

---

# MoSaKa – Mobile Satellitenkommunikation im Ka-Band

## -Schlussbericht-

### Partner im Konsortium:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – Institut für Kommunikation und Navigation Oberpfaffenhofen (IKN) im Unterauftrag

Fraunhofer IIS Erlangen (IIS),

Fraunhofer IIS – Projektgruppe Drahtlose Verteilsysteme Ilmenau (IIS-DVT)

Technische Universität Ilmenau – Fachgebiet Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik (HMT)

Technische Universität Ilmenau – Fachgebiet Integrierte Kommunikationssysteme (ICS)

Industrieanlagen – Betriebsgesellschaft mbH (IABG) Ottobrunn (IABG)

### Koordination:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Albert Heuberger

Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS

Am Wolfsmantel 33

D-91058 Erlangen

Telefon: +49 – 9131-776-6300

Fax: +49 – 9131-776-1099

---

## Autoren:

### Fraunhofer IIS Erlangen:

Albert Heuberger, Univ.-Prof. Dr.-Ing.;  
Ernst Eberlein;  
Rainer Hildinger;  
Steffan Lipp;  
Thomas Mahner;  
Holger Stadali

### Fraunhofer IIS – Projektgruppe Drahtlose Verteilsysteme Ilmenau:

Wolfgang Felber, Dr.-Ing.;  
Mario Lorenz;  
Markus Mehnert, Dr.-Ing.;  
Florian Raschke;  
Olaf Enge-Rosenblatt, Dr.-Ing. (EAS Dresden);  
Tobias Zaiczek (EAS Dresden)

### DLR IKN Oberpfaffenhofen:

Hartmut Brand;  
Andreas Wolf

### TU Ilmenau- FG Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik

Matthias A. Hein, Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil.;  
Hendrik Bayer;  
Alexander Krauß

### TU Ilmenau – FG Integrierte Kommunikationssysteme

Andreas Mitschele-Thiel, Prof. Dr.-Ing. habil.;  
Markus Brückner;  
Florian Evers, Dr.-Ing.;  
Philipp Drieß

### Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH (IABG)

Stefan Baumann, Dr.

Gefördert von der Raumfahrt-Agentur des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter den Förderkennzeichen 50 YB 0913, 50 YB 0914, 50 YB 0915.

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurzbeschreibung des Vorhabens .....</b>	<b>4</b>
1.1	Aufgabenstellung .....	4
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	5
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	6
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn .....	7
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	9
<b>2</b>	<b>Eingehende Darstellung.....</b>	<b>12</b>
2.1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse .....	12
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	94
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit .....	95
2.4	Voraussichtliche Nutzen im Sinne des Verwertungsplanes.....	96
2.5	Während der Projektdurchführung bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen .....	96
2.6	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	97
<b>3</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>99</b>
3.1	Abkürzungsverzeichnis.....	99
3.2	Abbildungsverzeichnis.....	102
3.3	Literaturverzeichnis .....	105

# 1 Kurzbeschreibung des Vorhabens

## 1.1 Aufgabenstellung

Die Zielsetzung des Projektes MoSaKa war die Entwicklung von Systemgrundlagen für mobile Satellitenkommunikation im Ka-Band. Mit Blick auf erweiterte Systemanforderungen in weltweiten Kriseneinsätzen soll bei kleinen Antennenaperturen ein optimaler Systemdurchsatz, auch in Kombination mit hybriden Netzwerk-Architekturen gewährleistet werden.

Die technische Zielsetzung des Projekts MoSaKa war die Entwicklung von Technologie-Komponenten in folgenden Bereichen:

Verbesserte Übertragungsverfahren sowie Verfahren für den Zugriff auf den Satelliten für erhöhte Robustheit im mobilen Kanal, optimalen Systemdurchsatz auch in hybriden Netzwerk-Architekturen sowie für Nachführverfahren auch mit kleinen Antennenaperturen.

Architekturen für hybride Netzwerke (das heißt Ergänzung der Satelliten-Terminals durch terrestrische Kommunikationssysteme wie zum Beispiel TETRA) mit dem dazugehörigen Ressourcen-Management.

Komponenten für kompakte Terminals, insbesondere nachführbare Antennen mit geringer Bauhöhe sowie Modulatoren und Demodulatoren

Die Arbeiten in dem Projekt wurden entsprechend der im Folgenden dargestellten Arbeitspakete (AP) organisiert (siehe Vorhabensbeschreibung [1]):

- AP 1000 umfasst die Gesamtkoordination des Projekts.
- In AP 2000 wurden die Nutzungsszenarien definiert und daraus die Anforderungen an das Kommunikationssystem abgeleitet. Auf der Basis dieser Anforderungen wurde eine vorläufige Architektur des Systems entwickelt. Mögliche Kandidaten für bereits existierende Übertragungsstandards wurden analysiert. Ergebnis dieser Untersuchungen war Meilenstein 1 (Baseline Design Review – BDR), der eine Festlegung einer vorläufigen Systemarchitektur sowie die Grob-Spezifikationen von Subsystemen, z.B. hinsichtlich Sendeleistung des Satelliten, Gewinn im Uplink-Pfad und Größeneinschränkungen auf der Terminal-Seite umfasst. Des Weiteren wurden zu nutzende, bereits bestehende Übertragungsstandards bzw. notwendige Modifikationen und Ergänzungen vorgeschlagen.
- In der nächsten Phase (AP 3000) wurden diese Vorschläge genauer mittels Simulation untersucht und hinsichtlich der formulierten Anforderungen validiert. Ergebnis dieser Phase war Meilenstein 2 (Preliminary Design Review PDR), der eine endgültige Festlegung der Architektur, der Missionsparameter und funktionalen Anforderungen an das Sende/Empfangsterminals umfasst. Neben dem BDR stellte dieser einen wesentlichen Entscheidungspunkt für die weitere Vorgehensweise im Projekt dar. Darauf aufbauend schloss sich die Erstellung einer detaillierten Spezifikation der Wellenform an.
- Auf der Basis dieser Spezifikation wurde in AP 4000 und AP 5000 das Sende- Empfangssystem implementiert. AP 4000 befasst sich mit der Indoor-Unit (IDU), welche die Basisband-Signalverarbeitung sowohl für Sende- als auch Empfangszweig sowie den MAC und LLC Controller umfasst.
- In AP 5000 wurde die Outdoor-Unit (ODU), bestehend aus Empfangskonverter und Up-converter/Leistungsverstärker sowie dem Antennensystem bearbeitet. Fokus der Forschungsarbeiten lag auf der Realisierung des Antennensystems. Zudem wurden Lösungsansätze für nachführfähige Systeme mit geringer Bauhöhe erarbeitet. Schließlich

wurde in diesem AP auch das Nachführsystem sowie ein Messsystem zur Charakterisierung von nachführbaren Antennensystemen realisiert.

- Im Rahmen des AP 6000 wurden die realisierten Demonstratoren für die Subsysteme in ein Übertragungssystem mit reduziertem Funktionsumfang integriert und mit realistischen Dienste-Szenarien erprobt.

Darüber hinaus wurde im Rahmen der Projektkoordination die Planung in Abstimmung mit dem Fördergeber an sich ändernde Gegebenheiten angepasst.

## 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

In Katastrophenfällen, wie zum Beispiel bei dem Hurrikan „Katrina“ in New Orleans, sind terrestrische Kommunikationsmittel (GSM, UMTS, Festnetz) oft nicht vorhanden, zerstört oder überlastet. Solche Extremwetterlagen treten, verursacht durch den Klimawandel, vermehrt auch in Europa auf (Stürme im Winter 1999, Elbe-Hochwasser 2002, Sturm „Kyrill“). Zusätzlich hat sich seit dem 11. September 2001 die politische Situation weltweit geändert, so dass auch in Deutschland eine terroristische Bedrohung nicht mehr ausgeschlossen werden kann.

Diese neue Art von Krisensituationen erfordern andere Methoden und Mittel im operationellen Einsatz der Krisenreaktionskräfte. Die reelle Einschätzung der Lage und eine schnelle und passende Wahl der Einsatzmittel sind nur mit Hilfe aktueller Lagebilder möglich. Das erfordert eine umfassende Anpassung und Modernisierung der Kommunikationsmittel der Einsatzkräfte. Mit einer fortschreitenden Globalisierung können entsprechende weltweite Einsätze auch in anderen Ländern im Rahmen der internationalen Hilfe stattfinden. Damit ergeben sich komplexe, dynamische Einsatzszenarien, die durch passende hochmobile Kommunikationstechnologie unterstützt werden müssen.

Satellitenbasierte Kommunikationssysteme eignen sich auf Grund der weltweiten Einsetzbarkeit, Flexibilität und Skalierbarkeit besonders als autarke Alternative zu erdgebundenen Kommunikationsformen. Durch aktuelle Systeme mit geringer Datenrate und eingeschränkter Mobilität (z.B. Inmarsat BGAN oder stationäre VSAT Terminals) wird das volle Potential der Satellitenkommunikation jedoch nicht ausgeschöpft.

Um den Nutzen des Datenaustauschs mit hoher Datenrate zu verdeutlichen ist nachfolgend ein Einsatz der Feuerwehr und Polizei im urbanen Gelände an einem Beispiel dargestellt. Dabei ist die Kommunikation ohne Abhängigkeit von der lokalen Kommunikation sicherzustellen:

Direkt nach dem Ausrücken der Feuerwehr und weiterer Rettungskräfte werden bereits während der Fahrt zum Einsatzort erste Daten mittels der vorhandenen TETRA-Infrastruktur ausgetauscht (damit ist ausschließlich niedriggradige Sprach- und Datenkommunikation möglich). Die zur Fahrtzeit empfangenen ersten Daten werden vorab ausgewertet. Am Einsatzort kann das Fahrzeug als Hub-Station für dezentrale terrestrische Kommunikation (zum Beispiel TETRA) oder als dezentraler Kommunikationsknoten bei entsprechender Ausstattung konfiguriert werden. Im Fall fehlender terrestrischer Verbindungen für die Notfallkommunikation müssen andere Verfahren, z.B. eine Anbindung über Satellit, zum Einsatz kommen. Die Fahrzeuge können dann über nomadische und mobile Sat-Terminals angebunden werden, die im Ka-Band operieren. Eine Anbindung an eine entfernte Einsatzleitzentrale, über die Einsatzkräfte koordiniert werden, ist somit möglich ohne auf öffentliche Infrastrukturkomponenten oder Kommunikationsnetze angewiesen zu sein.

Im Rahmen dieser hochmobilen Szenarien sind als Schlüsselkomponenten transportable, leichte Antennensysteme und Satellitenterminals im Ka-Band erforderlich, die ein „SatCom-on-the-move“ bzw. eine leichte Inbetriebnahme durch die Rettungskräfte vor Ort ermöglichen, um ak-

tuelle Daten und Lagebilder aus der Einsatzleitzentrale und vom Einsatzort zu übertragen. Parallel dazu erfolgt die Sprachkommunikation über die gleichen Netzkomponenten. Benötigt werden hierbei robuste, hochratige Antennensysteme für Sende- und Empfangsbetrieb. Am Einsatzort können dann die Daten in einem Kommunikationsverbund (breitbandiges WLAN für Sprache und Daten) verteilt bzw. neue Informationen vom Einsatzort (Sprache, Daten, Video) an die Einsatzzentrale weitergegeben werden. Somit ist eine kontinuierliche Kommunikation gewährleistet.

Allgemein tritt bei jedem Ereignis der in Abbildung 1 dargestellte zeitliche Verlauf auf:

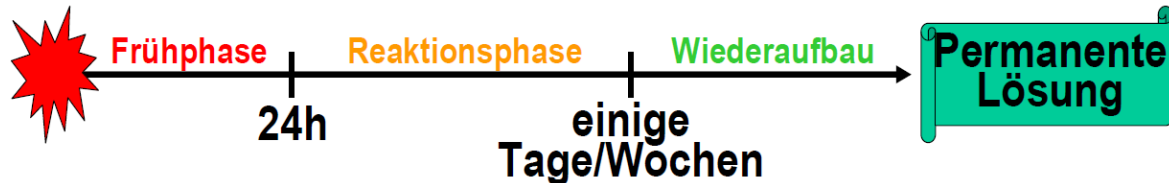


Abbildung 1: Typischer zeitlicher Verlauf nach einer Katastrophe

In der Frühphase nach dem Eintritt einer Katastrophe begeben sich erste Rettungskräfte in das Katastrophengebiet, um das Ausmaß der Katastrophe zu erfassen. Zu diesem Zeitpunkt liegen im Allgemeinen nur wenige Informationen über Art und Ausmaß der Katastrophe vor. In diesem Umfeld ist es wichtig, dass der Einsatzleitzentrale schnellstmöglich die nötigen Daten per Satellitenlink zur Verfügung gestellt werden, um ein umfassendes Lagebild zu erstellen und anschließend den Einsatz bestmöglich koordinieren zu können. Am Markt verfügbar sind dafür kleine Satellitentelefone wie Iridium oder Globalstar, die lediglich eine niedrigratige Sprachkommunikation ermöglichen. In der sich anschließenden Reaktionsphase können dann größere Satellitenterminals (Container) eingesetzt werden, an die kleine tragbare Basisstationen (GSM, WIFI, WiMAX, TETRA, etc.) angebunden werden.

Sinnvoller sind – schon in der Frühphase – schnell installierbare bzw. mobile / nomadische Ka-Band Terminals mit selbstausrichtenden Antennen und hoher Datenrate. Dadurch können größere Datenmengen, wie zum Beispiel Fotos, Videos, oder Landkarten, schnell übertragen werden. Gleichzeitig beschleunigt die schnelle Installation eines satellitenbasierten Kommunikationsnetzes im Katastrophengebiet die Rettungsaktionen.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die im Rahmen des Projekts erarbeiteten technologischen Ergebnisse wurden in sinnvollen Zeitabständen stufenweise validiert und demonstriert. In regelmäßigen Abständen wurde der Verlauf in einem Zwischenbericht (ZB) dokumentiert.

Entsprechend dem im Projektantrag (Seite 31) vorgestellten Zeitplan wurde beginnend mit AP2000 die Systemarchitektur mit Hilfe der aus Nutzeranfragen gewonnenen Anforderungen entwickelt. Die Nutzerbefragung wurde in zwei Stufen abgearbeitet (siehe ZB bis 30.06.2009). Daraus ergab sich zunächst keine Verzögerung für abhängige APs da in der ersten Stufe für die Weiterarbeit ausreichende Ergebnisse erzielt werden konnten. Der Umfang der Befragung und der Analyse führte zu einer Verzögerung des Meilensteins 1 (MS-1) von 4 Monaten. Die BDR fand am 25.01.2010 in Ilmenau statt. Der daraus resultierende Gesamtverzug konnte auf 2 Monate begrenzt werden, da an anderen APs parallel weitergearbeitet wurde (siehe ZB bis zum 30.06.2010).

Aufbauend auf der BDR wurde in AP3000 der Spezifikation der Wellenform gearbeitet. Da sich eine Unterscheidung von Forward und Return Link als nicht zielführend erwies wurden AP3100

und AP3200 zusammen durchgeführt (siehe ZB bis zum 31.12.2009). Die PDR fand am 27.05.2010 in Erlangen statt (siehe ZB bis zum 30.06.2010).

Auf der Wellenform-Spezifikation aus AP3500 basierten die Arbeiten an der Terminal IDU (AP4000). Auf Grund der vorausgegangenen Verzögerungen wurde der Meilenstein 3 unter Absprache mit dem ZG zunächst auf Juli 2011 und die abschließende Demonstration des Projektes auf Mai 2012 verschoben (siehe ZB bis zum 31.12.2010). Später zeichnete sich eine weitere Verschiebung des MS-3 bis September 2011 ab (siehe ZB bis zum 30.06.2011). Das Projekt wurde kostenneutral verlängert und das Projektabschlussdatum auf den 31.07.2012 festgelegt (siehe ZB bis zum 31.12.2011). MS-3 wurde am 29.09.2011 abgeschlossen. Die IDU wurde bis Mitte 2012 vollständig in das SatCom-Testbed integriert (siehe ZB bis zum 30.06.2012).

Parallel zu diesen APs wurde im Rahmen des AP5000 seit Beginn des Projektzeitraumes an der ODU des Terminals gearbeitet. Bei Testfahrten in Zusammenarbeit mit dem THW München (AP5200) am 19. und 20.03.2010 stellte sich heraus, dass eine Sonderanfertigung eines Nachführsystems für in Extremsituationen auftretende Winkelbeschleunigungen und Geschwindigkeiten nötig ist (siehe ZB bis zum 30.06.2010). Dabei wurde die Einhaltung des Zeitplans nicht gefährdet, jedoch entstanden höheren Kosten für die Integration des Terminals (siehe ZB bis zum 30.06.2012).

Abschließend wurde im Rahmen des AP6000 die Validierung und Demonstration des Systems durchgeführt. Zum ZB bis zum 30.06.2012 konnte das IKN-Equipment (AP6100, AP6200 und AP6300) vollständig in das SatCom-Testbed in Ilmenau integriert werden. Das Zusammenspiel der Komponenten und Subsysteme wurde in einem Anwendungsszenario demonstriert. Dabei wurden Einsatzkräfte in einer stationären, nomadischen und mobilen Umgebung vernetzt. Der Abschluss des Projektes fand am 30. und 31.07.2012 in Ilmenau statt.

## 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn

Zu Beginn des Projektes waren bereits im begrenzten Maß ortsfeste VSAT Kommunikationssysteme vorhanden, die Sicherheits- und Einsatzkräften im Krisenfall eine Kommunikations-Infrastruktur zwischen Leitzentralen zur Verfügung stellen (zum Beispiel SkyWAN der Firma ND-SatCom mit Zielrichtung Disaster-Management). Im Mittelpunkt stehen dabei symmetrische Datenverbindungen mit annähernd gleicher Datenrate im Forward- und Return-Link. Des Weiteren wurden Forschungsprojekte zur Adaption von SatCom Systemen für Kommunikation im Krisenfall (siehe zum Beispiel [www.wisecom.org](http://www.wisecom.org)) durchgeführt.

Durch die Anwendung von innovativen Satellitentechnologien aus dem Bereich der Kommunikation, ggf. in Verbindung mit Erdbeobachtung, können Sicherheits- und Rettungskräfte bei ihren zukünftigen Aufgaben wesentlich besser unterstützt werden. Dadurch kann die Sicherheit der Einsatzkräfte und damit auch die der Bevölkerung erhöht und Umweltschäden reduziert bzw. minimiert werden. Aufgrund wesentlich neuer Technologien mit den bedarfsangepassten Anwendungen wird die Entwicklung marktgerechter Lösungen ermöglicht.

Für stationäre und teil-mobile bidirektionale Kommunikationssysteme über Satellit gab es zu Beginn des Projektes folgende Optionen:

- Für weltweit einsetzbare, symmetrische mobile Dienste steht das Inmarsat BGAN Broadband Global Area Network zur Verfügung. Es arbeitet im L-Band und stellt Datenraten von bis zu 432 kbit/s zur Verfügung. Die Kosten für diese Dienste sind sehr hoch.
- Rückkanal-Systeme nach dem DVB-RCS Standard basieren auf einer komplexen, ortsfesten zentralen Station (Hub-Station) und bieten eine umfangreiche Funktionalität. Dieser Standard setzt Terminals mit hohem Gütefaktor (G/T) und geringer Interferenz voraus.

Neuere Erweiterungen des Standards (zum Beispiel DVB-RCS+M) erlauben eingeschränkte Mobilität und teilweise vermaschte Kommunikation, wobei allerdings die grundlegende Architektur und die Anforderungen an die Terminals gleich bleiben. Derzeit wird die Entwicklung einer zweiten Generation von Rückkanalsystemen im Rahmen der DVB-RCS2 Standardisierung vorbereitet mit dem Ziel, die Systemkapazität zu erhöhen und die Implementierungskosten zu reduzieren.

- Rückkanal-Systeme, die als Ergänzung für europaweite digitale Rundfunksysteme im S-Band konzipiert sind (speziell die W2A Payload von SES-Astra /Eutelsat), arbeiten sehr stark asymmetrisch. Architektur und Signalformen sind darauf ausgelegt, für eine große Zahl (einige Millionen) von Nutzern einen paketorientierten Rückkanal für kleine Datenmengen bereitzustellen (etwa für Notrufmeldungen im Automobil-Bereich oder für Logistik-Anwendungen).
- Für weltweiten Einsatz steht das Rückkanal-Systeme des Betreibers ORBCOMM zur Verfügung. Es arbeitet im VHF Band und erlaubt die Übertragung von sehr geringen Datenmengen (einige kByte) pro Nutzer mit einer vergleichsweise hohen Latenzzeit von bis zu einigen Minuten.

