit digitaler Strahlformung entsteht durch die große Anzahl der zu integrierenden HF-Schaltungen ein hoher Aufwand. Da jedes Antennenelement in einem großen System aus u.U. mehreren 1000 Elementen mit einer Elektronikschaltung ausgestattet werden muss, ergibt sich hinsichtlich des Platzbedarfs die Forderung, dass diese Schaltung keine größere Fläche einnehmen darf als das zugehörige Antennenelement im Ensemble. Der Abstand zwischen benachbarten Elementen und damit auch die Grundfläche des Einzelelements werden durch die geforderten Antenneneigenschaften (Gewinn, Schwenkwinkelbereich und Eindeutigkeit) in Abhängigkeit der Wellenlänge λ festgelegt. Für einen möglichst hohen Gewinn und eine eindeutige Richtcharakteristik in einer vollen Hemisphäre ist ein Elementabstand von einer halben Wellenlänge ($\lambda/2$) erforderlich [13, 16]. Das Einzelelement besitzt folglich eine Grundfläche von $(\lambda/2)^2$ und die

Integrationsdichte steigt quadratisch mit der Frequenz. Mit den typischen Größen der aktiven Bauelemente, die an jedem Antennenelement vorgesehen werden müssen, stellt sich damit der Aufbau aktiver Antennen bei Frequenzen ab ca. 10 GHz als große Herausforderung dar.

Anwendungen

Phasengesteuerte Gruppenantennen werden bisher überwiegend in militärischen Radaranwendungen bei Frequenzen bis ins X-Band (12 GHz) und an Bord von Satelliten (bis Ku-Band) eingesetzt [17–21]. Diese eingeschränkte Verbreitung ist in erster Linie auf die hohen Kosten dieser Antennen zurückzuführen. Bei den heute in der Produktion befindlichen X-Band-Radarantennen für den Einsatz in Kampfflugzeugen belaufen sich die Kosten eines einzelnen aktiven Sende-/Empfangsmoduls einer phasengesteuerten Gruppenantenne auf 1000 bis 3000 USD [22, 23]. In den meisten Antennensystemen kommen mehr als 1000 dieser Module zum Einsatz. Diese Kosten sind einerseits durch die hohe Komplexität des Antennensystems, andererseits aber auch durch die eingesetzten Fertigungsprozesse und die relativ geringen Stückzahlen bedingt. Da die Komplexität prinzipbedingt ist und sich nicht ohne weiteres umgehen lässt, besteht das größte Potenzial der Kostenreduzierung darin, bei der Fertigung standardisierte und automatisierbare Prozesse einzusetzen [22, 24]. Eine Automatisierung der Fertigung kann jedoch erst mit einer Erhöhung der Stückzahlen durch eine gleichzeitige militärische (Radar) und zivile Nutzung (Kommunikation) profitabel werden [24].

Hinsichtlich der auf absehbare Zeit noch relativ hohen Kosten für aktive elektronisch gesteuerte Antennen werden die zivilen Anwendungen sich zunächst auf den professionellen Einsatz beschränken. Ein aussichtsreicher Markt ist hier z.B. die Aus- bzw. Nachrüstung ziviler Verkehrsflugzeuge mit aktiven Antennen zur Satellitenkommunikation, um den Passagieren während des Flugs (*Live*-)TV und den Zugang zum Internet zu ermöglichen. Pionier auf diesem Markt ist der US-Konzern Boeing mit seiner Tochter Connexion by Boeing (CBB), mit deren Antennensystemen die Lufthansa im Frühjahr 2004 den kommerziellen Betrieb in 80 Langstreckenflugzeugen aufgenommen hat [25–29]. Die zugehörigen Satellitenkapazitäten über Europa und Asien werden u.a. von Eutelsat GEO-Satelliten bereitgestellt [30]. Obwohl ursprünglich eine phasengesteuerte Gruppenantenne mit zwei unabhängigen Strahlkeulen im Ku-Band für den Einsatz im Flugzeug vorgesehen war [31], fiel die Entscheidung letzten Endes auf ein mechanisch gesteuertes Ku-Band-System [27], das von Mitsubishi entwickelt wurde [32, 33].

