

# Einleitung

Der Ausbau und die Errichtung flächendeckender Kommunikationsmöglichkeiten zum Austausch von Daten und Sprache wird nicht nur seitens der Industrie vorangetrieben, sondern ist auch aus dem Bedarf der zivilen Nutzer hervorgegangen. Seit der Einführung des World Wide Web (WWW) im Jahr 1993 sind die Datenübertragung und der Informationsaustausch zum unverzichtbaren Bestandteil der Arbeitswelt und Freizeit geworden. Bereits im Jahr 2008 verfügten 60 Prozent der Haushalte in Europa über einen Internetanschluss [1]. Davon nutzten laut europäischer Statistik knapp 22 Prozent Breitbandzugänge, Tendenz steigend [2]. Zeitgleich zum Internet etablierte sich auch das Mobilfunknetz mit dem europaweiten Standard GSM (engl. *Global System for Mobile Communications*). Welch enorme, globale Tragweite mobile Kommunikation erfährt zeigen die Statistiken. Im Durchschnitt besaß schon im Jahr 2006 jeder Europäer einen Mobilfunkvertrag [3]. Weltweit liegen 3,8 Milliarden Mobilfunkverbindungen vor, mit einem Zuwachs von ca. 1,7 Millionen Verbindungen pro Tag [4].

Trotz dieses enormen Zuwachses an Kommunikationsmöglichkeiten ist ein global verfügbarer Informationsaustausch nur über wenige Systeme möglich. Während die Netzversorgung auf dem Festland durch Basisstationen stetig ausgebaut wird, erfordern erdumspannende Netze Satellitenverbindungen. 1982 führte Inmarsat [5] erste Systeme für die Schifffahrt im L-Band ein und erweiterte diese ab 1989 auch für den mobilen Landeinsatz. Die geostationären Satelliten des Inmarsat-Systems erreichten nahezu globale Abdeckung mit Ausnahme der Polkappen. Erst die Iridium-Satelliten [6] mit Umlaufbahnen von 200 km - 1200 km (engl. *LEO: low-earth orbit*) bieten seit 1998 erdumspannende Daten- und Sprechdienste an. Im Jahr 2000 erschien Globalstar [7] mit einem zum Iridium vergleichbaren System auf dem Markt.

Beide Firmen konnten ihre Dienste ausbauen, so dass 2008 rund 320.000 Nutzer je Betreiber auf mobile Kommunikation via Satellit zurückgriffen. Dennoch liefern beide Systeme mit 128 kbit/s (Iridium) bzw. 56 kbit/s (Globalstar) nicht die erforderlichen Bandbreiten, die für moderne TV-Streaming-Anwendungen oder DSL-Internetverbindungen benötigt werden.

### **Breitband-Satelliten-Kommunikationssysteme**

Auch wenn die anfangs im L-Band realisierten Übertragungen zwischen Satellit und mobilem Terminal Vorteile wegen der geringen Größe der Antenne, geringer Dämpfung durch Regen und flächendeckender Ausleuchtung aufweisen, sind die verfügbaren Bandbreiten gering [8]. Zur Erschließung höherer Bandbreiten wechselten die Satellitenbetreiber zu höheren Frequenzen und waren so in der Lage, preisgünstigere Systeme für eine größere Zielgruppe anzubieten. In den letzten Jahren zeichnete sich so ein wachsender Trend neuer Kommunikationssatelliten im Ka-Band ab. Seit 2005 sind in Nordamerika Breitband-Internetverbindungen zugänglich, die im Ka-Band Transferraten von bis zu 1,5 Mbps (engl. *download*) erlauben (WildBlue über Telesats Anik F2 Satellit [9]). Die Anfrage oder das Hochladen von Daten (engl. *upload*) erfolgt mit geringen Raten von bis zu 256 kbps. Vergleichbare Systeme finden sich seit 2007 auch in Europa (Tooway von Eutelsat und Viasat über Hotbird 6 und Eurobird 3 Satelliten [10]). Die Übertragungsraten liegen bei 3,6 Mbps (download) bzw. 384 kbps (upload) und nähern sich den gängigen DSL Geschwindigkeiten von 16 Mbps an. In naher Zukunft sind zunehmend mehr Satellitenstarts geplant (z.B. Hylas Satellit von ESA und Avanti Communications [11], Ka-Sat von Eutelsat [12] oder Arabsat 5C/6B von Astrium und Thales Alenia Space [13]). Die Frequenzbereiche erstrecken sich von 19,7 GHz bis 20,2 GHz im Download vom Satelliten zum Terminal und 29,5 GHz bis 30 GHz im Upload vom Terminal zum Satelliten. Die verwendeten Polarisierungen sind bis auf Eutelsats Tooway zirkular, um zum einen die Installation für Endverbraucher zu vereinfachen und zum anderen eine aufwendige Nachführung der horizontalen oder vertikalen Polarisation zu vermeiden. Gängige Ausleuchtungsszenarien der abzudeckenden Gebiete bedienen sich mehrerer Hauptkeulen (engl. *spot beams*), deren Frequenz und Polarisation alternieren [14, 15]. Dadurch verbessert sich die Isolation benachbarter spot beams erheblich. Jedoch muss ein nicht statio-

näres Terminal dementsprechend auf beiden Polarisierungen betrieben werden können.