In der jüngeren Vergangenheit sind für mobile satellitenbasierte Rundfunkanwendungen folgende Standards für den Forward-Link entwickelt worden:

- Für mobilen Empfang im Ku-Band mit vergleichsweise kleinen Antennen-Aperturen von ca. 20 cm wurde eine Wellenform im Rahmen des Ku-Mobil Projekts [2] entwickelt. Die Robustheit im mobilen Kanal mit tragbaren Terminals wird durch eine Kombination von langen Zeit-Interleavern entweder mit Fehlerschutz auf dem Physical Layer (Physical Layer Interleaver / FEC) oder auf der Applikationsschicht (Upper Layer Interleaver / FEC) erreicht. Zusätzlich wird Bandspreizung eingesetzt, vor allem um die Anforderungen bezüglich der Frequenzregulierung erfüllen zu können. Zu Beginn des Projektes MoSaKa wurde die Ku-Mobil Wellenform als Erweiterung des ETSI-SDR Standards in der Gruppe SES – SDR (Satellite Earth Stations – Satellite Digital Radio) standardisiert. Die hier entwickelten Konzepte sind die Grundlage für den ETSI-SDR und DVB-SH Standard.
- Der DVB-SH Standard ist besonders für Anwendungen im mobilen Fernsehen geeignet und unterstützt verschiedene Netzwerk-Architekturen (Satellit und/oder terrestrische Sender). Die Robustheit im mobilen Kanal mit tragbaren Terminals wird durch eine Kombination von langen Zeit-Interleavern entweder mit Fehlerschutz auf dem Physical Layer (Physical Layer Interleaver / FEC) oder auf der Applikationsschicht (Upper Layer Interleaver / FEC) erreicht.
- Für digitalen Audio-Rundfunk im L-Band wurde der ETSI-SDR Standard entwickelt. Dieser basiert ebenfalls auf einer Kombination von Interleaver und Fehlerschutz auf Physical oder Application Layer. Des Weiteren stehen hier logische Übertragungskanäle („Signal Pipes“), deren Fehlerschutz und Interleaver-Länge unabhängig konfiguriert werden können, zur Verfügung. [3, 4, 5]
- Der ursprünglich für stationäre Satelliten-Downlinks im Ku-Band spezifizierte Standard DVB-S wurde mit dem DVB-S2 Standard erweitert und bietet vor allem die Möglichkeit einer bandbreiteneffizienteren Übertragung und einer erhöhten Leistungseffizienz durch neuere Fehlercodierverfahren. In Kombination mit zusätzlichem Fehlerschutz auf Applikationsebene (Upper Layer Interleaver / FEC) erlaubt er im Prinzip auch den Betrieb im mobilen Kanal. Neuere Untersuchungen haben allerdings ergeben, dass Upper Layer FEC deutlich ineffizienter als Physical Layer Interleaver / FEC ist. [6, 7]

Auf dem Gebiet der nachführbaren Antennen im Ku- und Ka-Band stellte sich der Stand der Technik folgendermaßen dar:



Kommerziell verfügbare Systeme sind zumeist mechanisch nachführbar, bei Antennen mit geringer Bauhöhe lässt sich die Elevation elektronisch einstellen. Die Systeme werden häufig mit Kompass und GPS sowie automatischen Nachführverfahren angeboten. Es befinden sich überwiegend Empfangssysteme auf dem Markt; TX-fähige Nachführantennen befinden sich in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium.

Beispiele für kommerzielle Nachführantennen für das Ku-Band betreffen u.a. folgende Firmen:

- Raysat [8] (Zusammenarbeit mit Schwaiger in Deutschland): z.B. Modelle StealthRay oder SpeedRay, Array-Antenne, RX/TX (4W Sendeleistung), Durchmesser 52x17 cm, G/T ca. 10 dB/K.
- NDSatcom [9]: z.B. Modell SkyRAY: mobile VSAT-Reflektorantenne mit Dreiachsen-Nachführsystem, TX-fähig, Durchmesser 120...190 cm, 40-45 dBi Gewinn,  $\pm 200$  Grad Azimut, 5 bis 90 Grad Elevation, Höhe > 49 cm.
- KVH [10]: z.B. Modell TrackVision A7, RX-System, Durchmesser 80x15 cm.

In einem fortgeschrittenen Forschungsstadium bzw. teilweise sogar kurz vor einer Markteinführung standen hybride elektronisch und/oder mechanisch nachführbare Antennen flacher Bauform, die hauptsächlich für mobile Ku-Band Multimedia Systeme entwickelt worden sind. Beispielprojekte betreffen:

- Projekt NATALIA (IMST) [11]: Empfangssystem, Durchmesser ca. 12 cm, geringe Direktivität, Elevationsbereich 20...60 Grad, elektronische Nachführung in Elevation und Azimut.
- Projekt HiSAT (JAST) [12]: Empfangssystem, zwei Größen (Durchmesser 60x7 cm und 20x4 cm), die kleinere Variante erfordert einen spezifischen Receiver; LNA und Phasenschieber sind zeilenweise zusammengefasst, so dass die Elevation elektronisch eingestellt werden kann, während der Azimut mechanisch nachgeführt wird.
- Projekt ERA (UK) [13]: Empfangssystem, Elevation elektronisch, Azimut mechanisch, flache Bauhöhe (10 cm), auch für Sendebetrieb, angeblich skalierbar zu Ka-Band-Frequenzen.

Im Gegensatz zu den Ku-Band-Systemen befinden sich nachführbare Antennen für Ka-Band-Anwendungen gegenwärtig noch im Stadium intensiver Forschung und Entwicklung, was nicht zuletzt auch den erst jetzt zunehmend verfügbaren Bandbreiteressourcen geschuldet ist, für die allerdings sehr dynamische Wachstumsprognosen gegeben werden. Das in diesem Bereich maßgebende F&E-Vorhaben betrifft das Projekt SANTANA [14], das auf modularer Basis eine digitale Strahlformung für ein Patchstrahler-Array realisiert. Das System ist TX-fähig; Kenndaten umfassen ein EIRP von mindestens 40 dBW sowie ein G/T von 9.5 dB/K.

Mit den verfügbaren Übertragungsstandards lassen sich die Anforderungen für mobile Satellitenkommunikation für den Krisenfall im Ka-Band nicht oder nur sehr unvollkommen erfüllen, ebenso fehlen geeignete Technologien für leistungsfähige und kostengünstige Endgeräte. Aus dem Stand der Technik wurden die Anhaltspunkte für das Vorhaben MoSaKa abgeleitet.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

In das Projekt MoSaKa brachten folgende Partner ihre Kompetenzen in den Aspekten Betrieb, Infrastruktur, System und Forschung & Technologie ein:

- **IABG:** Betreiber von Satellitenkommunikations-Netzen sowie Hersteller von terrestrischen Netzwerken;  
Die IABG wurde 1961 auf Initiative des Bundes als zentrale Analyse- und Testeinrichtung für die Luftfahrtindustrie und das Verteidigungsministerium gegründet und ist heute ein

führendes europäisches, technisch wissenschaftliches Dienstleistungsunternehmen. Das Dienstleistungsspektrum der IABG umfasst analytische, technische und operationelle Lösungen in den Branchen: Automotive, InfoKom, Verkehr & Umwelt, Luftfahrt, Raumfahrt und Verteidigung & Sicherheit. Speziell im Bereich Internet-Technologie zählt die IABG zu den anerkannten Technologieführern. Sie beteiligt sich des Weiteren an Forschungsprojekten und ist Mitglied in verschiedenen Standardisierungsgremien.

- **Fraunhofer IIS:** Forschungseinrichtung mit den Themen Drahtlose Verteilsysteme und Satellitenkommunikation;

Das 1985 gegründete Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS in Erlangen ist heute das größte Fraunhofer-Institut in der Fraunhofer-Gesellschaft. Mit der Entwicklung des Audiocodierverfahrens MPEG Layer-3, kurz MP3, erreichte das Fraunhofer IIS eine internationale Spitzenstellung auf diesem Gebiet und ist weltweit bekannt geworden. In enger Kooperation mit den Auftraggebern forschen und entwickeln die Wissenschaftler auf folgenden Gebieten: Digitaler Rundfunk, Audio- und Multimediatechnik, digitale Kameratechnik, Entwurfsautomatisierung und integrierte Schaltungen, drahtgebundene, drahtlose und optische Netzwerke, Lokalisierung und Navigation, Hochgeschwindigkeitskameras, Ultrafeinfokus-Röntgentechnologie, Bildverarbeitung und Medizintechnik, IuK-Technologien für die Logistik-Dienstleistungswirtschaft. Mehr als 750 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter arbeiten auf dem Gebiet der Vertragsforschung für die Industrie, für Dienstleistungsunternehmen und öffentliche Einrichtungen. Das Fraunhofer IIS mit dem Hauptsitz in Erlangen hat weitere Standorte in Nürnberg, Fürth, Ilmenau und Dresden. Das Budget von 95 Millionen Euro wird bis auf eine Grundfinanzierung in Höhe von 20 Prozent aus der Auftragsforschung finanziert. Innerhalb des oben genannten Forschungs- und Entwicklungsportfolios fokussiert das Fraunhofer IIS auf digitale Rundfunksysteme, satellitengestützte Navigation sowie terrestrische bidirektionale Kommunikationssysteme für professionelle Anwendungen. In der Tat ist das Fraunhofer IIS eine der größten Forschungs- und Entwicklungsinstitutionen weltweit, die sich dem Design und der Implementierung von terrestrischen und satellitengestützten digitalen Rundfunksystemen sowohl für ortsfeste als auch für mobile Empfänger widmet. Das Fraunhofer IIS spielt eine wichtige Rolle bei der Entwicklung von Kommunikationssystemen wie Eureka 147 DAB, DVB, ESDR, WorldSpace, Sirius, XM Radio, Digital Radio Mondiale, und anderen. Etwa 70 Wissenschaftler arbeiten derzeit an Design und Implementierung digitaler Rundfunksysteme.

Im Bereich der satellitengestützten Kommunikation fokussiert das Fraunhofer IIS auf mobilen Empfang im S- und L-Band. Die Aktivitäten beinhalten nutzerspezifische Systemkonzepte, Machbarkeitsstudien, detaillierte Systemanalysen mittels Simulationen sowie prototypisches Design und Implementierung von Kernkomponenten für Produkte. In Kooperation mit Chip-Herstellern (z.B. ST Microelectronics) unterstützt das Fraunhofer IIS die Entwicklung von Produkten für den Massenmarkt.

- **Technische Universität Ilmenau – Fachgebiet Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik (HMT)**

Die Forschungsaktivitäten des Fachgebietes HMT umfassen Mikrowellen-Bauelemente und Antennen, Schaltungen und Systeme, innovative Materialien und Konzepte, sowie anwendungsspezifische Industrie-Projekte. Die langjährigen Erfahrungen in Entwurf, Aufbau und Charakterisierung von Schaltungen und Baugruppen der HF- und Mikrowellentechnik haben die erfolgreiche Durchführung zahlreicher öffentlicher F&E-Vorhaben wie *KERAMIS*, *MIDIAS* u.a. ermöglicht. Die Forschungsgruppe ist mit kabelgebundener und on-wafer Frequenzbereichs- und Zeitbereichs-Messtechnik umfangreich ausgestattet.

Darüber hinaus stehen zwei interdisziplinäre Forschungslabore zur Verfügung, zu denen neben dem Labor für Mobilkommunikation insbesondere ein Antennen-Messlabor mit Präzisions-Positionierer gehört. Die Infrastruktur umfasst ferner zahlreiche computergestützte Entwurfsverfahren für die Simulation von Mikrowellenschaltungen und Feldproblemen. Das Fachgebiet ist neben seiner Zugehörigkeit zum Institut für Informationstechnik auch Mitglied des Institutes für Mikro- und Nanotechnologien der TU Ilmenau und besitzt damit unmittelbaren Zugang zu Herstellungs-, Aufbau- und Verbindungstechnologien sowie Mikrostruktur-Analytik. Ferner bestehen etablierte Zusammenarbeiten mit Partnern des MoSaKa-Konsortiums (Fraunhofer IIS, TU Ilmenau – IHS). Weitere Angaben zum Fachgebiet finden sich unter [www.tu-ilmenau.de/hmt](http://www.tu-ilmenau.de/hmt).

- **Technische Universität Ilmenau – Fachgebiet Integrierte Hard- und Softwaresysteme (IHS)**

Den Schwerpunkt der Forschungen des Fachgebietes bilden Protokolle und Netzwerke von Mobilkommunikationssystemen. Im Mittelpunkt stehen Fragen zu zukünftigen Netzarchitekturen (Future Internet), des selbstorganisierenden Managements von Netzen sowie dazugehörige Protokolle der Protokollschichten 2 und 3. Dies wird ergänzt durch Aktivitäten der HW/SW Entwicklung zur Unterstützung des Prototyping und der Implementierung der entwickelten Konzepte. Das Fachgebiet versteht sich als stark anwendungsorientiert, in den letzten 4 Jahren hat das Fachgebiet zwei Firmengründungen hervorgebracht, die IDEO Laboratories GmbH mit Fokus auf Netzoptimierung und Internet-Telefonie, sowie die Cuculus GmbH mit Schwerpunkt auf der intelligenten Trennung und Virtualisierung von WLAN Access Points für verschiedene Betreiber sowie dessen Management. Konkrete Forschungen im Umfeld des vorgeschlagenen Projektes sind:

- Qualitativer und quantitativer Vergleich von Protokollen zum Mobilitätsmanagement,
- Entwicklung von Protokollen zum Mobilitätsmanagement, insb. unter Berücksichtigung von Sicherheits- und Dienstgüteaspekten (e.g. MIFA, QoMIFA, I-MPLS),
- Untersuchung und Entwicklung von Protokollen bzw. deren Modifikation für mobile ad-hoc Netze (MANETs), insb. Koordination des Medienzugriffs (masked-node Problem), Adressautokonfiguration und multi-hop Forwarding,
- Entwicklung von Methoden zum Management der Funkressourcen in mobilen Systemen, wie z.B. die Optimierung der RRC-Zustände bei UMTS sowie das funksystemübergreifende Management der Funkressourcen (Common Radio Resource Management).

Methodisch stützt sich das Fachgebiet auf den Einsatz von SDL/UML zur Protokollspezifikation und Validierung sowie auf analytische Methoden und ns-2 als Simulationswerkzeug zur Leistungsbewertung.

Weitere Angaben zum Fachgebiet finden sich unter [www.tu-ilmenau.de/ihs](http://www.tu-ilmenau.de/ihs).

- **Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) - Institut für Kommunikation und Navigation (IKN)**

Am Institut für Kommunikation und Navigation werden neue Systeme und Verfahren für die Funkübertragung und Funkortung entwickelt und untersucht. Angewandt werden sie bei der flächendeckenden Versorgung mit Multimediainhalten, ebenso wie bei der Internetanbindung von Satelliten, Flugzeugen oder entlegenen Gebieten. Für den Bereich der Hochratenübertragung zwischen Satelliten und zum Boden wird an optischen Übertragungsverfahren gearbeitet.

Bei der Satellitennavigation liegt ein großes Gewicht auf sicherheitskritischen Anwendungen, die eine sehr zuverlässige Positions- und Zeitbestimmung erfordern, sowie auf der Ortungsfähigkeit in Häuserschluchten und Gebäuden.

Die Arbeiten am Institut spannen den Bogen von der theoretischen Untersuchung bis zum experimentellen Aufbau von Komponenten und Systemen. Die Ergebnisse spielen ebenso eine wichtige Rolle in Luftfahrt und bodengebundenen Verkehr.

Für MoSaKa relevante Erfahrungen hat das IKN in zahlreichen ESA und EU Projekten gesammelt. Beispielfhaft sind dies die Projekte WISECOM (Wireless Infrastructure over Satellite for Emergency Communication), Adaptive Coding and Modulation Modem for Broadband Communications (ESA), Resources Management using Adaptive Fade Mitigation Techniques (ESA), Mobile Ku-Band Receive only Terminal Demonstrator (ESA), Advanced Modem Prototype for Interactive Satellite Terminals (ESA). Die Schwerpunkte lagen dabei auf den Standards DVB-S2, DVB-RCS, Ku-Mobile, und DVB-SH.

## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

#### 2.1.1 Nutzeranforderungen

##### 2.1.1.1 Kommunikation im Krisenmanagement

In der jüngeren Vergangenheit haben Katastrophen-Fälle wie zum Beispiel der Hurrikan „Katrina“ in New Orleans gezeigt, dass für Einsatzkräfte im Krisenfall eine von terrestrischen Netzwerken unabhängige Kommunikationsinfrastruktur notwendig ist.

Krisensituationen erfordern autarke und leistungsfähige Methoden und technische Mittel im operationellen Einsatz der KHK. Katastrophen sind im Allgemeinen nicht zu verhindern, aber deren Ausmaß bzw. Folgeschäden können durch geeignete Kommunikationstechnologien begrenzt werden.

Im Rahmen der internationalen Hilfe können die Einsatzkräfte weltweit agieren. Damit ergeben sich komplexe, dynamische Einsatzszenarien, die durch passende hochmobile und breitbandige Kommunikationsmittel unterstützt werden müssen. Grundsätzlich ist nach einem Krisenfall davon auszugehen, dass die verfügbare Kommunikations-Infrastruktur, wie Global System for Mobile Communications (GSM), Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) oder Festnetz meist lokal bzw. regional zerstört, stromlos oder überlastet ist. Somit ist die Kommunikation der Behörden und Rettungskräfte über diese öffentlichen Netze nicht mehr gewährleistet. Das betrifft die öffentliche Infrastruktur, kann aber auch Teile des BOS (Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben)-TETRA (TERrestrial Trunked RAdio)-Netzes betreffen, da dessen Basisstationen und Vermittlungseinrichtungen auch mehr oder weniger von der öffentlichen Stromversorgung und dem Telekommunikationsnetz abhängig sind.

Fazit: Terrestrische Kommunikationsinfrastruktur ist häufig im Krisenfall entweder:

- nicht vorhanden, da sich das Einsatzgebiet in einer entlegenen Region befindet, wie Pipelineschaden, Waldbrand, o.ä.
- durch die Katastrophe zerstört z.B. bei einem Sturm, Erdbeben oder einer Überschwemmung
- nach der Katastrophe durch die intensive Belegung der vorhandenen Kommunikationskapazität überlastet und damit nicht zuverlässig für das Krisenmanagement nutzbar

Satellitenbasierte Kommunikationssysteme bieten gerade für Anwendungen im Bereich des internationalen Krisenmanagements sinnvolle Lösungen. Sie sind unabhängig von einer terrestrischen Kommunikationsinfrastruktur und weltweit einsetzbar. Ein weiterer Vorteil der Satellitenkommunikation für Krisenmanagementanwendungen liegt in der hohen Flexibilität und Skalierbarkeit gegenüber fest installierten terrestrischen Kommunikationssystemen, beispielsweise Mobil- und Bündelfunksysteme mit festen Basisstationen.

Die Mobilität spielt hierbei eine tragende Rolle, da sich die Einsatzkräfte in der Regel mobil im Einsatzgebiet bewegen. Aber auch für die regionalen Leitstellen spielt die Mobilität eine immer stärkere Rolle. So kann es beispielsweise nötig sein, eine regionale Leitstelle auf Grund der sich ergebenden Lage zu verlegen. Auch eine bewegliche Leitstelle, die mittels SatCom on the Move angebunden ist, wird von unterschiedlichen Krisenhilfskräften (KHKs) gefordert.

Derzeit beschränkt sich die Nutzung mobiler Satellitenkommunikationssysteme auf kleine Datenmengen (z.B. Inmarsat BGAN) bzw. stationäre VSAT Terminals und das volle Potenzial der Satellitenkommunikation wird nicht ausgeschöpft. Durch die Verwendung des Ka-Bandes ergeben sich hierbei Vorteile für die Einsatzkräfte hinsichtlich der Mobilität und der Bandbreite. Die hohe Bandbreite eröffnet neue Möglichkeiten der Datenübertragung und ermöglicht einen höherwertigen Informationsaustausch. So können z.B. Textnachrichten, Fotos, Videos und Geodaten auch mobil / nomadisch übertragen werden. Dies ist für die Beurteilung von Lagesituationen und die Dokumentation der Einsätze ein wesentlicher Gewinn.

### 2.1.1.2 Analyse der Nutzeranforderungen

Eine der ersten Aufgaben bestand darin eine Nutzerbefragung durchzuführen, wobei die verschiedenen Einsatzkräfte bezüglich allgemeinen und anwendungs-spezifischen Anforderungen befragt wurden. Hierbei wurde vor allem darauf Wert gelegt, welche höherwertigen Applikationen, wie beispielsweise Video- oder Geodatenübertragung, gebraucht werden. Aber auch die Darstellung typischer Einsatzszenarien wurde abgefragt. Nach der Nutzerbefragung von Kriseneinsatzkräften wurde ein Demonstrationsszenario erstellt, welches repräsentativ für möglichst viele typische Kriseneinsatzszenarien ist. In diesem Demonstrator wurden v.a. höherwertige Dienste implementiert. Bei diesen höherwertigen Diensten handelt es sich um die Übertragung von Live-Videos, Fotos, Text- und Geodaten.

### Erfassung der Kriseneinsatzkräfte

In Deutschland sind im Katastrophenfall, zum Schutz von Leib und Leben oder zum Abwenden von Sachschäden folgende staatliche und private Organisationen vornehmlich beteiligt:

- Technisches Hilfswerk (THW)
- Feuerwehren
- Bereitschaftspolizei
- Bundeskriminalamt (BKA) und Landeskriminalamt (LKA)
- Die Bundeswehr kann auf Anforderung eines Landes bei einer Naturkatastrophe oder bei einem besonders schweren Unglücksfall eingesetzt werden
- Rettungsdienste:
  - Arbeiter-Samariter-Bund (ASB)
  - Deutsche Lebens-Rettungs-Gesellschaft (DLRG)
  - Deutsches Rotes Kreuz (DRK)

- Johanniter-Unfall-Hilfe (JUH)
- Malteser Hilfsdienst (MHD)

Alle oben genannten Kräfte sind im Bereich von Krisen- und Katastrophenschutz bei nationalen wie auch bei internationalen Einsätzen tätig. Hierbei stellen vor allem die Einsätze, die nicht in Deutschland stattfinden, eine erhebliche Belastung sowohl für das Personal als auch das Material dar. Insbesondere hier ist es wichtig ein mobiles und zuverlässiges Kommunikationssystem bereitzustellen, um die im Einsatz befindlichen Kräfte zu koordinieren.