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Projekts SANTANA (**S**mart **Ant**enn**a** Termi**nal**) [34], das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), vertreten durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Bonn, gefördert wurde.

Ziel und Gliederung der Arbeit

Zur Vermeidung der mit einer mechanisch gesteuerten Antenne verbundenen Nachteile und zur Erweiterung des Frequenzbereichs auf das Ka-Band sind hochintegrierte aktive Antennensysteme erforderlich. Insbesondere Systeme mit digitaler Strahlformung haben das Potenzial, die Vorteile aktiver Antennen in sehr effizienter Weise auszunutzen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, verschiedene Aufbauarchitekturen für leistungsfähige Antennensysteme mit digitaler Strahlformung für den Frequenzbereich zwischen 20 und 30 GHz vorzustellen und zu untersuchen. Gegenüber existierenden Ansätzen soll dabei der kostengünstigen Herstellung eine besondere Aufmerksamkeit eingeräumt werden. Die Aufbaukonzepte sollen durch einen modularen Aufbau dazu geeignet sein, auch für große Antennensysteme mit bis zu mehreren 1000 Elementen eingesetzt zu werden.

Da die Integration des HF-Teils der Elektronik durch die in dem angestrebten Frequenzbereich geforderte sehr hohe Integrationsdichte die größte Herausforderung der Aufbauarchitektur darstellt, wird sich die vorliegende Arbeit auf diesen Teil des Antennensystems konzentrieren.

Das erste Kapitel befasst sich mit der analogen HF-Elektronik aktiver Antennen. Zunächst wird der erforderliche Schaltungsaufwand für phasengesteuerte Gruppenantennen und Antennensysteme mit digitaler Strahlformung grob umrissen, um dann genauer auf die einzelnen Schaltungen und ihre Elemente einzugehen. Die Betrachtungen dienen in erster Linie als Überblick über den Aufwand der Integrationsaufgabe. Integrierte Hochfrequenz-Halbleiter-Bauelemente (MMIC – *Millimeter-wave Monolithic Integrated Circuits*) als zentrale Elemente des HF-Teils werden im Rahmen einer knappen Marktübersicht behandelt. Mit dieser Übersicht wird einerseits der Stand der Technik auf diesem Gebiet analysiert. Andererseits werden mit Hilfe der ermittelten typischen Leistungsdaten der MMIC Systemabschätzungen vorgenommen, deren primäres Ziel es ist, die Leistungsfähigkeit des Antennensystems in Abhängigkeit der Anzahl seiner Elemente zu ermitteln.

Im zweiten Kapitel werden Aufbau- und Verbindungstechnologien behandelt, die für die Integrationsaufgabe im Rahmen dieser Arbeit von zentraler Bedeutung sind. Der erste Teil des Kapitels befasst sich direkt mit Fragen der Elektronikintegration, speziell in der Hochfrequenztechnik: den Technologien und Materialien für Multi-Chip-Module (MCM), dem Einfluss von Fertigungstoleranzen und der Chipmontage und -Verbindung. Im Hinblick auf eine kostengünstige Fertigung werden Technologien ausgewählt und sowohl theoretisch als auch experimentell näher untersucht. Im zweiten Teil werden übergeordnete Aufbauarchitekturen für aktive Antennen betrachtet. Nach einem Überblick zum Stand der Entwicklungen auf diesem Gebiet werden geeignete Aufbaukonzepte für Antennensysteme mit digitaler Strahlformung im Frequenzbereich zwischen 20 und 30 GHz erarbeitet.

Die Umsetzung dieser Aufbaukonzepte ist Thema des dritten Kapitels, in dem zwei verschiedene Antennenmodule vorgestellt werden: ein Empfängermodul bei 20 GHz und ein Sendermodul bei 30 GHz. Die verwendeten Aufbauarchitekturen werden im Detail behandelt, wobei die besondere Aufmerksamkeit den HF-Übergängen zwischen dem Elektronikteil und den Antennenelementen gewidmet wird, da diese Elemente einen kritischen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Antennensystems ausüben. Die Aufbaukonzepte werden anhand von Simulationen überprüft und der Funktionsnachweis wird durch Messungen erbracht.