Die höheren Bandbreiten im Ka-Band stellen allerdings anspruchsvolle Anforderungen an die Antennensysteme. Der durch die Freiraumdämpfung erforderliche hohe Gewinn der Antennenterminals geht mit schmalen Keulenbreiten einher. So weist z.B. eine 66 cm Parabolantenne mit einer Effizienz von 70 % eine Keule mit einer Halbwertsbreite von unter zwei Grad auf und erlaubt nur geringe Ausrichtungsfehler von unter einem Grad auf den Satelliten [16, 17]. Zudem können sich Fehlansichtungen der Terminalantenne störend auf benachbarte Satelliten aufgrund ihrer dichten geostationären Orbitalposition im Abstand von zum Teil nur zwei Grad auswirken. Die autonome Ausrichtung der Antennenkeule auf den Satelliten und ihre Nachführung sind daher unerlässlich für mobile Antennensysteme.

### **Nachführbare Antennenterminals für mobile Szenarien**

Antennen mit kompakter Bauart zur Montage unter anderem auf Schiffen, Flugzeugen oder Fahrzeugen bezeichnet man auch als VSAT [18] (engl. *Very Small Aperture Terminal*). Geschieht die Ausrichtung und Nachführung mechanisch, werden meist Parabolspiegel eingesetzt. Eine elektronische Strahlenschwenkung hingegen basiert auf Gruppenstrahlern. Sie bestehen aus mehreren, meist hundert Einzelstrahlern, deren einzelne Strahlungsfelder konstruktiv in Hauptstrahlrichtung überlagert werden [19]. Eine Überlagerung mittels eines elektrischen Netzwerkes erfolgt bei einem phasengesteuerten Gruppenstrahler (engl. *phased array*). Liegen die Signale der Einzelstrahler digital vor und werden zu einem Summensignal zusammengesetzt, spricht man hingegen von digitaler Strahlformung (engl. *DBF - Digital Beam Forming*). Mechanische Strahlführungssysteme zeichnen sich durch ihre verhältnismäßig einfache, zuverlässige und kostengünstige Bauweise aus und sind in der Schifffahrt verbreitet im Einsatz [20]. Lufthansa stattete 2004 einige Flugzeuge mit mechanischen Systemen von Connexion-by-Boeing [21, 22, 23] aus und bot Breitband-Internetdienste für Interkontinentalflüge an. Der Dienst konnte sich jedoch nicht am Markt etablieren und wurde vorerst eingestellt. Phased Arrays finden sich in einer Vielzahl von Radarsystemen und Antennen wieder [24, 25]. Sie setzen zumindest Phasenschieber, meistens jedoch I/Q-Modulatoren für je-

den Einzelstrahler voraus, womit sich der Schaltungs- und Steuerungsaufwand deutlich erhöht. DBF-Systeme [26, 27] verfügen für jedes Antennenelement über einen eigenen Sender oder Empfänger und verarbeiten die Signale digital im Basisband. Liegen die abgetasteten Signale digital vor, können sie unterschiedlichste Algorithmen zur Generation von Mehrfachkeulen, zur adaptiven Strahlformung und zur Unterdrückung von Störern durchlaufen. Auch ist die Geschwindigkeit ihrer Strahlschwenkung im Wesentlichen nur durch die Echtzeit-Rechenleistung beschränkt. All diese Eigenschaften prädestinieren DBF-Antennen für mobile Terminals zukünftiger Satellitenkommunikationen.

Die Komplexität von DBF-Antennen leitet sich zum einen aus dem Schaltungsaufwand eines Einzelelementes ab, der sich mit der Anzahl an Elementen vervielfacht. Zum anderen ist der maximale Abstand zwischen zwei Elementen begrenzt. Bei Vermeidung von mehreren Hauptkeulen und einer mehrdeutigen Richtcharakteristik entspricht der maximale Abstand zwischen benachbarten Elementen einer halben Wellenlänge [19]. Diese Einschränkung führt in Verbindung mit dem Schaltungsaufwand bei Frequenzen im Millimeterwellenbereich zu hohen Integrationsdichten. Zieht man die gleichzeitige Nutzung beider Polarisationen in Betracht, verdoppelt sich sogar die Integrationsdichte, da je Einzelelement zwei Empfangs- bzw. Sendeschaltkreise erforderlich werden. Polarisationsmultiplex ist bei den erwähnten Satelliten-Kommunikationssystemen nicht geplant, stellt allerdings eine in der Nachrichtentechnik gängige Lösung zur Erhöhung des Datendurchsatzes dar. Die Polarisation eines mobilen Terminals sollte zumindest schaltbar sein, um auch Ausleuchtungsszenarien mit alternierenden Polarisationen bedienen zu können.