Durch die IABG wurden einige der oben genannten Organisationen ausgewählt und eine Nutzerbefragung durchgeführt. Alle ausgewählten Nutzergruppen wurden mit Hilfe von Fragebögen hinsichtlich ihrer Anwendungen befragt. Hierbei wurde grundsätzlich zwischen einem allgemeinen und einem anwendungsspezifischen Nutzerfragebogen unterschieden. In der Tabelle 1 sind die verschiedenen Themenkomplexe der Fragebögen auf oberster Detailebene aufgeschlüsselt.

Tabelle 1: Allgemeine und anwendungsspezifische Nutzerfragen

Einsätze	Deutschland / Weltweit
Einsatzkräfte	Anzahl Gesamt
	Anzahl Einsatzkräfte/Teams im Einsatz
Fahrzeuge	Anzahl Gesamt
	Fahrbedingungen im Einsatz
Terminalanforderungen	Größe, Gewicht, Stromversorgung, Staubschutz, Wasserschutz, etc.
Anforderungen für spezifische Anwendungen und Einsatzphasen	Einsatzdauer
	Zu übertragende Information Sprache Daten (GPS, Text, Foto, GEO-Daten) Video
	Datenvolumen und Häufigkeit (Intervalle, On-Demand)
	Netztopologie
	Mobilität (mobil, nomadisch, stationär)
	QoS
	Anzahl der erforderlichen Terminals

### Ermittelte Nutzeranforderungen

Im Anschluss an die Erfassung der Nutzeranforderungen wurden die erhobenen Daten analysiert. Hierbei wurde das Hauptaugenmerk auf die unterschiedlichen Kommunikationswege, die Daten und die Datenrate gelegt (Tabelle 2). So findet der meiste Kommunikationsverkehr zwischen den Trupps mit der regionalen Leitstelle sowie der regionalen Leitstelle und der Basis (im Heimatland) statt. Eine Kommunikation zwischen den einzelnen Trupps bzw. zwischen Trupp und Basis findet aufgrund der hierarchischen Struktur der beteiligten Organisationen i.d.R. nicht statt. Die Datentypen Sprache, Text, Foto und Geodaten werden gleichstark nachgefragt. Da

bisher die Einsätze vorwiegend über Sprache koordiniert werden, bestätigt die Umfrage die zukünftige Bedeutung von Text, Fotos und Geodaten (die gleich stark wie Sprache von den Nutzern nachgefragt werden).

Tabelle 2: Datenübertragungsbedarf verschiedener Datentypen zwischen den unterschiedlichen Organisationseinheiten

	Datenübertragung			
	Sprache	Textdatei	Foto	Geodaten
Trupp zu Trupp	4	4	4	4
Trupp zu Leitstelle	11	10	11	10
Leitstelle zu Trupp	11	10	10	10
Leitstelle zu Basis	16	14	16	12
Basis zu Leitstelle	16	14	17	12
Trupp zu Basis	5	5	6	5
Basis zu Trupp	5	5	5	4

### 2.1.1.3 Beispiel THW (SEEWA)

Nachdem im vorherigen Kapitel die allgemeinen Kriterien bezüglich der Nutzerbefragung dargestellt wurden, sollen nun anhand eines Beispiels die Nutzeranforderungen und Anwendungen aufgezeigt werden. Als Beispiel soll hierbei nun die Schnell-Einsatz-Einheit Wasser Ausland (SEEWA) des THWs dienen. Bei dieser Einheit handelt es sich um eine Gruppe von zwei bis zehn Personen, welche eine operativ-taktische Auslandseinheit bilden, mit der das THW schnell auf aktuelle Gefahrenlagen im Bereich der Trinkwasserversorgung reagieren kann. Die im Jahre 2004 gegründete Einheit umfasst ungefähr 150 Mitglieder und beschäftigt sich, wie bereits erwähnt hauptsächlich mit dem Thema der Wasseraufbereitung. Hauptaufgaben sind vor allem die Analyse der Wasserqualität sowie das Wiederherstellen von Brunnen und Leitungsnetzen zur Wasserförderung. Eine Besonderheit dieser Einheit ist, dass diese bereits sechs Stunden nach der Alarmierung zum Abflug in das jeweilige Einsatzland bereitsteht.

In Abbildung 2 und Abbildung 3 sind die Kommunikationsflüsse eines SEEWA Einsatzes dargestellt. Hierbei wird zwischen Frühphase und Reaktionsphase unterschieden, in denen unterschiedliche Kommunikationsanforderungen bestehen. Die Breite der Pfeile repräsentiert das erforderliche Datenvolumen. In der Frühphase eines Einsatzes werden mehr Informationen von der Basis, (welche sich in der Regel im Heimatland befindet) an die örtliche Leitstelle übermittelt, dabei handelt es sich v.a. um aktuelle Geoinformationen zum Einsatzgebiet auch aus dem Einsatzland heraus.

Im Laufe eines Einsatzes verändert sich der Kommunikationsbedarf der SEEWA hin zu einem symmetrischen Informationsfluss.

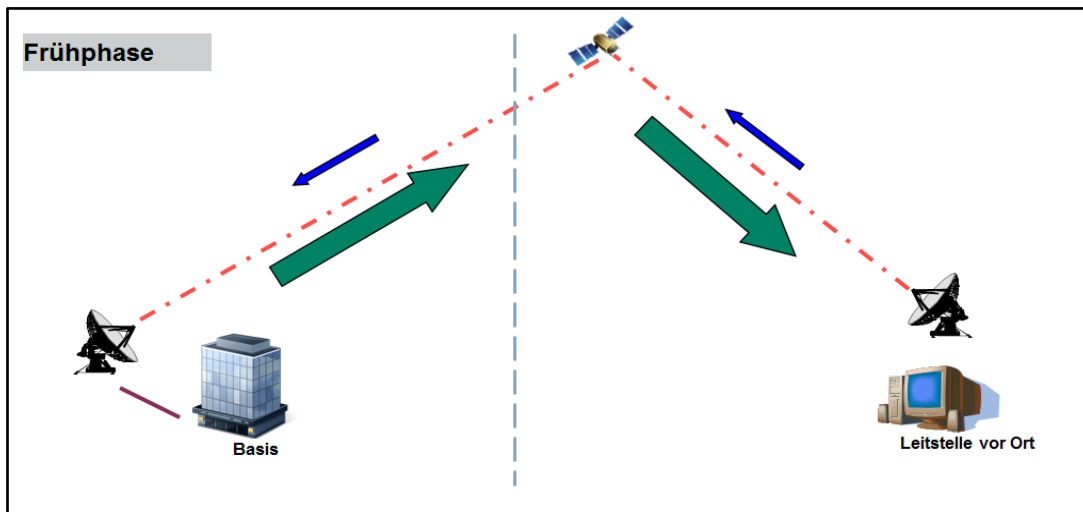


Abbildung 2: Asymmetrischer Kommunikationsfluss eines SEEWA-Einsatzes in der Frühphase

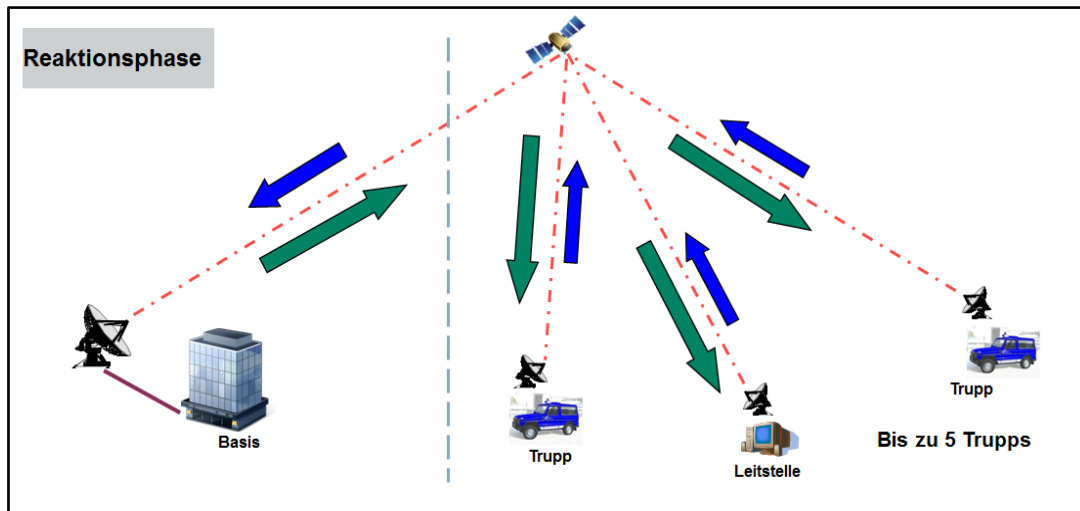


Abbildung 3: Symmetrischer Kommunikationsfluss eines SEEWA-Einsatzes in der Reaktionsphase

Wie bereits beschrieben handelt es sich bei der in Abbildung 3 dargestellten Phase, um die Reaktionsphase. In dieser sind bereits alle Einheiten mit der Erkundung des Einsatzgebietes bzw. mit der Instandsetzung von Brunnen oder Trinkwasseraufbereitung an den hierfür ausgewählten Orten tätig. Wie in Abbildung 3 dargestellt, findet in dieser Phase ein ausgeglichener Up- / Download von Daten und Informationen zwischen den jeweiligen Einheiten im Einsatzgebiet und der regionalen Leitstelle statt. Die Daten, die an die Basis im Heimatland übermittelt werden sollen, werden zuerst von den Trupps an die Leitstelle im Einsatzland gesendet, von dieser geprüft und anschließend weitergeleitet. Dies hat den Vorteil, dass nur die Information das Einsatzland verlassen, welche auch für die Basis relevant sind und so die vorhandene Bandbreite nicht überlastet wird.



## 2.1.2 Systemarchitektur

Auf Basis der Nutzeranforderungen wurde das Kommunikationssystem entworfen.

Aus den Anforderungen verbesserte Übertragungsverfahren für die Krisenkommunikation zu entwerfen, sowie Zugriffsverfahren auf Satelliten zu entwickeln mit erhöhter Robustheit im Mobilkanal, sowie optimalem Durchsatz auch in hybriden Netzwerk-Architekturen wurden für das MoSaKa System folgende wesentlichen Kernmerkmale definiert:

- Voll vernetzte Konnektivität  
ermöglicht Kommunikation auch ohne zentralem Hub, was die Ausfallsicherheit des Systems durch Vermeidung dieser zentralen Funktionalität erhöht. Zudem wird damit Kommunikation mit wesentlich kürzerer Verzögerung ermöglicht, da statt einer Kommunikation von Sendeterminal zum Hub und vom Hub zum Empfangsterminal (2 malige Verzögerung über die Satellitenstrecke) nun direkt vom Sende- zum Empfangsterminal nur noch einmal die Satellitenstrecke zu Buche schlägt. Allerdings tritt dieser Vorteil bei Antennen niedriger Güte nicht hervor. Ist das Link-Budget einer solchen Kommunikation zu gering muss dennoch über ein Terminal mit besserer Antenne (z.B. HG Terminal) eine Relay-Verbindung aufgebaut werden. Dieses Relay-Terminal kann, muss aber keine Hub-Funktionalität aufweisen.
- Dezentrales und dynamisches Ressourcen Management  
erspart auch für den Kontrollpfad die Kommunikation über ein zentrales Terminal (Hub) und ermöglicht somit eine schnellere Adaption der Datenübertragung auf die von den verschiedenen Applikationen und Terminals geforderten Datenraten
- SC-FDMA als PHY Wellenform  
Die Anwendung dieser aus dem Mobilfunk für die Mobilstation (Uplink) verwendeten Wellenform [15] ermöglicht zum einen sehr effizient die vernetzte Kommunikation der Terminals im gleichen Frequenzband, zum anderen eignet sie sich sehr gut um dynamisch die PHY Parameter der einzelnen Sendepfade an die erforderlichen Datendurchsätze und die erforderliche Übertragungsgüte anzupassen. Durch die enge Verwandtschaft zu OFDM ist die Wellenform gut geeignet gleichzeitiges Senden und Empfangen in einem Frequenzband durch internen Frequenzmultiplex zu ermöglichen. Durch den Einsatz von Piloten ist die Leistungsfähigkeit für niedrigen Signal-Rausch-Abstand und Mobilität (Doppler-Toleranz) skalierbar.

## 2.1.3 System-Entwurf Physical Layer

Im Themenfeld „AP3000 System-Entwurf“ behandelte Fraunhofer IIS-NUE folgende APs:

- AP3100: PHY Wellenform Forward Link (Physical Layer Wellenform für Forward Link)
- AP3200: PHY Wellenform Return Link Physical Layer Wellenform für Return Link
- AP3500: Spezifikation der (PHY) Wellenform Ausarbeitung der Spezifikation der Wellenform – Forward Link, Return Link

Zunächst erfolgte eine genauere Analyse der Vorschläge und Validierung der Konzepte aus AP2000 hinsichtlich der formulierten Anforderungen mittels Systemsimulation. Mit dem PDR wurde die endgültige Architektur festgelegt, sowie die Missionsparameter und die funktionalen Anforderungen an das Sende/Empfangsterminal. Anschließend erfolgte die detaillierte Spezifikation der Wellenform.

Abbildung 4 zeigt die Physikalische Schicht im Überblick. In der folgenden Beschreibung wird die Wellenform für die Sendeseite beschrieben.

Vom MAC Layer werden die Sendedaten als verschiedene QoS Ströme empfangen, gleichzeitig wird mit dem MAC Signalisierungsinformation ausgetauscht.

Die äußere Physikalische Schicht (OPL: Outer Physical Layer) befasst sich im Wesentlichen mit dem physikalischen Fehlerschutz. Die innere Physikalische Schicht (IPL: Inner Physical Layer) erzeugt den Frequenzmultiplex und die Modulation.

Das Ressourcen Management optimiert den Frequenzmultiplex derart, dass die seitens der Applikationen und höheren Schichten geforderten Datenraten soweit möglich mit optimaler Güte übertragen werden können. Dabei werden sowohl die Datenratenanforderungen, wie auch die Kanalbedingungen laufend berücksichtigt und daraus der Frequenzmultiplex adaptiert, weitere Details folgen in Kapitel 2.1.3.3.

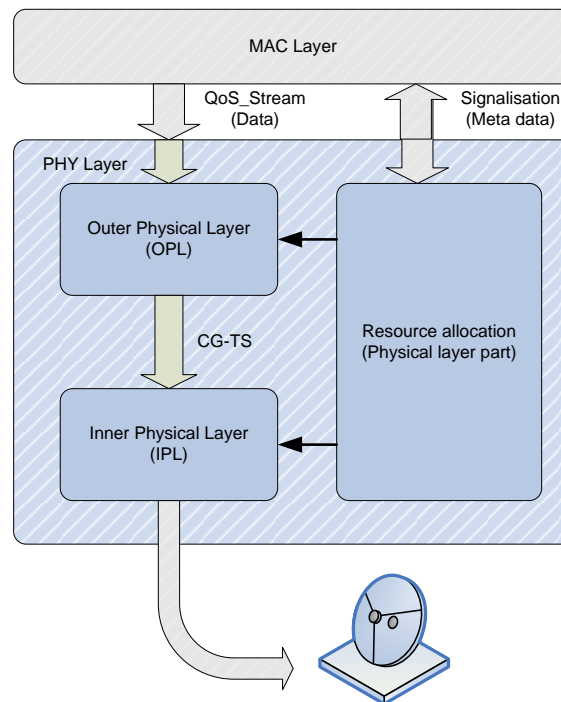


Abbildung 4: Übersicht Physikalische Schicht

### 2.1.3.1 PHY Wellenform - OPL

Die Kernkomponente des OPL ist die Kanalkodierung (FEC), wie in Abbildung 5 dargestellt.

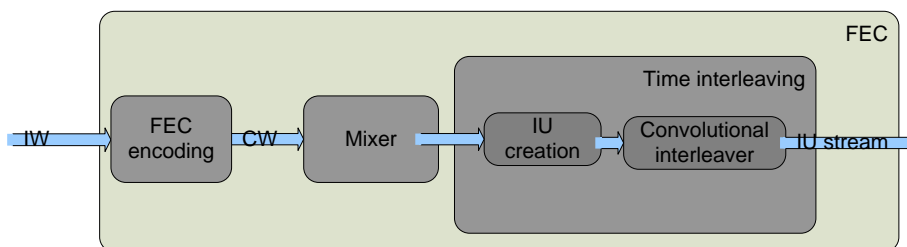


Abbildung 5: Blockschaltbild der Kanalkodierung für einen QoS Datenstrom

Vom MAC werden alle QoS Datenströme als einzelne Datenpakete über einen gemeinsamen Datenkanal empfangen. Die Pakete eines einzelnen QoS Stromes werden an eine Instanz der FEC übergeben. Im Sender sind so viele Instanzen der FEC notwendig, wie QoS Datenströme verarbeitet werden sollen.

### FEC

Hier wird die Redundanz zur späteren Fehlerkorrektur im Empfänger zu den Datenpaketen hinzugefügt. Dies erfolgt mittels verketteter Kodierung mit einem BCH als äußerem Fehlerschutz und einem Turbo-Code als innerem Fehlerschutz. Die Codewort-Längen eines QoS Stromes sind konstant und an die Größe der Datenpakete vom MAC angepasst. Die Coderate des BCH Codes ist fest an die Größe des Codewortes gekoppelt und steigt von 0.89 (Codewort Größe 42 Byte) bis 0.99 (Codewort Größe 1527 Byte), die Coderate des Turbocodes hingegen ist in insgesamt 10 Stufen zwischen 1/10 und 2/3 frei wählbar.

### Interleaver

Zur Erhöhung der Serviceverfügbarkeit ist ein leistungsfähiges Interleavingschema definiert. Zuerst arbeitet eine Block-Interleaver innerhalb eines Codewortes auf Bitebene, dann ein Faltungsinterleaver über größere Zeitabschnitte. Die Information eines Codewortes wird dazu in kleinere Pakete (sogenannte Interleaver Units, IU) aufgeteilt und verzögert, bzw. über einen einstellbaren größeren Zeitabschnitt verteilt ausgesendet. Im Empfänger wird invers die entsprechende zeitliche Verteilung rückgängig gemacht, d.h. die einzelnen Pakete eines Codewortes werden gesammelt, bevor das Codewort dem Dekoder zugeführt wird. Der besondere Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass ohne zusätzliche Hilfsinformation die Leistungsfähigkeit des Systems gesteigert wird. Gute und schlechte Kanalzustände werden im Empfänger damit zeitlich gemischt, so dass pro Codewort alle möglichen Kanalzustände relevant werden, liegt der resultierende Signal-Rausch-Abstand für das Codewort über der Dekodierschwelle, kann das Codewort fehlerfrei rekonstruiert werden. Ist die zeitliche Länge des Interleavers an die Zeitvarianz des Kanals angepasst, kann weitgehende Fehlerfreiheit erwartet werden. Es ist festzuhalten, dass die Verwendung eines Interleavers zwar ohne zusätzliche Redundanz auskommt, sich die Länge des Interleavers aber auf die Verzögerung der Datenübertragung addiert.

### Kanalgruppe

Bis zu 4 QoS Datenströme werden im Sender zu einer Kanalgruppe zusammengefasst (s. auch Kapitel 2.1.4.5). Dazu werden die Daten eines 250 ms Rahmens zusammen mit einem Nachrichtenkopf, der dem Empfänger die Zusammensetzung des Inhalts mitteilt, verpackt. Pro Kanalgruppe werden die QoS Ströme gebündelt, die an Terminals mit vergleichbaren Empfangsantennen gesendet werden. Damit ist es für ein Sendeterminal nötig, gleichzeitig mehrere Kanalgruppen abstrahlen zu können, falls es mit Terminals verschiedener Empfangsgüte kommunizieren möchte. Wie in Zusammenhang mit dem Ressourcenmanagement beschrieben ist, erfolgt die Zusammensetzung der Kanalgruppe dynamisch nach den Vorgaben des Ressourcenmanagements. Neben den reinen Datenübertragungen ist der Signalisierungskanal als eigene Kanalgruppe aufzufassen.

#### 2.1.3.2 PHY Wellenform - IPL

Abbildung 6 zeigt das Blockschaltbild des IPL. Als Eingang in den IPL dienen die Bitströme der einzelnen zu sendenden Kanalgruppen.

### Spreizung

In einem ersten Modul kann der Datenstrom gespreizt werden. Damit kann zum einen die Datenmenge erhöht werden, falls die kodierte Datenrate nicht ausreicht um die zur Verfügung

stehende DFT-Größe auszunutzen (Bandbreitenanpassung). Dies tritt v.a. bei sehr niedrigen Datenraten auf. Zum anderen kann mittels De-Spreizung im Empfänger eine Erhöhung des Signal-Rausch-Abstandes erreicht werden, was v.a. bei extrem schlechten Übertragungskanälen dennoch zu einer erfolgreichen Dekodierung führen kann.