Das vierte Kapitel, das die Arbeit schließt, enthält eine zusammenfassende Bewertung der demonstrierten Aufbauarchitekturen. Ihre speziellen Vor- und Nachteile werden identifiziert und verglichen. Darüber hinaus werden mögliche Anwendungen der erarbeiteten Konzepte bei höheren Frequenzen betrachtet und die Grenzen des Einsatzes in Bezug auf die erreichbaren Integrationsdichten abgeschätzt.

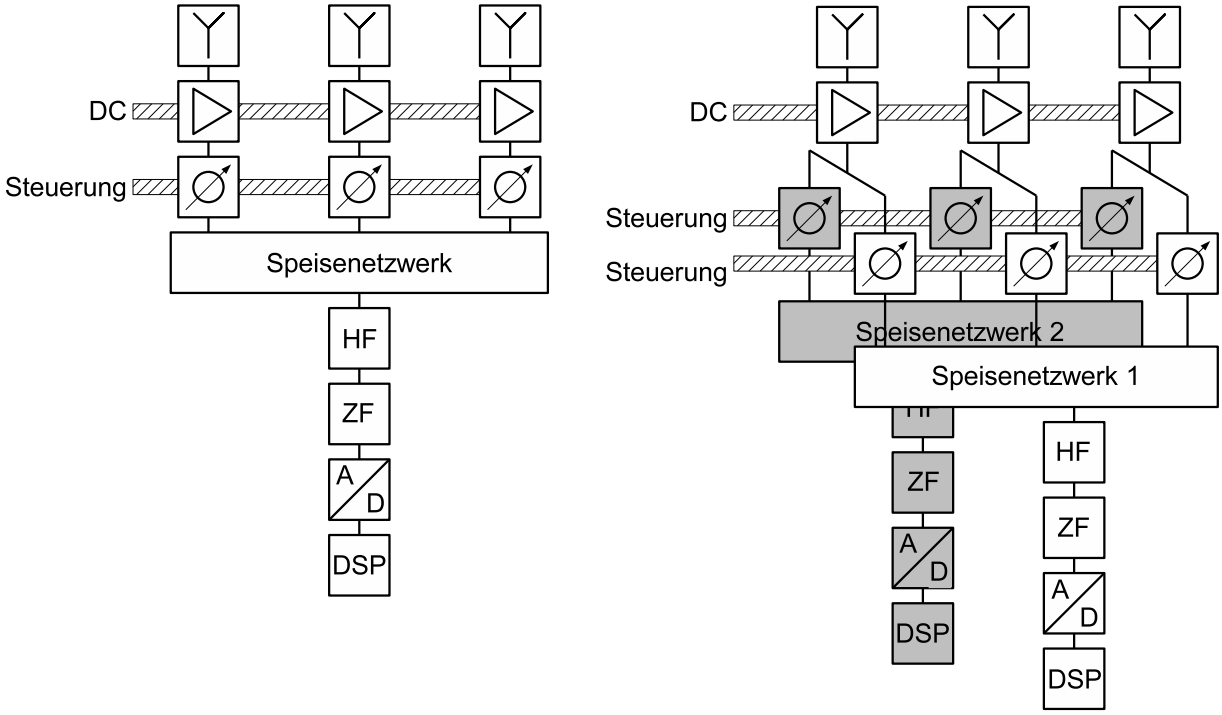
1 HF-Elektronik für aktive Antennen

In diesem Kapitel sollen zunächst generische Schaltungskonzepte für verschiedene Ausbaustufen aktiver Gruppenantennen vorgestellt werden. Insbesondere sollen damit einerseits der Aufwand und die Komplexität der passiven und aktiven Schaltungsteile und andererseits die schaltungstechnischen Unterschiede zwischen phasengesteuerten Gruppenantennen (*Phased Arrays*) und Antennensystemen mit digitaler Strahlformung (*Digital Beam Forming* - DBF) verdeutlicht werden. Für die Betrachtungen werden Blockschaltbilder herangezogen, die von den einzelnen elektronischen Komponenten und ihrer physikalischen Integration in die Schaltung weitestgehend abstrahiert sind, um eine möglichst allgemeine Beschreibung zu erhalten. Darauf aufbauend wird für den analogen Schaltungsteil eines DBF-Systems diese recht hohe Abstraktionsebene in Richtung einer detaillierteren Darstellung der einzelnen Bausteine verlassen. Die folgenden Betrachtungen haben das Ziel, den Umfang der zu integrierenden aktiven und passiven Komponenten zu skizzieren, ohne jedoch eine Festlegung auf ein konkretes Schaltungskonzept einzugehen. Im Hinblick auf die benötigten aktiven Komponenten soll daraufhin ein knapper Überblick über derzeit auf dem Markt erhältliche MMIC (*Millimeter-wave Monolithic Integrated Cicuits*) für den HF-Schaltungsteil und ihre typischen Daten gegeben werden. Darauf aufbauend wird schließlich eine Abschätzung der Leistungsfähigkeit eines DBF-Systems vorgenommen und bewertet.

1.1 Generische Schaltungskonzepte

1.1.1 Phasengesteuerte Gruppenantennen