### **Ziel und Gliederung der Arbeit**

Die hohe Integrationsdichte aktiver Gruppenstrahler stellt eine noch ungelöste Problemstellung im Millimeterwellenbereich dar. Bisherige Ansätze digital steuerbarer Antennen beschränken sich auf das Ku-Band oder stoßen in ihrem Aufbau bei Nutzung einer Polarisation unter Berücksichtigung des begrenzten Elementabstandes im Ka-Band an ihre Grenzen [28]. Die Umschaltung bzw. gleichzeitige Verwendung orthogonaler Polarisationen verlangt neue Integrationskonzepte.

Ziel dieser Arbeit ist die Erforschung neuer Integrationsansätze zur Realisierung von Polarisationsmultiplex bei aktiven Gruppenstrahlern oberhalb des Ku-Bands. Als Anwendungsbeispiel lassen sich die zur Zeit vermehrt in Erscheinung tretenden Satellitenkommunikationssystem im Ka-Band nennen. Der Entwurf verfolgt dabei einen modularen Ansatz zur Skalierbarkeit für große Gruppenstrahler. Kernpunkt der vorgestellten Architektur ist der Einsatz von flüssig-kristallinen Polymeren (engl. *LCP* - *Liquid Crystal Polymer*) als Hochfrequenzsubstrat einer starr-flexiblen Mehrlagenleiterplatte (engl. *Multilayer*). Der starr-flexible Materialaufbau stellt hier im Zusammenhang mit aktiven Antennenmodulen einen vollkommen neuartigen Ansatz mit hohen technologischen Anforderungen dar. Dem Polarisationsmultiplex liegt dabei eine besondere Bedeutung als Nachweis höchster Integrationsfähigkeit und als neu zu untersuchende Funktionalität der Architektur inne, die bisher nicht für aktive Gruppenstrahler bereit gestellt werden konnte. Diese Dissertation ist im Rahmen des Forschungsprojektes „Santana 3“ (Smart Antenna Terminal) entstanden, welches vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), vertreten durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), gefördert wird. Damit verknüpft, orientiert sich die Umsetzung der Architektur an einen Technologiedemonstrator einer Empfangsantenne bei 20 GHz.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Analyse der starr-flexiblen Leiterplatte hinsichtlich ihrer elektrischen Eigenschaften sowie der Integrierbarkeit von aktiven und passiven Schaltungskomponenten. Die Analyse wird dabei durch Simulationen und Messungen verschiedener Leiterstrukturen wie Übergänge, Filter, Netzwerke und Antennen im Millimeterwellenbereich vollzogen.

Die aus der Zielsetzung dieser Dissertation und dem Santana-Projekt hervorgegangenen Spezifikationen eines Empfangmoduls mit Polarisationsmultiplex bei 20 GHz werden zunächst in Kapitel 1 genannt und in Hinblick auf ihre Auswirkung auf planare Architekturansätze erörtert. Dabei wird ein systemumfassender Überblick der zu integrierenden Komponenten wie z.B. Halbleiter, Antennenelemente, Kühlmöglichkeiten, etc. gegeben. Wie gezeigt wird, sind mehrere Ebenen aktiver Bauelemente zu implementieren, deren elektrische Verbindung effizient mit flexiblen Substraten verwirklicht werden kann. Des Weiteren sind kontrollierte Halbleiterumgebungen durch Wahl geeigneter

Kapselung zur Verminderung von Rückkopplungen und Vermeidung instabiler Arbeitspunkte zu schaffen.

Kapitel 2 befasst sich eingehender mit flüssig-kristallinem Polymer als flexiblem Material für Hochfrequenzleitungen. Die Verarbeitung zum starr-flexiblen Verbund mit sehr hohen Integrationsdichten stellt zum Zeitpunkt dieser Arbeit ein Novum dar und bringt einige Vorteile, aber auch Einschränkungen für die Mehrlagentechnologie mit sich. Auswirkungen von Biegungen der Hochfrequenzleitungen auf ihre S-Parameter werden analysiert. Der Einfluss von Schutzlaminat auf die Transmissionseigenschaften wird bestimmt. Aus einer abschließenden Bewertung lässt sich eine Aufbauarchitektur mit hoher Integrationsfähigkeit ableiten.

Die detaillierte Ausarbeitung eines Empfangmoduls bei 20 GHz ist Gegenstand des dritten Kapitels. Das starr-flexible Konzept wird unter Berücksichtigung der elektrischen, thermischen und mechanischen Anforderungen in einen Demonstrator umgesetzt. Die Ausarbeitung unterteilt sich in die Einzelkomponenten Antennenelement, Spiegelfrequenzfilter, Kühlung und Kapselung. Auch eine Skalierung des Modulkonzepts für große Gruppenstrahler wird vorgestellt.

Im letzten Kapitel wird die Simulation und Charakterisierung des gesamten Moduls dargelegt. Die Fernfeldmessung des Gruppenstrahlers verifiziert dabei die Funktionalität des Polarisationsmultiplex. Weiterhin wird der wichtige Zusammenhang der Integrationsdichte mit Kanalverkopplungen diskutiert. Die Arbeit schließt mit einem Ausblick über die Adaptierung der vorgestellten Architektur an noch höhere Integrationsdichten und Frequenzen.