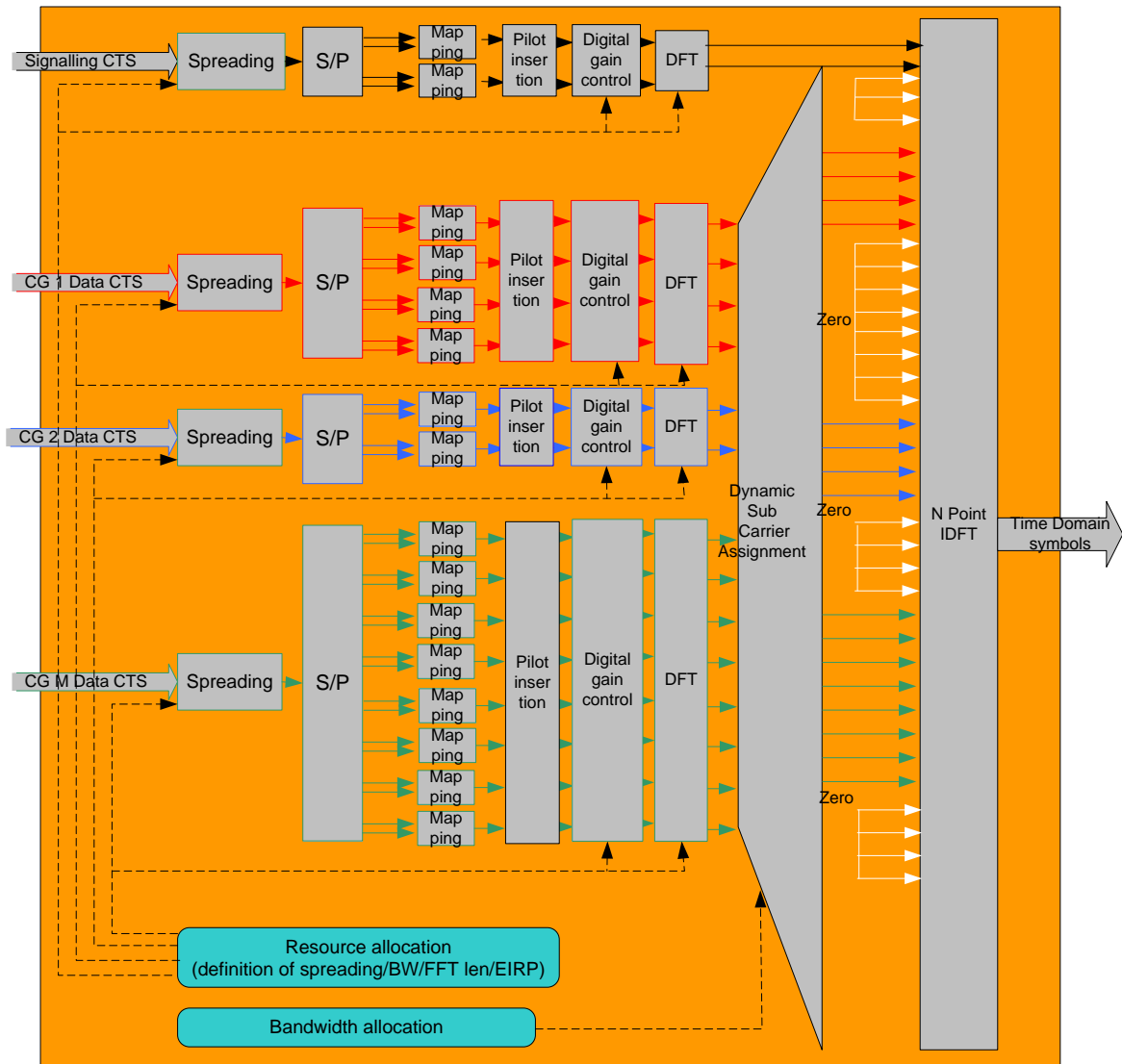


Abbildung 6: Blockschaltbild des IPL

### Mapping

Entsprechend der vorgegebenen Modulationsordnung werden aufeinanderfolgende Bits zu Modulationssymbolen (BPSK, QPSK oder 8-PSK) zusammengefasst.

### Einfügen von Piloten

Um im Empfänger die Kanalschätzung und Korrektur zu ermöglichen werden Pilotsymbole eingefügt. Jeweils das erste von 8 OFDM-Symbolen besteht aus Zeitbereichspiloten, welche hier nach dem Mapping eingefügt werden.

Zusätzlich werden noch Piloten im Frequenzbereich eingefügt. Dabei werden die ersten 7 Datensymbole eines 25 ms Datenabschnitts nach der DFT im Frequenzbereich als Piloten vorgese-

hen. Im Empfänger können diese dann für Zeit- und Frequenzsynchronisation verwendet werden.

### Amplitudenskalierung

Entsprechend der Sendeleistung die aufgrund des Ressourcenmanagements für die verschiedenen Kanalgruppen aufzuwenden ist, muss die jeweilige Leistung angepasst werden, noch bevor der Frequenzmultiplex mit der iFFT (im Bild als N-point iDFT angegeben) zusammengefasst wird.

### DFT

Mittels diskreter Fourier Transformation werden die einzelnen Kanalgruppen in den Spektralbereich transformiert. Die Blockgröße der DFT entspricht dabei der Anzahl der Träger, die die Kanalgruppe später im Gesamt Frequenzmultiplex einnehmen soll. In Anlehnung an später sinnvoll realisierbare Blockgrößen sind die DFT Längen in Vielfachen von 12 definiert.

### Inverse Fast Fourier Transformation (iFFT)

Gesteuert vom Ergebnis des Ressourcen Managements werden die Daten der Kanalgruppen blockweise in ein OFDM Spektrum einsortiert und in den Zeitbereich transformiert.

### Sendesignalerzeugung

Die OFDM Symbole am Ausgang der iFFT werden um ein Schutzintervall verlängert und ausgesendet. Jedes Terminal sendet seine Kanalgruppen, inklusive seines Anteils am Signalisierungskanal.

Das Gesamt-MoSaka-Signal entsteht dabei durch Überlagerung auf der Luftschnittstelle zum Satelliten. Um dies konstruktiv zu ermöglichen muss für jedes Terminal der Aussendezeitpunkt entsprechend seiner Signallaufzeit zum Satelliten gewählt und nachgeregelt werden, was bei der Terminalentwicklung zu beachten ist.

## 2.1.3.3 PHY Wellenform – Ressourcen Management

Das Ressourcen Management kann in drei Teilbereiche unterteilt werden:

1. **Ressourcen Anfragen (resource requests)**  
enthalten die Datenratenanfragen für verschiedene QoS Ströme der einzelnen Kanalgruppen und die aktuellen Kanaleigenschaften
2. **Ressourcen Berechnung (resource calculation)**  
errechnet mögliche Paare an Bandbreite und Sendeleistung (BW, EIRP) für die einzelnen Ressourcen Anfragen
3. **Ressourcen Verteilung (resource distribution)**  
Für jeden Sender werden die Paare (BW, EIRP) so optimiert, dass pro Kanalgruppe ein größtmöglicher Signal-Rausch-Abstand erreicht wird. Dabei müssen sowohl die notwendige Sendeleistung, als auch die benötigte Bandbreite im Rahmen der vorhandenen Grenzen liegen. Zusätzlich darf der Satellit durch die empfangene Signalleistung nicht übersteuert werden. Diese Aufgabe resultiert in einer mehrdimensionalen Optimierung. Falls die verfügbaren Ressourcen nicht ausreichen erfolgt über die Ressourcen-Kürzung (resource fitting) die Berechnung einer oberen Schranke für die geforderten Datenraten. Diese Schranken werden den höheren Schichten mitgeteilt, um diesen die Möglichkeit zu geben, die Anfragen für den aktuellen Zeitschlitz so zu verändern (reduzieren), dass die Ressourcen ausreichen.

Abbildung 7 veranschaulicht diese Schritte.

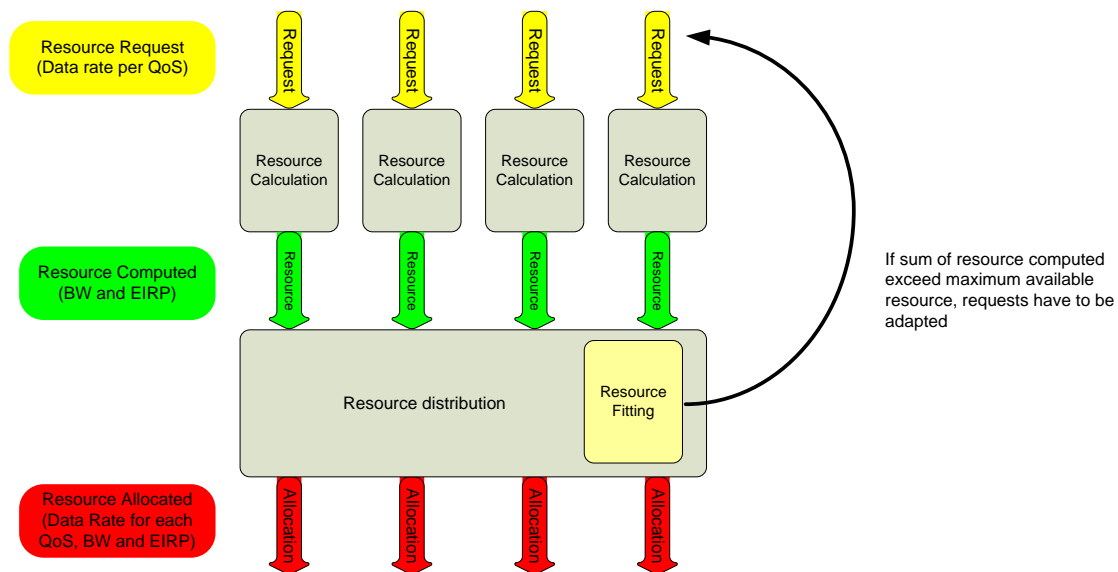


Abbildung 7: Prinzip des Ressourcen Managements

Auf die Details des Ressourcen-Managements soll hier nicht näher eingegangen werden. Wie bereits erwähnt ist das Ressourcen-Management dezentral verteilt. Da alle Ressourcen-Anfragen an alle Terminals verteilt werden<sup>1</sup>, ist jedes Terminal in der Lage mit einem deterministischen Algorithmus die Ressourcenverteilung des Gesamtsystems für das nächste Zeitintervall zu berechnen und für seinen eigenen Sendemultiplex anzuwenden. Aufgrund dieser Dezentralität kann im MoSaKa-System auf die Notwendigkeit einer zentralen Kontrollstation verzichtet werden. Darüber hinaus kann das Ressourcen-Management schneller auf Änderungen reagieren, da der Signalisierungspfad nur einmal über den Satelliten übertragen wird. Im Vergleich zu zentralen Ansätzen spart man sich eine Satellitenlaufzeit für die Signalisierung.

#### 2.1.3.4 PHY Wellenform – Veranschaulichung

In diesem Kapitel sollen zwei weitere Komponenten der MoSaKa PHY veranschaulicht werden.

##### SC-FDMA Wellenform

Abbildung 8 veranschaulicht die Besonderheiten der SC-FDMA Wellenform. Verschiedene Terminals senden Daten an andere Terminals, die Übertragungsgüten der einzelnen Verbindungen sind in Kanalgruppen eingeteilt. Im Spektralbereich sind die Verbindungen als Frequenzmultiplex zu verstehen. So wie sich das Frequenzband am Satelliteneingang zusammensetzt (Leistungsdichte über Frequenz), so wird der Multiplex auch von den Empfangsterminals gesehen. Je nach Empfangsantenne verschiebt sich nur der Rauschgrund, so dass ein Terminal mit guter Antenne einen deutlich besseren Signal-Rausch-Abstand hat, mehr Übertragungskanäle korrekt dekodiert und somit richtig empfängt.

<sup>1</sup> Dies gilt jedenfalls für die HG Terminals

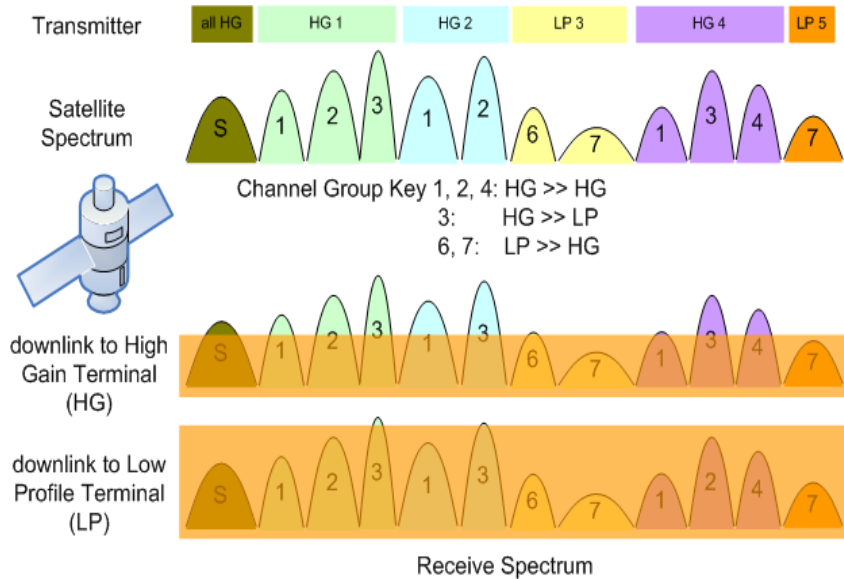


Abbildung 8: Veranschaulichung eines SC-FDMA Multiplexes bei Verwendung von Antennen verschiedener Güte

### Rahmenstruktur und Adaptivität

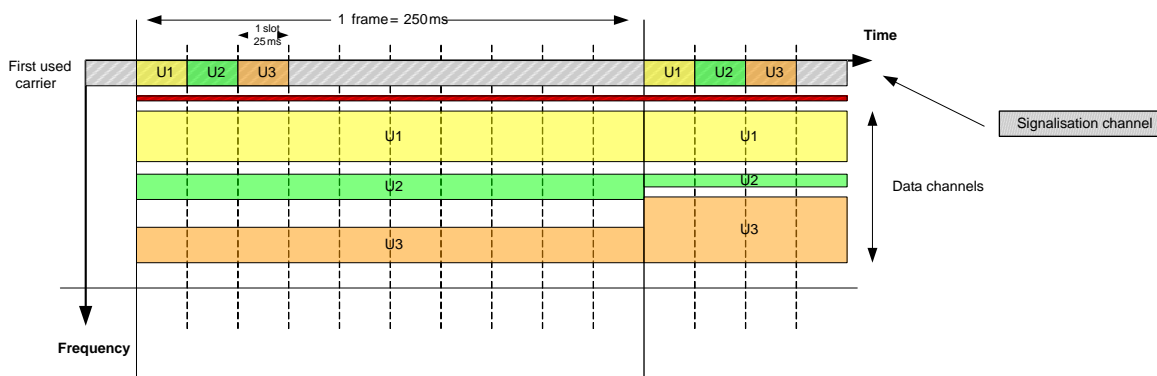


Abbildung 9: Adaptiver Frequenzmultiplex

Der MoSaKa-Signalmultiplex ist in Rahmen von 250 ms organisiert (s. Abbildung 9). Die untersten Nutzträger beinhalten den Signalisierungskanal, hier verteilen die beteiligten HG-Terminals im Zeitmultiplexverfahren ihre gesammelten Datenratenanforderungen an das Gesamtsystem. Im Beispiel sind drei HG-Terminals zu sehen, von denen jedes einen Frequenzblock sendet. Alle 250 ms kann eine Neuordnung der Frequenzressourcen erfolgen. Im Beispiel wird die Datenrate für Kanalgruppe U2 reduziert, während gleichzeitig die Datenrate für Kanalgruppe U3 erhöht wird. Es können Terminals, wie auch neue Kanalgruppen, in den Multiplex aufgenommen werden, oder aus ihm ausscheiden. Die gesamte Frequenzressource kann alle 250 ms innerhalb der zur Verfügung stehenden nutzbaren Träger neu aufgeteilt werden.

### 2.1.4 Terminal IDU

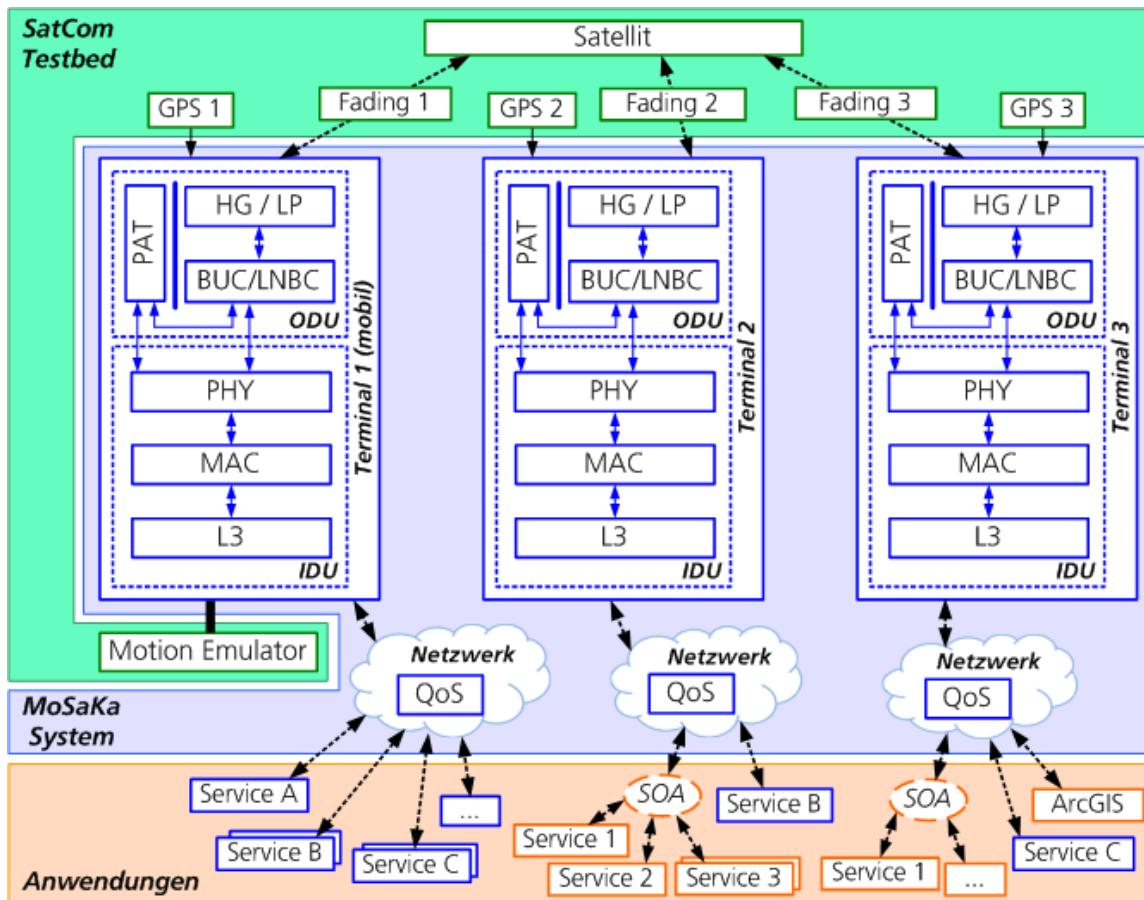


Abbildung 10: Überblick über das MoSaKa Demonstrationssetup

### 2.1.4.1 Hardware-Realisierung des Terminals (PHY-Layer)

Die in Abbildung 10 dargestellte IDU (Indoor-Unit) als Teil des Terminals wurde auf 3 Geräte verteilt, entsprechend der Schichten haben die beteiligten Partner ein Gerät pro Schicht und Terminal beigelegt. Im vorliegenden Kapitel wird der PHY-Teil der IDU beschrieben, welcher weiter als DT4430 bezeichnet wird.

Im Themenfeld „AP4000 Terminal IDU“ behandelte Fraunhofer IIS-NUE folgende APs:

- AP4100: Empfangszweig des Terminals
- AP4200: Sendezweig des Terminals
- AP4500: Integration und Test der Protokolle

Ziel des Arbeitspakets war der Aufbau der Hardware für die Terminal IDU, die Implementierung der benötigten Soft- und Firmware Komponenten für die Signalverarbeitung, Steuerung und Überwachung des Gerätes, wie auch deren Integration in die Hardware. Zusätzlich waren die Integration und der Test der Protokolle für die Interaktion mit den benachbarten Schichten (Antenne und MAC) im Arbeitspaket enthalten.

Basierend auf der Wellenform Spezifikation aus AP 3500 wurde in einer ersten Phase der Funktionsumfang für das MoSaKa-Terminal definiert. Das Ziel des Projektes war die Demonstration



von Kernelementen des MoSaKa-Systems. Unter Berücksichtigung des verfügbaren Projektvolumens war eine vollständige IDU-Entwicklung z.B. als Produkt-Prototyp nicht geplant. Mit verschiedenen Ansätzen wurde dem Projektauftrag größtmöglich Rechnung getragen, um eine ausreichende Funktionalität zu gewährleisten.