Bild 1.1 (a) zeigt den generischen Aufbau einer phasengesteuerten Antenne mit einer einzelnen Strahlkeule. Um eine möglichst übersichtliche Darstellung zu erreichen, sind in diesem Blockschaltbild, ebenso wie in allen Folgenden, nur drei Antennenelemente eingezeichnet. Die Diskussionen in diesem Abschnitt gelten sowohl für den Sende- als auch für den Empfangsbetrieb des Antennensystems, soweit nicht anders bezeichnet. Jedes Element der phasengesteuerten Antenne ist mit einer elektronischen Schaltung ausgestattet, die aus einem Verstärkerblock und einem Steuerungsblock besteht. Die Stromversorgung (DC) und Steuerung wird über Netzwerke realisiert, die jedes



(a) 1 Strahlkeule (b) 2 Strahlkeulen

Bild 1.1: Generischer Aufbau von aktiven phasengesteuerten Gruppenantennen

Einzelelement anbinden. Die Elemente sind wie bei einer passiven Gruppenantenne über ein Speisenetzwerk mit einem zentralen Speisepunkt verbunden. Die Steuerung, die aus einem Amplituden- und einem Phasensteller (bzw. einem Vektormodulator) besteht, erlaubt es, Amplitude und Phase des HF-Signals individuell für jedes Element einzustellen. Der Verstärkerblock aus einem oder mehreren rauscharmen Verstärkern für den Empfangsfall bzw. aus Leistungsverstärkern für den Sendefall ist optional. Falls die Verstärker weggelassen werden, spricht man auch von einer passiven phasengesteuerten Gruppenantenne. Allerdings führt ein Verzicht insbesondere bei Frequenzen oberhalb von ca. 5 GHz in der Regel zu extrem verringerter Leistungsfähigkeit (höhere Rauschzahl und niedrigere Ausgangsleistung) aufgrund der typisch recht hohen Einfügedämpfung der Phasenschieber und des Speisenetzwerks [18, 35, 36].

Der zentrale Speisepunkt, an dem das HF-Summensignal anliegt, ist mit dem Rest der Schaltung verbunden. Dieser besteht aus dem HF-Teil (HF) mit der ersten Mischerstufe zum Zwischenfrequenzteil (ZF), dem Analog-Digital-Wandlers (A/D) und dem digitalen Signalprozessor (DSP). Die HF- und ZF-Mischerstufen werden jeweils von Lokaloszillatoren (LO) gespeist. Der Signalprozessor übernimmt diverse Funktionen, wie z.B. Trägersignal-Rückgewinnung und -Synchronisation, (De-)-Kodierung und meist auch die eigentliche Strahlformung, also die Ansteuerung der Amplituden- und