Zu diesen Ansätzen zählten:

- Verwendung der von Fraunhofer IIS entwickelten universellen Demonstrator-Plattform (DT4000). Sie besteht aus einem 19" Gehäuse mit 4 HE. Enthalten ist ein Industrie-PC Mainboard mit Betriebssystem Linux und flexibel adaptierbaren Hardware-Erweiterungen (FPGA, A/D und D/A Baugruppen) und Nutzerschnittstellen, sowie umfangreichen Bibliotheken für Ablaufsteuerung und Fernwartung. Diese Plattform wurde als Basis für die Implementierung des PHY-Layers verwendet.
- Partitionierung sehr nahe an die in Abbildung 10 dargestellte Architektur angelehnt
- Partitionierung der Funktionen in Hard- und Software angepasst an die Gegebenheiten der Plattform
- Implementierungen aufbauend auf geeigneten Hard- und Firmware Komponenten um Entwicklungsaufwand zu reduzieren
- Fokus auf den Datenpfad mit den wesentlichen Besonderheiten der MoSaKa Wellenform (SC-FDMA, dezentrales Ressourcenmanagement)
- GPS-basierte Terminal-Synchronisation (Zeit- und Frequenz)

Abbildung 11 zeigt die Partitionierung der PHY-Signalverarbeitung auf der DT4000 Plattform. Der Sendepfad ist in der unteren Hälfte des Blockschaltbilds platziert, der Empfangspfad in der oberen Hälfte. Insgesamt teilt sich die Verarbeitung für ein kodiertes SC-FDMA-System in die übergeordneten Module Outer-Physical-Layer (OPL) und Inner-Physical-Layer (IPL). Der OPL ist zusammen mit dem Interface zum MAC-Layer beinahe vollständig in PC Software implementiert. Die Signalverarbeitung des IPL hingegen ist größtenteils in FPGA Firmware implementiert. Auf der Sendeseite sind sowohl die Single Carrier (SC) Teile des Modulators, wie auch der (O)FDM Modulator auf dem UFTG Board (Haupt-FPGA Board der DT4000 Plattform, s. Abbildung 11 und Tabelle 3) platziert. Die Erzeugung des analogen Ausgangssignals findet in weiteren Einbauplatten statt. Nach Digital/Analog-Wandlung im DAC besteht die Möglichkeit ein Ausgangssignal im Basisband (-20 MHz ... 20 MHz), auf IF (z.B. 140 MHz) oder im S-Band (2170 – 2200 MHz) zu erzeugen. Bei direkter Ankopplung des Ausgangs an die Antenne (BUC) kann über die Ausgangsleistung des PHY direkt die Sendeleistung des Terminals eingestellt werden. Hierfür stellt der PHY Ausgangsleistungen von -60 - -20 dBm zur Verfügung.

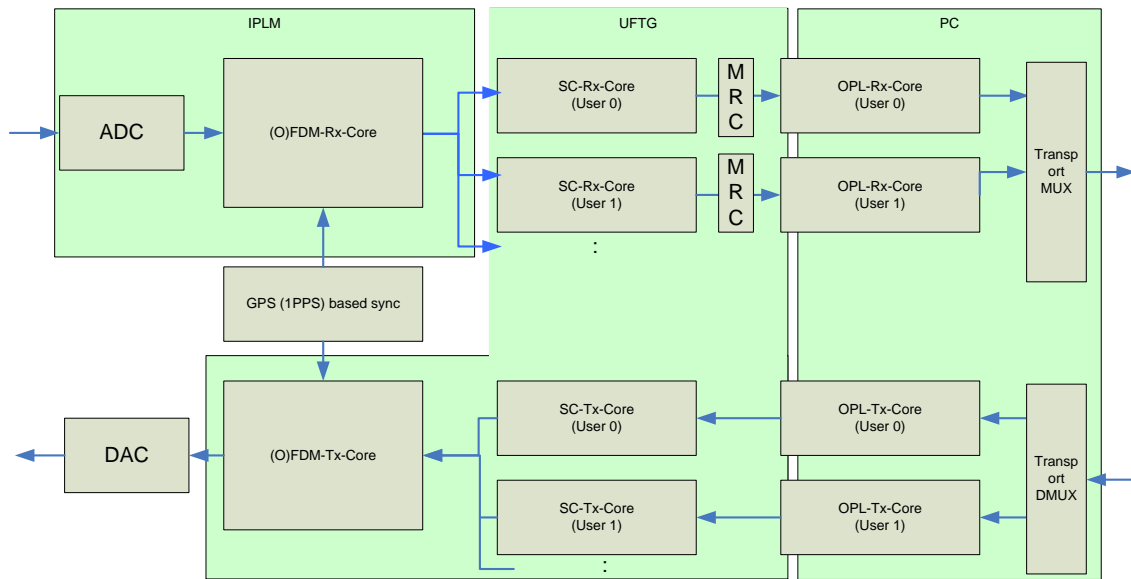


Abbildung 11: Partitionierung der PHY Signalverarbeitung auf die DT4000 Plattform

Auf der Empfängerseite sind IF-tuner, ADC und die (O)FDM-Demodulation in einer eigenen Aufsteckplatine integriert. Über physikalische Stapelung dieser Aufsteckplatinen lässt sich eine Parallelisierung der Verarbeitung erreichen, wie sie für den Anschluss an die LP Antenne benötigt wird. Der Anschluss der verschiedenen Paneele der LP-Antenne ist aus Sicht der physikalischen Schicht gleichbedeutend einer Antennendiversität. Pro Diversitätspfad wird ein Demodulatorzweig benötigt. Am Ausgang der Demodulatoren kann mit konstruktiver Überlagerung (durch „Maximum Ratio Combining“(MRC)) die Gesamtsignalgüte, bzw. Fehlerperformance im Vergleich zu einem Empfangszweig verbessert werden.

Während die OFDM-Demodulation auf einem eignen FPGA-Board realisiert ist (IPLM Board in Abbildung 11, s. auch Tabelle 3), wird die TDM-Nachverarbeitung der einzelnen Nutzerkanäle im FPGA der UFTG Hauptplatine durchgeführt. Im Anschluss werden die verschiedenen Kanäle gebündelt und der SW übergeben. Dort erfolgt dann die OPL-Verarbeitung, welche im Wesentlichen aus Demultiplexing, Deinterleaving und Fehlerkorrektur durch die FEC besteht. Die resultierenden Datenpakete werden dann den höheren Schichten zur Verfügung gestellt.

Neben dem Datenpfad ist auch der Teil des Radio-Ressourcen-Managements, welcher sich mit der Optimierung und Zuteilung des physikalischen Kanals befasst, in Software realisiert.



Abbildung 12: Vorderansicht des DT4430 MoSaKa Transceiver PHY

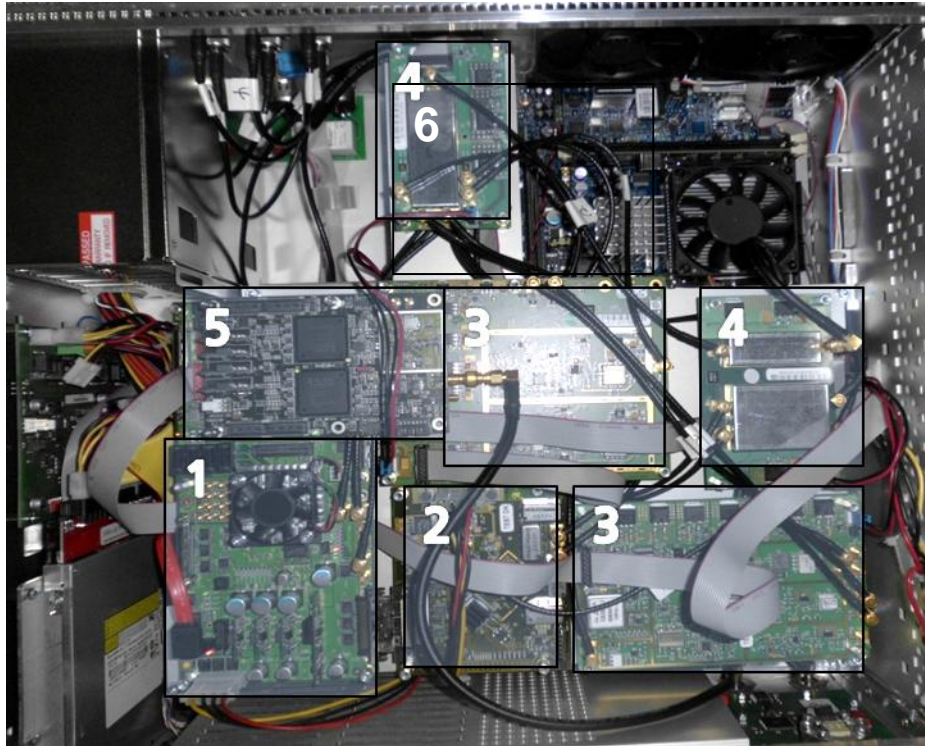


Abbildung 13: Blick in das DT4430 Gehäuse

Die markierten Komponenten des DT4430 sind in folgender Tabelle näher spezifiziert.

Tabelle 3: Kern-Merkmale der HW Komponenten des DT4430

Nr.	Name	Kern-Merkmale
1	UFTG Board	FPGA Board mit Xilinx Virtex 5 FX100t FPGA, SATA Anbindung an PC, RocketIO und weitere Schnittstellen
2	DAC Board	Digital-Analog-Konverter, verarbeitet digitale I/Q Signale mit 100 MHz Takt
3	Takt + LO Board	interne 10 MHz Referenz, sowie Erzeugung abgeleiteter Frequenzen
4	Mischer + Verstärker	Hochmischen des I/Q Signals aus dem DAC, Signalverstärkung
5	IPLM Board (Tuner/ADC/FPGA)	Aufsteckplatine mit 2 Xilinx Spartan 3 S5000 FPGAs, L-/S-Band Tuner mit bis zu 10 MHz Signalbandbreite und 2-kanaligem ADC
6	PC Mainboard	Industrie PC Mainboard mit IntelCore2 Duo T7400, 2,16 GHz Prozessor

#### 2.1.4.2 Sendezweig des Terminals (PHY-Layer)

Im Folgenden werden die einzelnen Verarbeitungsschritte und Module des Sendezweiges der physikalischen Schicht eingehender beleuchtet. In Abbildung 14 ist hierzu ein Blockschaltbild der Senderseite dargestellt.

### Transport Layer Demux

Der Dateneingang vom MAC-Layer erfolgt mittels verschiedener Nachrichten, welche als UDP Pakete über Ethernet empfangen werden. Es sind einerseits Daten und andererseits Kontroll- bzw. Signalisierungsnachrichten zu unterscheiden. Mittels der Signalisierungsnachrichten wird zum einen der PHY direkt gesteuert (z.B. die Zusammenstellung des Übertragungsmultiplexes, die genaue Parametrisierung des Fehlerschutzes, u.a.), bzw. es werden Hilfsinformationen bereitgestellt, die das Ressourcen Management benötigt. Die entsprechenden Informationen werden aus den UDP-Paketen extrahiert und den folgenden Verarbeitungsmodulen zur Verfügung gestellt. Datenpakete werden an die entsprechenden Pfade des OPL weitergereicht.

### FEC

Hier wird die Redundanz zur späteren Fehlerkorrektur im Empfänger zu den Datenpaketen hinzugefügt. Im Falle von nicht ausreichendem Dateneingang der MAC-Schicht werden Füllpakete eingefügt und kodiert, um die kontinuierliche Signalverarbeitung aufrechtzuerhalten.

### Kanalinterleaver

Hier wird die sendeseitige zeitliche Datenverteilung durchgeführt. Die enkodierten Daten werden über einen Speicher geführt und mit mehr oder weniger Verzögerung wieder ausgelesen.

### QoS und Kanalgruppen Multiplexer

Gesteuert von den Informationen aus den Signalisierungsnachrichten, sowie des Ressourcen Managements werden die einzelnen QoS Ströme aus den Enkodern zuerst zu einzelnen Kanalgruppen zusammengefasst. Danach werden die einzelnen Kanalgruppen zum gesamten MoSaKa Multiplex zusammengefügt, welcher dann an den IPL weitergeleitet wird.

### Modulation

Beinhaltet die einzelnen Verarbeitungsschritte des IPL. Diese sind Spreizung, Bit-zu-Symbol Zuordnung (Mapping), Zeit-Frequenztransformation des Stroms der einzelnen Kanalgruppen mittels diskreter Fourier Transformation (DFT), gefolgt von Frequenz-Zeit Transformation der gesamten Kanalgruppen mittels einer inversen Fast Fourier Transformation (iFFT). Zusätzlich werden entsprechend der Wellenform Zeit- und Frequenzbereichspiloten in den Datenstrom eingefügt. Nach der iFFT erfolgen die Anfügung des Schutzintervalls der OFDM-Wellenform sowie die Überabtastung, um das komplexe Zeitsignal anschließend dem DAC bereitzustellen.

### Kontrolle und Ressourcen-Management

Steuert die Verarbeitungsmodule, dabei sind nicht nur statische Konfigurationen zu beachten, sondern auch die Änderungen der Parametrisierung sind zeitrichtig an die Verarbeitung weiterzuleiten.

### Ausspielzeit-Synchronisation

Die Ausspielzeit-Synchronisation ist ein Kernelement des Sendezweiges. Eine Anforderung der SC-FDMA-Wellenform ist, dass die einzelnen Frequenzkomponenten (Nutzer-Signale), die von den verschiedenen Terminals gesendet werden zeitlich (und auch frequenzrichtig) synchron zueinander sind. Der Satellit dient hierzu als Bezugssystem. Die Synchronisation erfolgt mittels GPS, wodurch jedes Terminal sowohl die eigene, wie auch die Satellitenposition kennt. Jedes Terminal steuert seinen Ausspielzeitpunkt so, dass das Sendesignal einer gewissen Zeitmarke (z.B. Sekunde) am Satelliten zu genau dieser Zeitmarke eintrifft. Somit erfolgt die Überlagerung der verschiedenen Terminals am Satelliten zeitsynchron und ohne dass sich störende Kollisionen ergeben. Für den MoSaKa-Demonstrator wird dazu aus einem GPS-Empfänger, der für eine MoSaKa Applikation als vorhanden angenommen wird, sowohl die Positionsinformation, als auch der Puls-pro-Sekunde (PPS) benötigt. Kleinere Ungenauigkeiten der Zeitsynchronisation können

durch das vorhandene OFDM-Schutzintervalls toleriert werden, der maximale Fehler sollte dabei deutlich unterhalb der Länge des Schutzintervalls liegen.

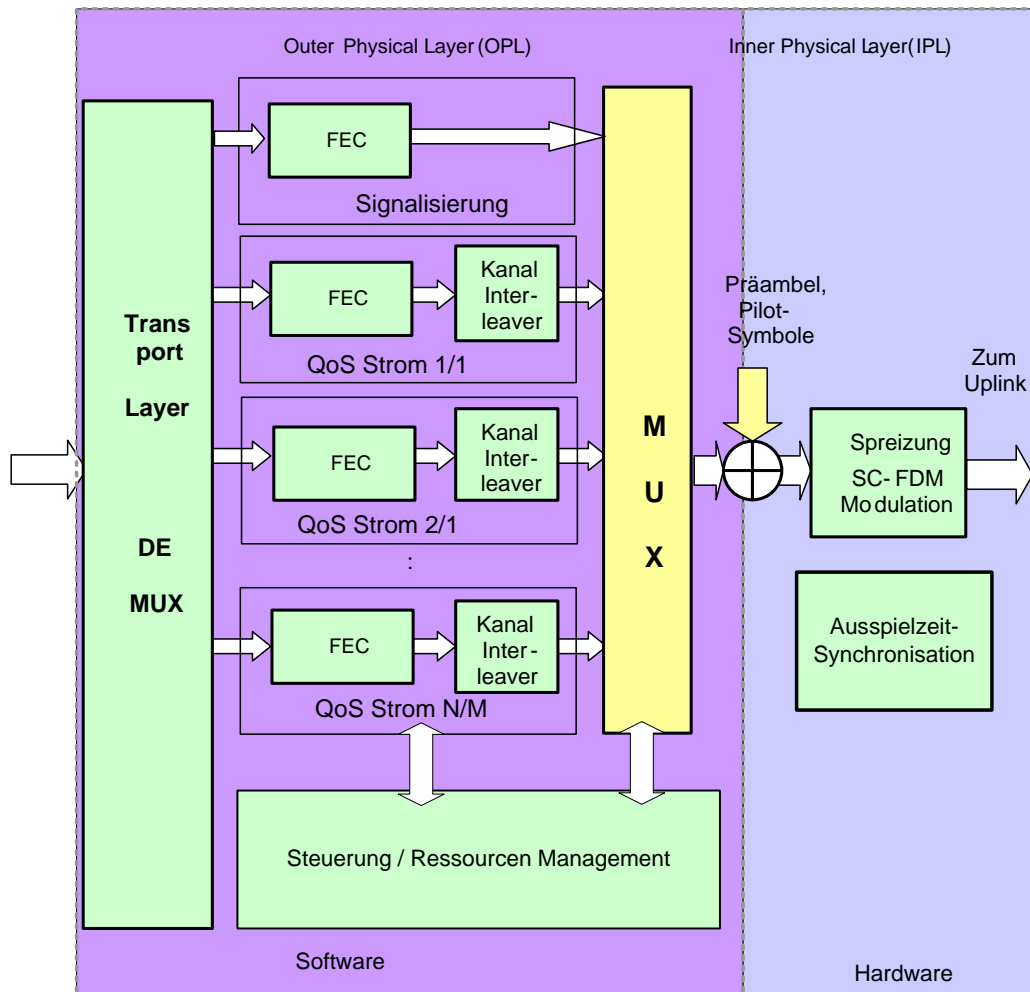


Abbildung 14: Blockschaltbild der Sendeseite

### 2.1.4.3 Steuerung und Überwachung

Die übergeordnete Steuerung und Überwachung des PHY-Terminals (DT4430) kann lokal am Gerät selbst sowie ferngesteuert erfolgen. Es ist ein Satz von mehreren GUI-Masken implementiert, die sich mit der Steuerung/Überwachung von zentralen Funktionen befassen, bzw. spezialisiert in einzelne wichtige Funktionsmodule blicken. Im Folgenden sind einige dieser Masken grob erläutert.

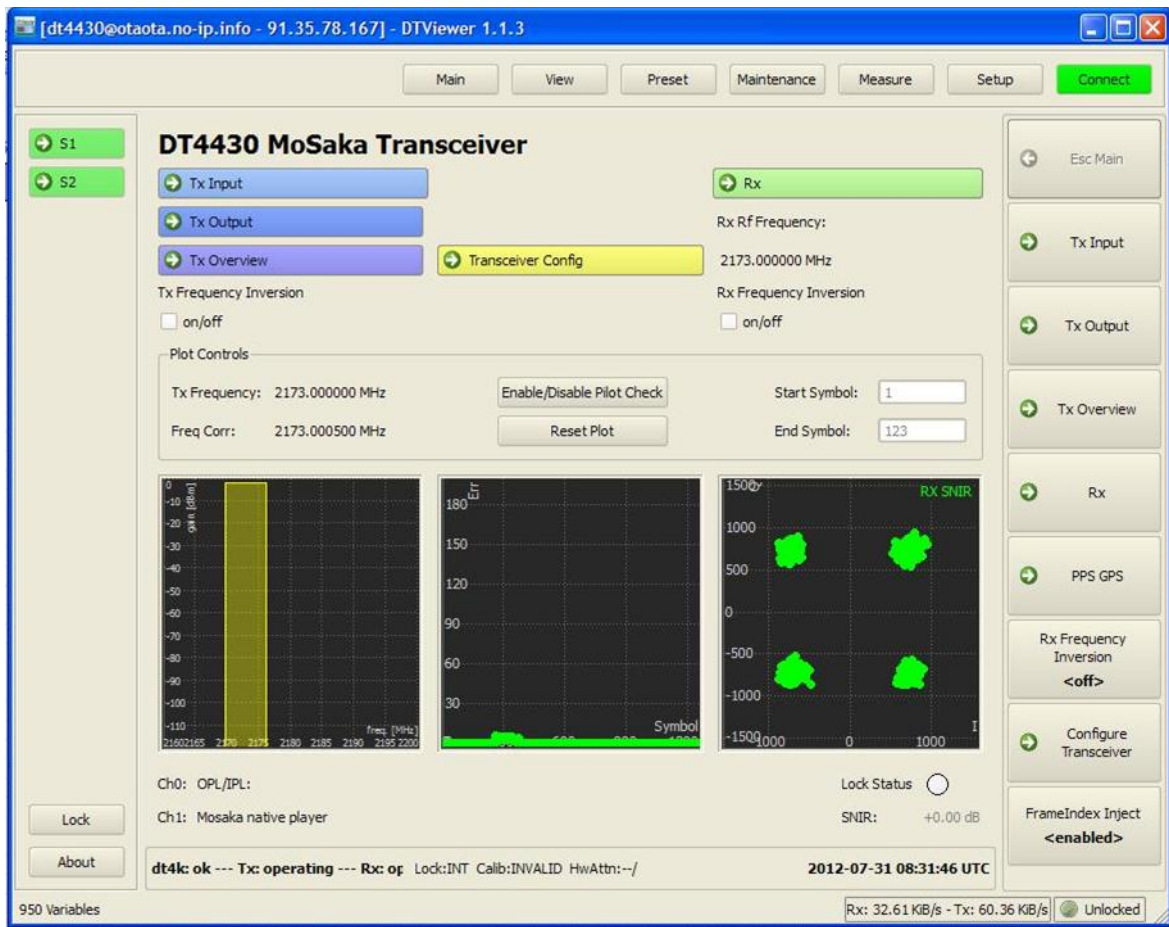


Abbildung 15: DT4430 MoSaKa Transceiver – GUI Einstiegseite

### GUI Einstiegseite

Zwei wesentliche Komponenten sind auf der Einstiegseite angebracht (s. Abbildung 15). Zum einen erlauben verschiedene Schalter (angebracht im oberen Drittel, sowie auf der linken und rechten Seite) ein Verzweigen in die Unteransichten. Zum anderen gibt es drei Graphiken, die den aktuellen Zustand des Transceivers wiedergeben. In Abbildung 15 ist links die aktuelle Zwischenfrequenz der Empfangsseite dargestellt. In der Mitte wird der mittlere Kanalfehlerverlauf pro 250 ms Rahmen laufend aktuell gehalten. Auf der rechten Seite wird das empfangsseitige I/Q Konstellationsdiagramm eines ausgewählten Nutzers visualisiert.

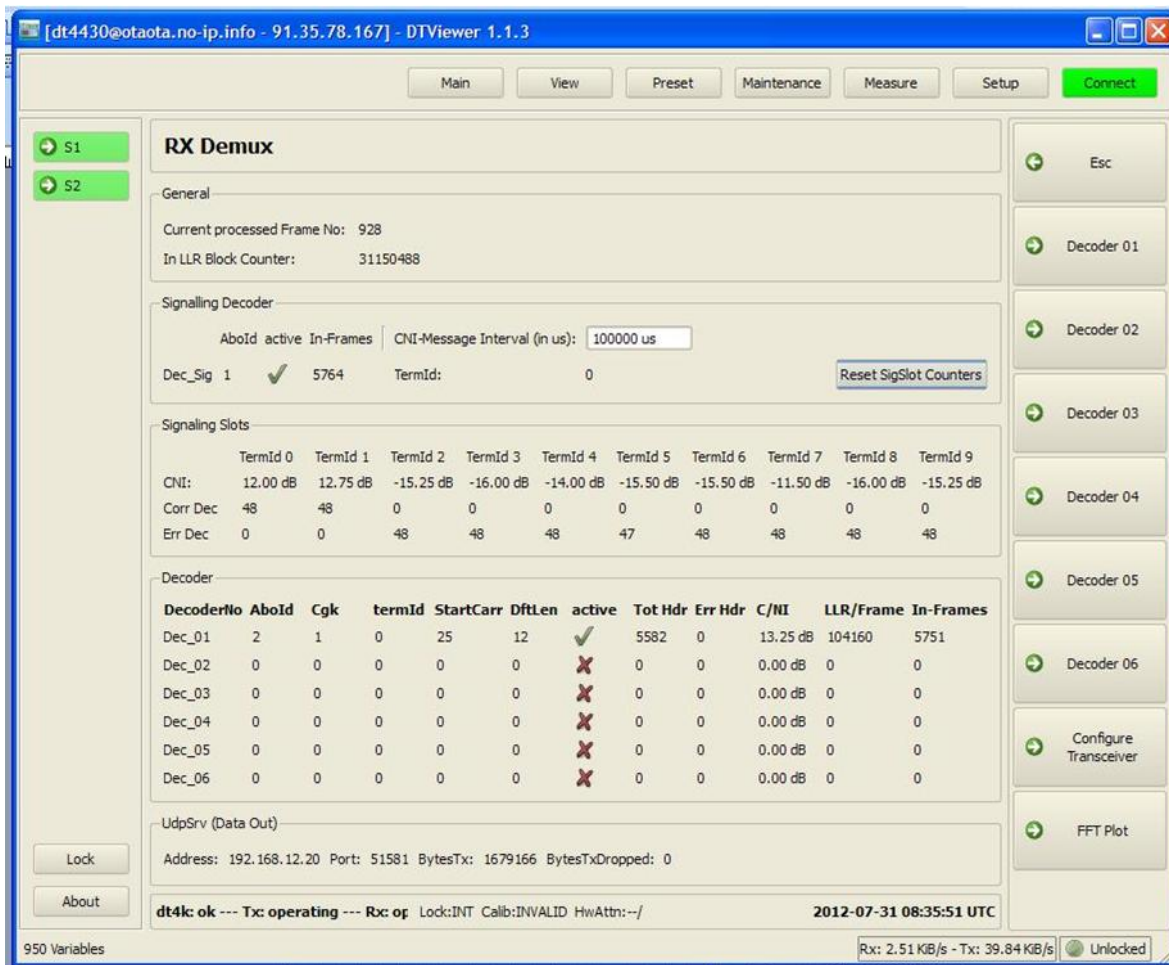


Abbildung 16: DT4430 MoSaKa Transceiver – Rx Demux/Dekoder Überblicksseite

### Rx Demux

Abbildung 16 zeigt die zentrale Übersichtsseite der empfangsseitigen Verarbeitung. Die Statusinformationen im Einzelnen sind die aktuelle Zeit (angegeben in aktuell verarbeiteter Rahmennummer) und die Anzahl der verarbeiteten LLRs pro Rahmen. Der Signalisierungs-Dekoder zeigt die Signal-Rausch-Abstände, mit dem die einzelnen HG Terminals im Signalisierungskanal (Dekoder 0) empfangen werden, sowie die Korrekturfähigkeit des Dekoders. Die Statusinformationen der Dekoder 1 bis 6 zeigen im Detail die Zuordnung (Kanalgruppe, QoS Nummer), Aktivität und Zustände der einzelnen Dekoder.

Auf der rechten Seite lässt sich über die angegebenen Schalter detaillierter in den Status der einzelnen Dekoder eintauchen.

### Fernsteuerung

Zur Fernsteuerung des DT4430 lassen sich alle diese Masken auf einen zentralen Steuerrechner ziehen. Seitens Bedienung und Funktionalität ist damit die vollständige Steuerung, ohne Einschränkungen im Vergleich zur direkten Bedienung am Gerät, möglich.

### 2.1.4.4 Empfangszweig des Terminals (PHY-Layer)

Die Beschreibung der einzelnen Verarbeitungsschritte und Module des Empfangszweiges orientiert sich am Blockschaltbild in Abbildung 17.

#### RF Tuner

Mit Hilfe eines kommerziellen RF Tuners wird das IF Signal (z.B. L-Band) am Ausgang der Antenne verstärkt und auf eine niedrige Zwischenfrequenz gemischt. Durch den ADC wird das reelle Tuner-Ausgangssignal in die digitale Basisbandverarbeitung geführt.

#### (O)FDM Demodulator

Das Blockschaltbild des OFDM-Demodulators ist in Abbildung 18 dargestellt. Das reelle ADC Signal wird zuerst mittels digitalem Frontend (DIGFE) und I/Q Generierung ins komplexe Basisband gemischt. Die Mischerfrequenz setzt sich aus der nominalen niedrigen IF-Frequenz und einem Korrekturwert aus der feinen Frequenzsynchronisation zusammen. Dieser wird aus der Phasenverschiebung innerhalb der OFDM-Symbol-Synchronisation abgeleitet und über ein Glättungsfilter an die Frequenzkorrekturstelle zurückgeführt. Das frequenzkorrigierte Basisbandsignal wird durch Anpassung der Abtastfrequenz (Interpolation und Tiefpassfilterung) auf die erforderliche Rate gebracht. Veränderungen der ADC-Taktrate, bzw. Änderungen der Signallaufzeit führen zu Verschiebungen der idealen Position des FFT-Fensters. Diese Verschiebung ist nicht gewünscht und wird durch Nachregelung der Signalinterpolation behoben, die Genauigkeit dieser Regelung wird durch das PPS Signal des GPS Empfängers unterstützt.

Zur optimalen Signalaussteuerung wird das Signal über eine AGC im Pegel normiert. Die Position des FFT-Fensters wird durch die OFDM-Symbol-Synchronisation durch Korrelation des OFDM-Schutzintervalls bestimmt. Nachdem die Position der einzelnen OFDM-Symbole bestimmt ist, werden die einzelnen Symbole unter Nutzung der FFT in den Spektralbereich transformiert. Am Ausgang des OFDM-Demodulators sorgt die Rahmensynchronisation mit Hilfe des PPS Signals dafür, dass aus einzelnen OFDM-Symbolen der MoSaKa-Zeitmultiplex bestimmt wird. Für die weitere Verarbeitung wird der Rahmenbeginn im Datenstrom markiert.

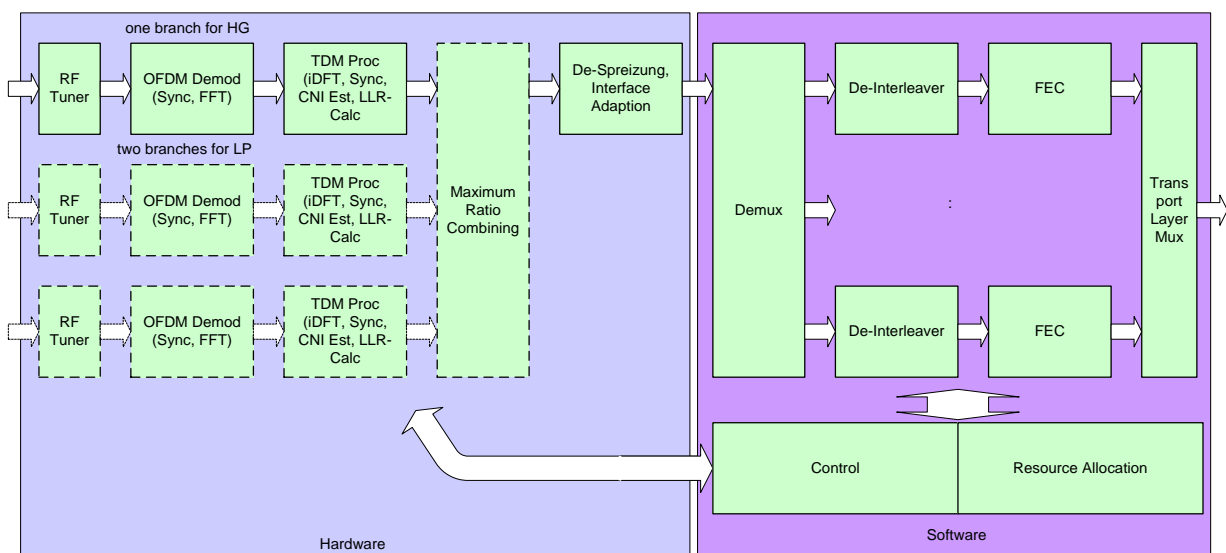


Abbildung 17: Blockschaltbild der Empfangsseite



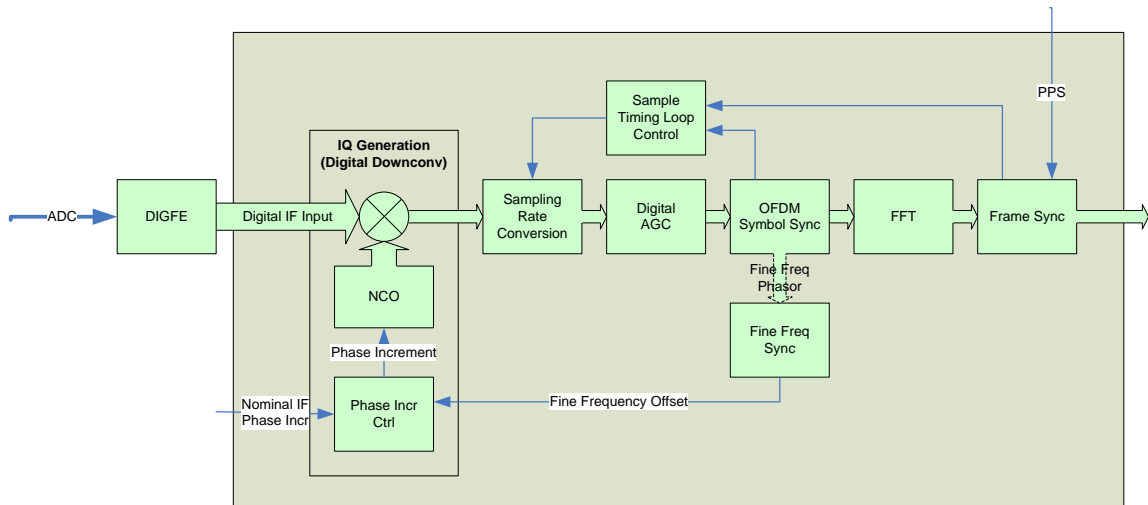


Abbildung 18: Blockschaltbild des (O)FDM-Demodulators

### TDM-Verarbeitung

In der weiteren Verarbeitung werden die einzelnen Nutzer (Kanalgruppen) parallel verarbeitet. Am Eingang (s. Abbildung 19) werden die OFDM Symbole im Spektralbereich über einen Demultiplexer auf die verschiedenen Verarbeitungspfade aufgeteilt. Die Besonderheit liegt darin, dass Pfade, die für das Empfangsterminal nicht relevant sind, nicht weiter bearbeitet, also auf keinen Pfad gegeben werden müssen.

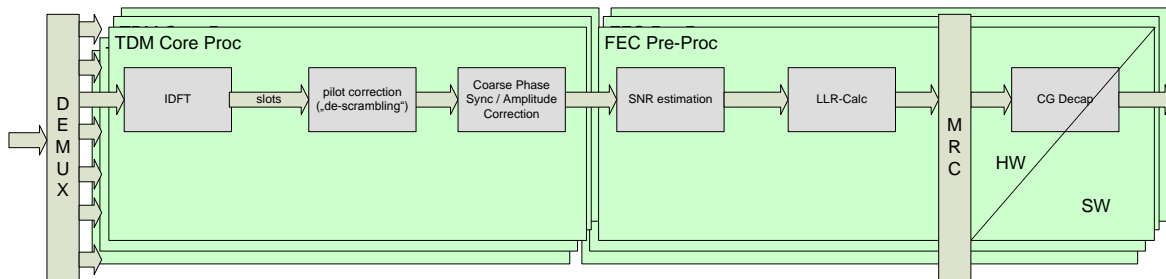


Abbildung 19: Blockschaltbild der TDM Verarbeitung (parallele Nutzer)

Das Teilspektrum des betrachteten Nutzers wird über eine inverse diskrete Fourier Transformation (iDFT) mit der Blockgröße entsprechend der benutzten Anzahl von Spektrallinien wieder in den Zeitbereich transformiert. Danach erfolgt die Korrektur der Zeitbereichspilotsymbole, d.h. die bekannte Pilotinformation wird entfernt und alle Pilotsymbole werden auf eine Norm-Konstellation gebracht. Dies dient dazu, die nachfolgende Pilotverarbeitung zu vereinfachen. Neben der Bearbeitung der Zeitbereichspiloten werden die Symbole, die Frequenzbereichspiloten entsprechen, an dieser Stelle entfernt. Sie werden für die weitere Verarbeitung nicht mehr benötigt.

Der wichtigste Schritt der nachfolgenden Verarbeitung besteht in der Korrektur verbleibender Amplituden- und Phasenfehler. Damit ist die Synchronisationsaufgabe abgeschlossen. Zum Abschluss der Demodulation wird das Signal-Rausch-Verhältnis aus den Zeitbereichspiloten berechnet. Es wird benötigt, um in der LLR (Log-Likelihood-Ratio) Berechnung aus den Konstellationspunkten die korrekten Wahrscheinlichkeiten, wie sie für die spätere Fehlerkorrektur im OPL be-

nötigt werden (Soft-Decision), zu bestimmen. Im Falle von Antennendiversität kann über das MRC-Modul der Datenstrom der verschiedenen Antennenpfade konstruktiv überlagert, d.h. addiert, werden. Im Anschluss daran wird noch eine vorhandene Spreizung aufgehoben, bevor der Datenstrom verpackt und mit den Ausgängen der parallelen Signalpfade gemultiplext in die Software zur OPL-Verarbeitung geführt wird.

### OPL-Verarbeitung

Der Eingangsdatenstrom wird zunächst nach Kanalgruppen getrennt, aus jeder Kanalgruppe werden dann die enthaltenen QoS-Ströme extrahiert. Die Weiterverarbeitung erfolgt parallel für alle QoS-Ströme. Jeder Strom wird über den entsprechenden empfangsseitigen Interleaver geführt und anschließend dekodiert. Dies erfolgt entsprechend der der sendeseitigen verketteten Kodierung zweistufig. Zuerst erfolgt die Turbo-Dekodierung des inneren Fehlerschutzes und anschließend die äußere BCH-Dekodierung. Korrekt dekodierte Codeworte werden in UDP-Pakete verpackt und über Ethernet an den MAC-Layer gesendet.

### Kontrollmodul

Neben dem Datenpfad sind auch auf der Empfängerseite Module zur Steuerung und Überwachung vorhanden. Das zeitrichtige Konfigurieren der Verarbeitungsmodule ist hier ebenso notwendig wie im Sender. Die erforderlichen Steuerinformationen hierzu können aus den im Datenstrom eingefügten Hilfsinformationsfeldern entnommen werden.

### Ressourcenmanagement

Die tatsächliche, aktuelle Verteilung der physikalischen Ressourcen wird in diesem Modul durchgeführt. Aus den dekodierten Signalisierungs-Datenpaketen extrahiert der MAC die Datenratenanforderungen der verschiedenen Terminals, gruppiert in QoS-Ströme. Unter Kenntnis der verschiedenen Ausbreitungspfade (Kanaldämpfung) und möglichen Sendeleistungen der einzelnen Terminals berechnet jedes Terminal für sich die gesamte Ressourcenverteilung des Systems und wendet dieses Ergebnis für seine Sendeseite an (wie schon in Kapitel 2.1.3.3. beschrieben).

## 2.1.4.5 Der LLC/MAC-Layer

### Ressourcenkontrolle in Schicht 2

Eines der Hauptmerkmale des MoSaKa-Systems besteht in der verteilten und symmetrischen Ressourcenkontrolle. Das bedeutet, dass es keine zentrale Komponente im System gibt, die die Kontrollfunktionen ausübt, sondern die Kontrolle wird von allen Terminals gemeinsam durchgeführt. Da auch keines der Terminals eine besondere Rolle einnimmt, kann man diese Methode des Managements auch als symmetrisch bezeichnen.

Das Ressourcenmanagement beruht darauf, dass alle Terminals periodisch Informationen über die von ihnen benötigten Ressourcen und die Kanalbedingungen austauschen. Dadurch wird dafür gesorgt, dass alle Terminals dieselben Informationen zur Verfügung haben. Ein auf allen Terminals einheitlicher Algorithmus sorgt dann dafür, dass auf allen Terminals die Ressourcen gleich allokiert werden. Diese Methode hat eine Reihe von Vorteilen gegenüber herkömmlichen Systemen, die eine zentrale Steuerung vorsehen:

- Das Fehlen eines zentralen Elements erhöht die Zuverlässigkeit des Systems. Bei klassischen Satellitenkommunikationssystemen führt der Ausfall des zentralen Hubs dazu, dass das System komplett ausfällt. Das Risiko kann mit Duplizieren des Hubs vermindert

werden, was aber zu zusätzlichen Kosten führt. Neben den Kosten der Anschaffung eines zweiten Hubs sind insbesondere die Probleme des Transports (bei out-of-area Einsätzen) und des Betriebs zu beachten. Hubs sind typischerweise größere Systeme (19" Racks) die für den stationären Betrieb konzipiert sind.

- Out-of-area Einsätze mit kleineren Einheiten benötigen als Minimum nur zwei Terminals, die auf leicht tragbare und per Flugzeug transportierbare Masse reduzierbar sind. Ohne auf die Installation eines Hubs (einschließlich der notwendigen Stromversorgung) warten zu müssen, sind die Terminals im Einsatzgebiet sofort einsatzbereit.
- Das verteilte System halbiert die Zeit um Verbindungen aufzubauen. In hub-basierten Systemen senden die Terminals ihre Anforderungen an den Hub, der dann mit den Zuweisungen antwortet. Dafür ist mindestens die doppelte Satellitenverzögerung notwendig. Allein die Übertragungsverzögerung beträgt etwa ein halbe Sekunde. Dazu kommen zusätzliche Zeiten für die Bearbeitung der Signalisierungsdaten (zweimal in Sende- und zweimal in Empfangsrichtung) und der eigentlichen Daten. Das macht die Einhaltung der geforderten 2 Sekunden zum Verbindungsaufbau im hub-basierten System sehr schwierig. Generell kann das verteilte Management schneller auf Änderungen der Lastsituation und der Kanalsituation antworten.
- Hub-basierte Systeme routen typischerweise auch die Nutzdaten über den Hub, womit auch für die Nutzdaten die doppelte Übertragungszeit anfällt. Es gibt zwar auch gemischte Mesh/Starsysteme (z.B. DVB-RCS mit Meshoverlay), diese sind aber eher selten und komplex im Management. Außerdem sind diese Systeme typischerweise auf den stationären Betrieb zugeschnitten.
- Die permanente Signalisierung aller Terminals erlaubt eine sehr schnelle Reaktion auf Veränderungen der Kanalbedingungen. Während die Regendämpfung im Ka-Band üblicherweise eine maximale Änderungsrate von 2dB/s aufweist, können im mobilen Betrieb wesentlich schnellere Änderungen auftreten. Um diese zu bewältigen ist auf dem physischen Layer Interleaving und eine entsprechende Kodierung vorgesehen, die variabel an die Bedingungen angepasst werden können. Diese Variabilität ist nötig, da, z.B. ein längerer Interleaver besser mit längeren Unterbrechungen zurechtkommt, sobald der Kanal aber wieder besser wird, ist es wünschenswert, den Interleaver wieder zu verkürzen, um die zusätzliche Verzögerung zu reduzieren. Die permanente Signalisierung erlaubt es, Abschattungen, die mindestens so lang wie die Signalisierungsperiode (250ms) sind, direkt messen zu können und diese sogar in einem gewissen Maße der Empfangs- oder Sendeseite zuordnen zu können. Mit diesem Wissen kann die Übertragungsmethode des physical layers schnell dynamisch gesteuert werden. Gleichzeitig können natürlich die Regendämpfungen, die besonders beim Einsatz in klimatisch problematischen Zonen auftraten, ausgeregelt werden.

Ein Vergleich der verschiedenen Architekturen zeigt Abbildung 20.

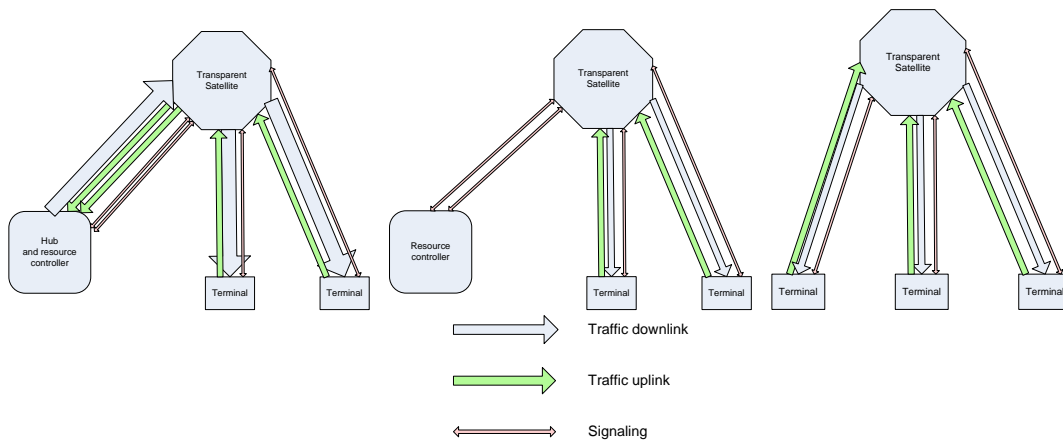


Abbildung 20: Star- und Mesharchitekturen

Die erste Konfiguration entspricht einem klassischen Satellitensystem, wie z.B. DVB-S2/DVB-RCS-2 in Star Konfiguration. In diesem Fall wird sowohl das Ressourcenmanagement, als auch das Relaying der Daten zwischen den Terminals vom Hub übernommen. Prinzipiell sind mit DVB-S2/DVB-RCS2 auch vermaschte Systeme möglich (mittleres Bild), wobei der Hub nur noch das Ressourcenmanagement übernimmt, der Nutzerverkehr aber direkt zwischen den Terminals fließt. In beiden Fällen führt ein Ausfall des Hubs zum Komplettausfall des Systems und in beiden Fällen fällt eine komplette Roundtrip-Time für die Signalisierung an. Das dritte Bild zeigt das MoSaKa-System, in dem es keinen Hub gibt und alle Terminals dieselbe Funktion übernehmen.

Innerhalb des MoSaKa-Terminals ist das Ressourcenmanagement in verschiedene Schichten unterteilt (Abbildung 21).

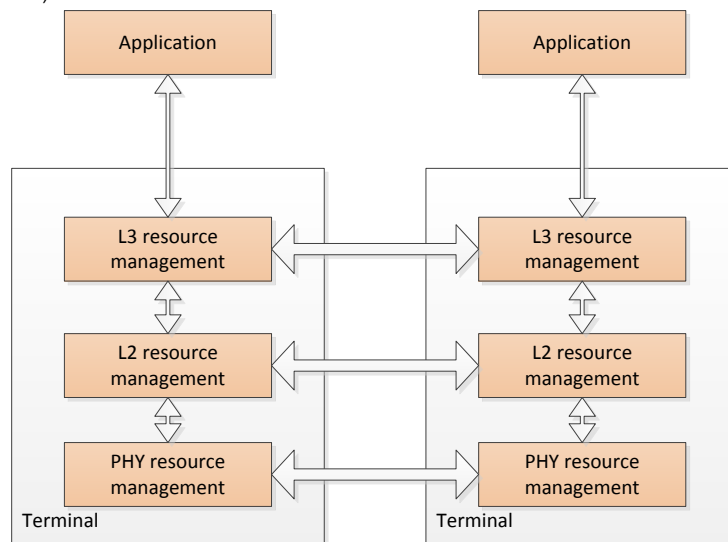


Abbildung 21: Ressourcenmanagementkomponenten

Auf der obersten Schicht befindet sich die Applikation, die über eine spezielle Schnittstelle mit dem L3-Management spricht. Hier werden dem System Anforderungen hinsichtlich Datenraten, Verzögerung u.a. mitgeteilt, die das MoSaKa-System dann versuchen zu gewährleisten. Das L3 Management ist sowohl mit den L3 Managementebenen des Zielsystems (und eventueller Zwischenknoten) über ein spezielles Protokoll, als auch mit den jeweiligen L2 Schichten der Terminals verbunden. Über letztere Schnittstelle wird dem Satellitensystem die Anforderung mitgeteilt. Im L2 findet dann die systemweite Signalisierung statt, die die Anforderung der Applikation

(aggregiert mit eventuellen anderen Anforderungen) den anderen Terminals bekanntmacht. Wenn die Anforderungen an den anderen Terminals angekommen sind, werden diese vom L2 in geeigneter Weise an den PHY weitergeleitet, der dann die eigentliche Ressourcenberechnung hinsichtlich Frequenz, Zeit und Leistung durchführt. Das Ergebnis wird über L2 und L3 wieder an die Applikation durchgereicht.

### Kanalgruppen

In einem vermaschten System wächst die Anzahl der notwendigen Kanäle stark mit der Anzahl der Terminals. So sind z.B. in einem System mit 10 Terminals theoretisch 90 unidirektionale Kanäle möglich. Da ein Satellitensystem prinzipiell ein Broadcast-Link ist, kann aber die Zahl der Kanäle vermindert werden. Im Extremfall kann die Anzahl der Kanäle auf einen pro Terminal vermindert werden. Jedes der Terminals hat einen ausgehenden Kanal, auf dem die Daten aller Zielterminals gemultiplext werden. Der Nachteil dieser Lösung ist, dass bei Vorhandensein von adaptiver Kodierung und Modulation der Kanal immer an das Zielterminal mit den schlechtesten Kanalbedingungen angepasst werden muss. Wenn die Terminals über eine hinreichend großes Einsatzgebiet verteilt sind, dann muss man davon ausgehen, dass die Zielterminals sehr unterschiedliche Kanalbedingungen haben können. In diesem Fall wird Bandbreite verschwendet, da auch zu den Terminals mit den guten Bedingungen mit den physical layer Parametern gesendet wird, die für die Terminals mit weit schlechteren Bedingungen notwendig sind.

Um die Effizienz zu erhöhen, werden deshalb die Datenströme zu Terminals, die ähnliche Kanaleigenschaften haben, in einem Kanal zusammengefasst (Kanalgruppe oder channel group) – siehe Abbildung 22. Die Anzahl der Kanäle, die von einem Terminal gesendet werden und ihre Bandbreite wird damit dynamisch, da die Kanalbedingungen veränderlich sind.

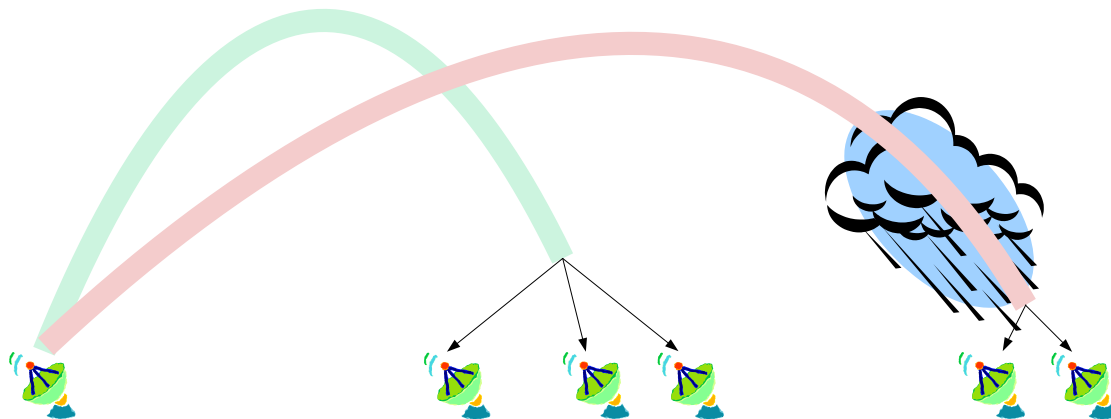


Abbildung 22: Kanalgruppen

In Abbildung 22 ist ein Beispielsystem dargestellt, in dem 4 Terminals gute Kanalbedingungen haben, während zwei andere durch heftigen Regen beeinträchtigt sind. In diesem Fall werden zwei Kanalgruppen benutzt – eine für die Kommunikation eines der ‚guten‘ Terminals zu den drei anderen ‚guten‘ und eine zweite für die Kommunikation des ersten Terminals zu den zwei ‚schlechten‘. Wenn sich die Regenwolke weiterbewegt, so dass ein fünftes Terminal gute Bedingungen bekommt, so wird die Zuordnung der Terminals zu den Gruppen und auch die Bandbreite der Gruppen geändert (Abbildung 23).

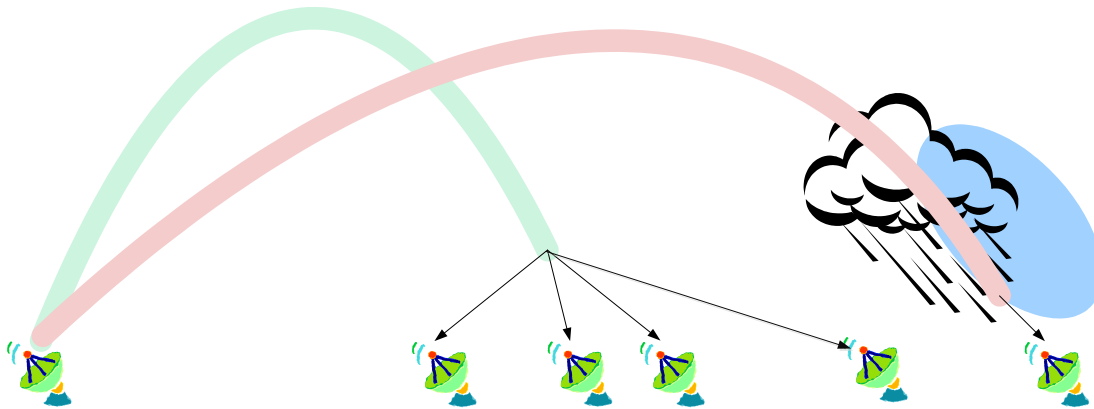


Abbildung 23: Kanalgruppenänderung

Der Mechanismus kann nicht nur zum Ausgleich verschiedener Regendämpfungen, sondern auch zum Ausgleich verschiedener Abschattungscharakteristiken benutzt werden, indem die verschiedenen Kanalgruppen z.B. unterschiedlich lange Interleaver bekommen.

Innerhalb einer Kanalgruppe sind die Ressourcen in QoS Ströme unterteilt (Abbildung 24), die nochmals unterschiedliche Parameter aufweisen können. Auch die Unterteilung einer Kanalgruppe in QoS Ströme ist dynamisch und passt sich den Anforderungen, die von den Applikationen kommen an.

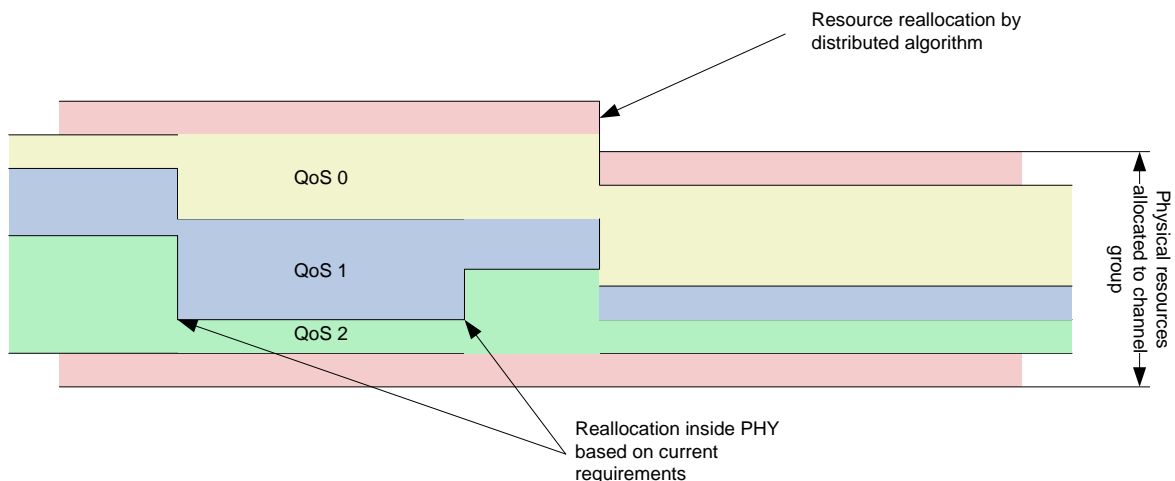


Abbildung 24: QoS Ströme

Die Zuordnung von Terminals zu Kanalgruppen und die Zuordnung von Daten zu QoS Strömen wird über eine zentrale Tabelle vorgenommen, die hinsichtlich der Einsatzortes und der Kommunikationsanforderungen optimiert werden kann. Innerhalb von L2 und zwischen L2 und L3 werden eine Reihe von Identifikatoren und Schlüsseln benutzt, die mithilfe dieser Tabelle übersetzt werden. Das erfolgt in folgenden Schritten:

1. Dem eingehenden IP-Paket wird ein erweiterter DSCP Schlüssel und eine Priorität gegeben. Das erfolgt für Pakete, die von L3-Signalisierten Applikationen kommen direkt durch den L3, für Pakete die von der legacy IP Schnittstelle kommen durch konfigurierbare Paketfilter.
2. Anhand der Zieladresse wird die Kanalgruppe ermittelt.

3. Mithilfe der Tabelle und des DSCP-Schlüssels wird das Paket einem von vier (pro Kanalgruppe) QoS-Strömen zugeteilt (QoS stream index).
4. Jeder QoS-Strom besitzt einen Scheduler, der für jede Prioritätsebene eine Warteschlange hat. In diese Warteschlange wird das Paket eingereiht.
5. Für jede der Kanalgruppen ist jeder QoS stream index auf einen von z.Zt. 8 physical layer QoS-Parametersätzen abgebildet.

Die Zuordnung von Terminals zu Kanalgruppen erfolgt beim Empfang von Signalisierungsnachrichten mit Kanalqualitätsreports. Das komplette Schema ist in Abbildung 25 dargestellt.

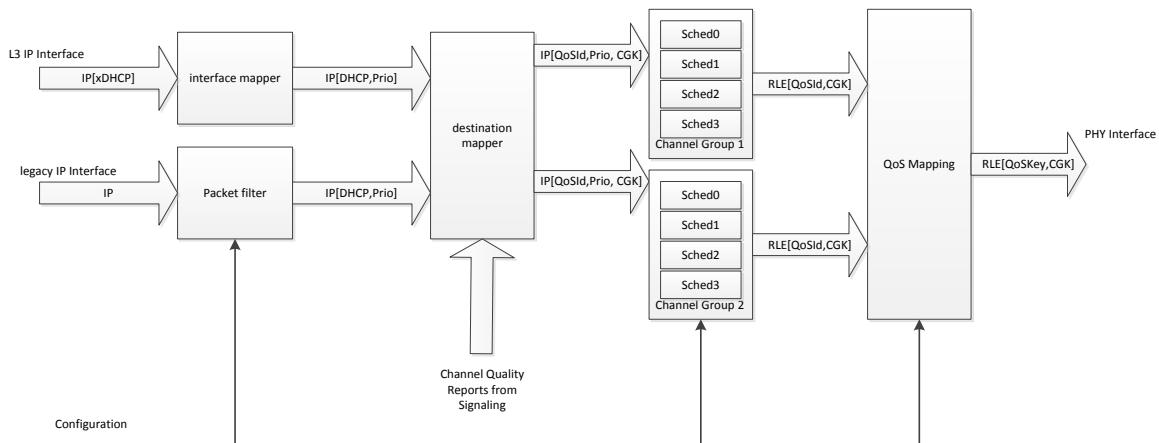


Abbildung 25: Mapping von QoS, Kanalgruppen, Prioritäten, StreamIds

### Layer 2 Signalisierung

Die Signalisierung auf L2 Ebene zwischen den Terminals benutzt einen speziellen Kanal, der verschieden von den Datenkanälen ist. Dieser Kanal wird von allen Terminals im Zeitmultiplexbetrieb genutzt. Der Kanal ist in Zeitschlitz zu je 25 ms eingeteilt und jedes Terminal sendet aller 250 ms. Damit sind z.Zt. bis zu 10 Terminals im System möglich.

Die Zeitschlitz sind auf absolute Zeit synchronisiert, d.h. am Beginn jeder Sekunde (gerechnet ab Eingang des Satelliten) beginnt der Zeitschlitz für Terminal 0. Beispielhaft ist der Signalisierungskanal für 4 aktive Terminals in Abbildung 26 dargestellt.

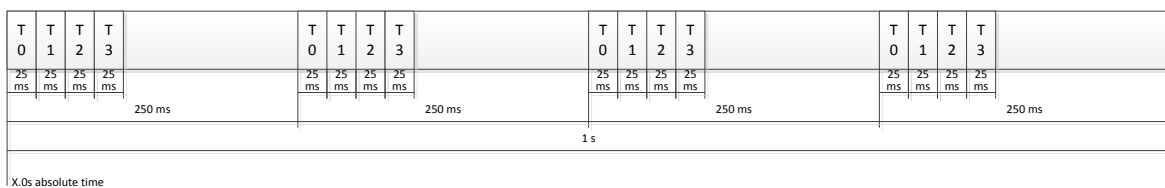


Abbildung 26: Signalisierungszeitschlitz

Die Zuordnung der Terminals zu den Zeitschlitzpositionen im Kanal ist fest und wird bei der Konfiguration des Terminals vorgegeben. Bevor ein Terminal anfängt zu senden, muss es sich mit hinreichender Genauigkeit mit Hilfe von GPS synchronisieren. Die Positionsinformation von GPS wird außerdem zusammen mit der Satellitenposition benutzt, um den Sendezeitpunkt zu berechnen, der entsprechend der aktuellen Laufzeit zwischen Terminal und Satellit vorverschoben sein muss. Diese Laufzeitberechnung wird alle 15 Sekunden aktualisiert, um Bewegungen des Terminals zu berücksichtigen.

Die Signalisierungsdaten werden ohne Interleaving übertragen. Das erlaubt es, diese zu benutzen, um Abschattungen festzustellen. Im Allgemeinen gilt: wenn keinerlei Signalisierungspakete empfangen werden, so ist der eigene Empfänger (und der eigene Transmitter) abgeschattet. Wenn nur einzelne Pakete von Terminals, die gerade noch empfangen wurden, nicht mehr empfangen werden, so ist das andere Terminal abgeschattet. Aufgrund dieser und ähnlicher Algorithmen kann die Ressourcenverteilung so gesteuert werden, dass Ressourcen zwar möglichst optimal benutzt werden, aber auch möglichst wenig Konflikte wegen unvollständiger Informationen entstehen.

Die Struktur der Signalisierungspakete ist in Abbildung 27 gegeben. Das Paket beginnt mit einer Absenderidentifikation (die strenggenommen redundant ist) und enthält dann eine variable Anzahl (auch 0) von Signalisierungsmessages. Am Ende folgen optionale Paddingbytes.

Abbildung 28 zeigt exemplarisch eine Resource Request Message, mit der ein Terminal allen Terminals mitteilt, welche Ressource es in der nächsten Runde bekommen möchte. Alle Nachrichten beginnen mit einem 2-byte Header, der den Nachrichtentyp, eine Sequence Number und einen CRC zur Fehlersicherung enthält. Die Länge der Nachrichten ist variable und ist implizit in der Nachricht kodiert. Der Resource Request enthält eine variable Anzahl von Channel Group Blocks, die jeweils mit einem 1 Byte header beginnen. Dieser Header enthält einen 7-bit Channel Group Key und ein 1 bit Flag, das für den letzten Block auf 1 gesetzt wird und damit das Ende der Nachricht signalisiert. Jeder Channel Group Block wiederum besteht aus einer variablen Anzahl von QoS Blocks, die die gewünschten Ressourcen Parameter für eine QoS Stream beschreiben. Der letzte Block ist auch hier mit einem Flag gekennzeichnet.

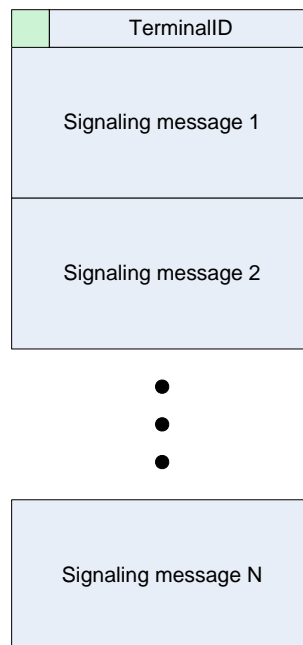


Abbildung 27: L2 Signalisierungspaket



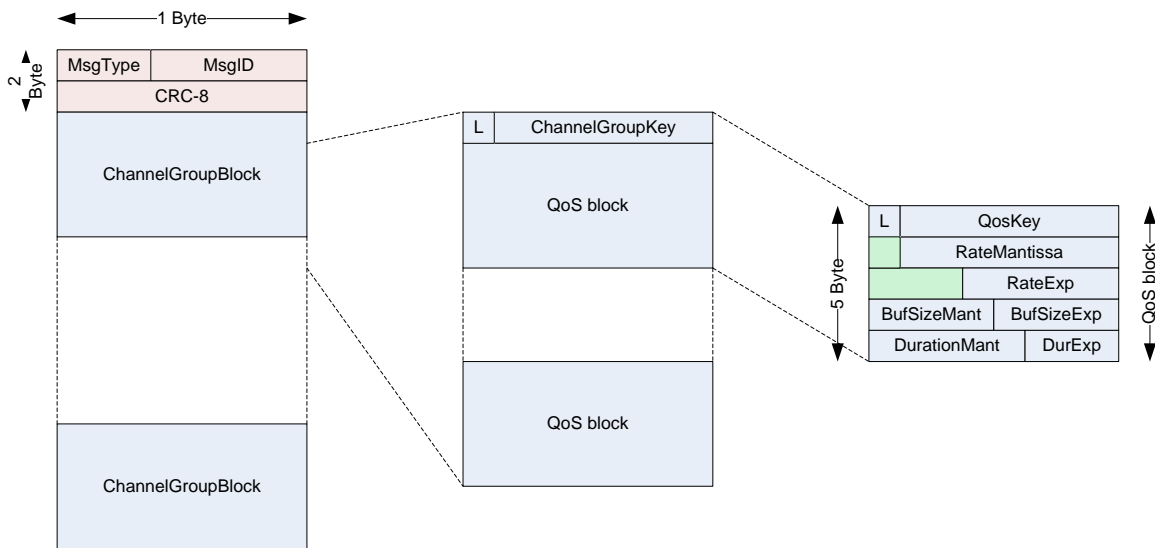


Abbildung 28: Resource request

Nicht alle Nachrichten sind derart komplex aufgebaut. Eine Übersicht aller Nachrichten findet sich in Tabelle 4.

Die zweite wichtige Nachricht neben dem Resource Request ist der Channel Quality Report. Dieser wird periodisch von allen Terminals gesendet (im Unterschied zum Resource Request, der in jeder Signalisierungsperiode gesendet wird, wird der Quality report nur ab- und zu, vor allem bei größeren Änderungen gesendet). Das Format dieser Nachricht ist in Abbildung 29 dargestellt.

Tabelle 4: Typen von Signalisierungsnachrichten

MsgType field	HG		LP	
	Message type	Length/bytes	Message type	Length/bytes
0	NOP	1		
1	HG resource requests	$\geq 8$	LP resource request	7
2	relayed LP resource request	$\geq 9$	LP resource allocation response	variable
3	HG channel quality report	$\geq 6$	LP channel quality report	5
4	relayed LP channel quality report	$\geq 7$	Logon trigger	3
5	HG fading quality report	4	Logoff	3
6				
7	NOP	2		

In dieser Nachricht wird für jede empfangene Kanalgruppe das gemessene C/No, sortiert nach Quellterminals übertragen. Diese Daten werden von den Quellterminals genutzt, um das Empfängerterminal den Kanalgruppen zuzuteilen.

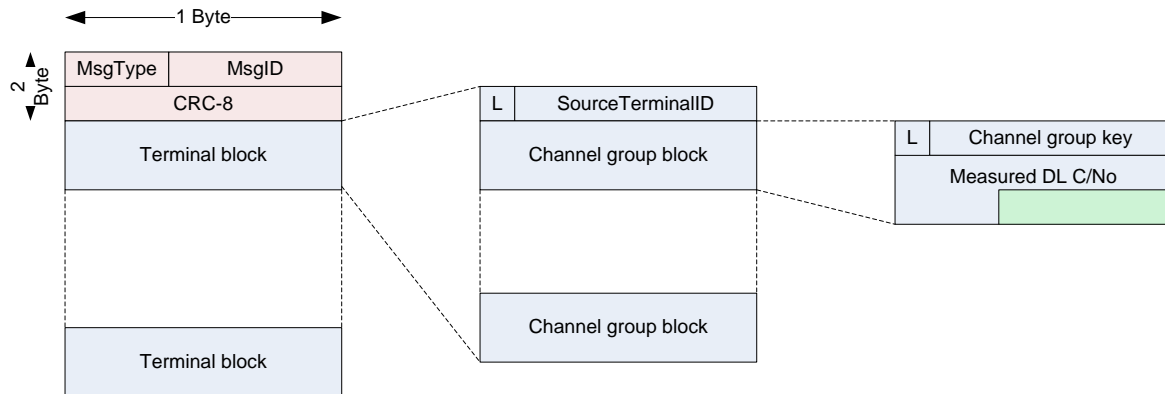


Abbildung 29: Channel Quality Report

## Encapsulation Protokoll

Im Layer 2 werden die IP-Daten mit Hilfe eines Encapsulierungsprotokolls behandelt, um diese an die Größe der Pakete auf dem physical layer anzupassen. Hier fiel die Auswahl auf das RLE (Return Link Encapsulation) Protokoll, das von IKN entwickelt und in DVB-RCS2 standardisiert wurde. Dieses Protokoll wurde speziell auf Links mit kleinen und variablen Burstgrößen zugeschnitten und hat eine sehr hohe Effizienz selbst in Grenzfällen. Für eine detaillierte Beschreibung des Protokolls wird auf den ETSI Standard EN 30154502 verwiesen.

Das Protokoll ist sehr flexible und konfigurierbar. Für MoSaKa wurde eine spezielle Anpassung der Optionen vorgenommen:

- **Kein Burst Header.** Der Sender eines Pakets kann durch den PHY identifiziert werden, deshalb ist keine explizite Senderidentifikation notwendig.
- **Kein Burst Label.** Der Sender eines Pakets kann durch den PHY identifiziert werden, deshalb ist keine explizite Senderidentifikation notwendig.
- **Kein Burst CRC.** Es wird angenommen, dass der PHY eine unerkannte Bitfehlerrate unter  $10^{-10}$  gewährleistet.
- **Kein Fragment Label.** Der Sender eines Pakets kann durch den PHY identifiziert werden, deshalb ist keine explizite Senderidentifikation notwendig.
- **0 oder 1 Byte Paket Label.** Wenn ein Paketlabel vorhanden ist, dann enthält es den Identifikator des Zielterminals und kann von diesem zur Ausfilterung der Daten aus dem Multiplex der Kanalgruppe benutzt werden. Siehe Tabelle 5.
- **Default Protocol Type.** Der default protocol type für Label Typ 0 bis 3 ist unkomprimiertes IPv4/IPv6 (die Differenzierung der IP Varianten erfolgt anhand des IP Headers). Für Label Typ 3 ist der protocol type ‚Signaling‘.
- **Packet CRC/Sequence number.** Aufgrund des mobilen Einsatzes wird der CRC eingesetzt. Tests, ob sequence numbering möglich ist, sollten gemacht werden.
- **Compressed protocol types.** Alle Protokolltypen sollten komprimiert sein.
- **Allowed protocol types.** Siehe Tabelle 6.

Tabelle 5: RLE Label types and default protocols

Label type	Label	Default protocol type
0	no label; broadcast (currently no defined use)	uncompressed IPv4/v6 (0xFFC0)
1	one byte destination ID	uncompressed IPv4/v6 (0xFFC0)
2	undefined	uncompressed IPv4/v6 (0xFFC0)
3	no label; broadcast	signalling

Tabelle 6: Protokoll Typen

Protocol	uncompressed value	compressed value
uncompressed ipv4	0x0800	0x01
uncompressed ipv6	0x86DD	0x02
uncompressed ipv4/ipv6	0xFFC0	0x03 (default for LT=0-2)
ROHC ipv4	0xFFC1	0x04
ROHC ipv6	0xFFC2	0x05
Signaling	0xFFC3	0x06 (default for LT=3)

### Struktur des LLC/MAC-Layers

Der LLC/MAC Layer des MoSaKa-Terminals umfasst eine Reihe von unterschiedlichen Komponenten, die die verschiedenen Funktionen dieses Layers implementieren und mit anderen Subkomponenten des Systems kommunizieren. Das Grobschema ist in Abbildung 30 dargestellt. Die einzelnen Komponenten haben folgende Funktionen:

- **Classifier:** Für die legacy-IP-Schnittstelle klassifiziert dieses Modul die IP-Pakete anhand von konfigurierbaren Filtern und markiert die Pakete mit einem DSCP Marker und einer Priorität. Für das L3-IP-Interface werden diese Werte aus dem IP-TOS-Feld dekodiert.
- **MAC Scheduler and Encapsulators:** Diese bilden eine Einheit in der die Pakete, für jede Kanalgruppe und jeden QoS Stream getrennt, geschedult, enkapsuliert und ggf. fragmentiert werden. Die Enkapsulatoren übernehmen auch die Flusskontrolle auf der Schnittstelle zur physischen Schicht.
- **Dekapsulator:** Dieser stellt aus den empfangenen RLE Paketen die ursprünglichen IP-Pakete wieder her.
- **GPS Receiver:** Dieser liefert die aktuelle Uhrzeit sowie Position und synchronisiert die Zeitgeber des MAC- und des PHY-Layers.
- **Delay Calculation and Time Sync:** Dieser Modul berechnet die aktuelle Laufzeit zum Satelliten und übernimmt die Synchronisation des Signalisierungskanals.
- **Positioning App.** Das ist ein UDP Server, der alle 10 Sekunden die aktuelle Position multicastet.
- **Resource Management.** Dieser Modul verarbeitet Resource Requests von L3, Ratenmessungen für legacy-IP-Pakete und empfangene Signalisierungsnachrichten. Aus diesen

Daten generiert er Antworten an L3, Resource Requests an den PHY und Signalisierungsnachrichten zum Senden.

- **SigEncoder:** Kodiert Signalisierungsnachrichten zum Senden.
- **SigDecoder:** Dekodiert empfangene Signalisierungsnachrichten.
- **SNMP:** Dieser Modul erlaubt das Monitoring und das Management des Terminals per SNMP-Protokoll.

Der MAC-Layer ist auf einem Standard PC unter dem Betriebssystem FreeBSD realisiert. Kommunikation mit L3, PHY und der Testbed-Infrastruktur erfolgt jeweils über verschiedene Ethernet Schnittstellen. Als zusätzliche Hardware ist ein spezieller GPS Empfänger für hohe Zeitgenauigkeit angeschlossen.

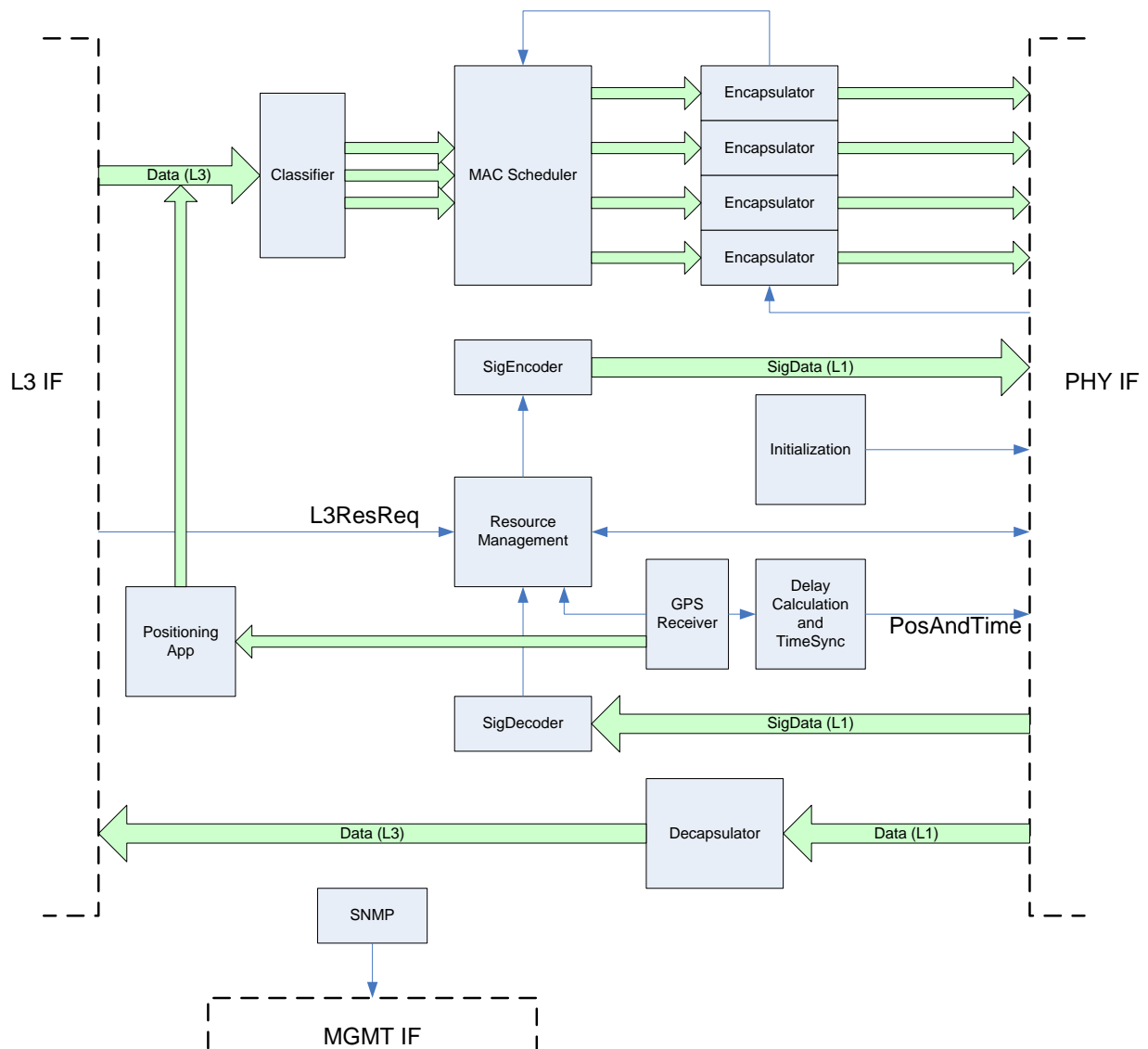


Abbildung 30: L2 Struktur

## Der Kanal

Um die einzelnen Schichten des Terminals optimal an die Kanalbedingungen anzupassen und Daten für die Steuerung der Kanalsimulatoren im Testbed zu haben wurden Kanalsimulationen durchgeführt. Dabei wurden folgende Effekte simuliert:

- Freiraumdämpfung
- Regendämpfung
- Szintillation
- Rauschen
- Abschattungen

Andere Effekte wie Wolkendämpfung, Dämpfung und Phasenrotation an Eiskristallen und Sand werden im Ka-Band als vernachlässigbar betrachtet.

Für die Simulation der Regendämpfung wurden dynamische Regenfelder benutzt, die örtlich korrelierte Dämpfungszeitserien erzeugen können. Ein Beispiel dafür zeigt Abbildung 31 in der beispielhaft die Regendämpfung für drei, nicht allzuweit voneinander entfernte Terminals gezeigt wird.

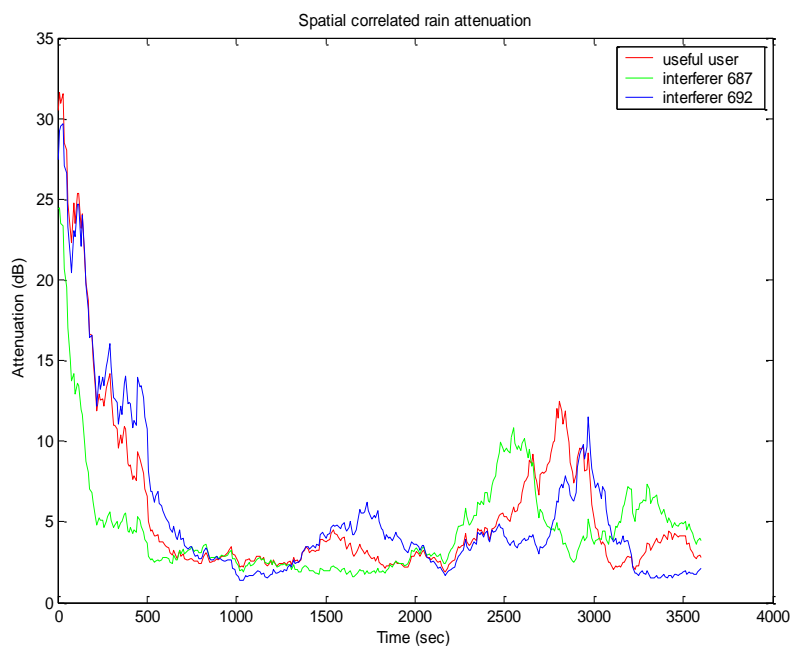


Abbildung 31: Örtlich korreliert Regendämpfung

Die Szintillation in den Downlinks wird durch ein spektrales Modell erzeugt, das auch die Abhängigkeit der Stärke der Szintillation von der aktuellen Regendämpfung berücksichtigen kann. Ein Beispiel für die Zeitserie zeigt Abbildung 32.

Die Downlinkdämpfung wird aus der modellierten Uplinkdämpfung durch Frequenzskalierung berechnet. Abbildung 33 zeigt ein Beispiel.

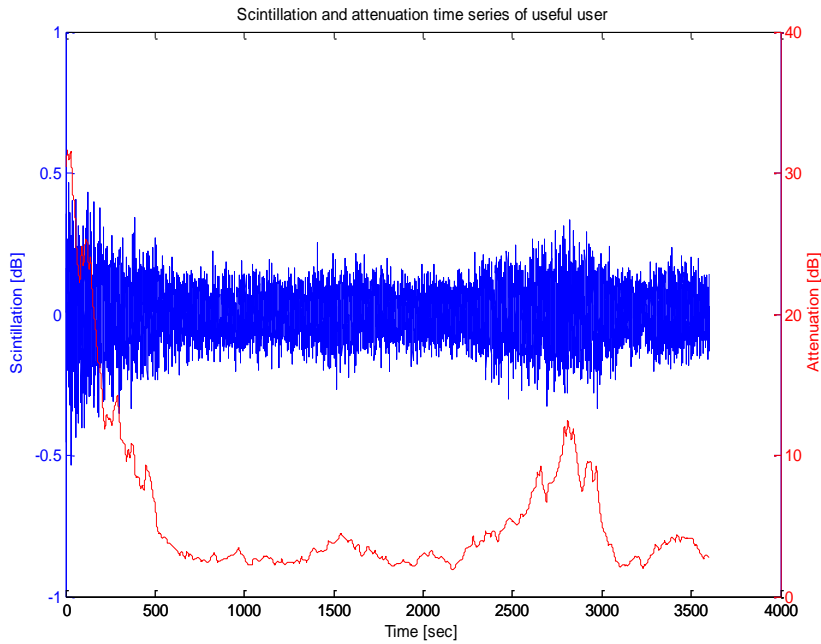


Abbildung 32: Szintillation

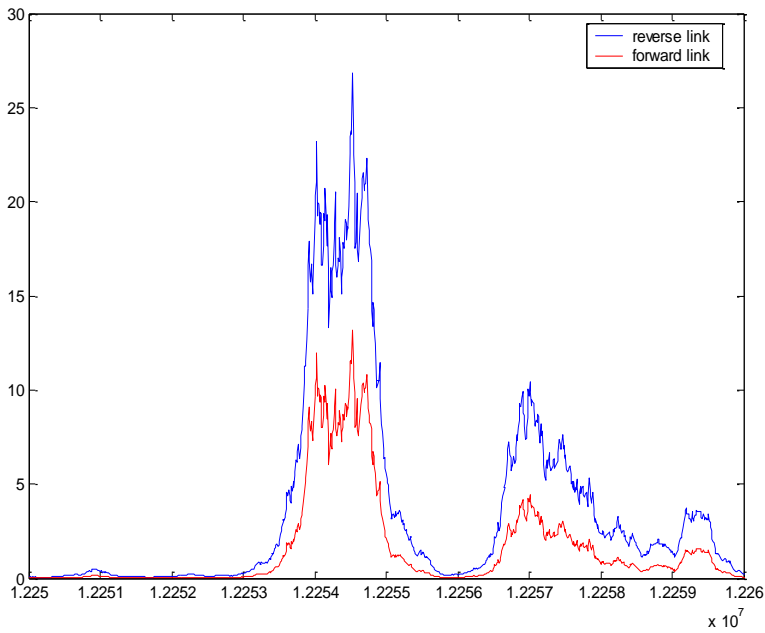


Abbildung 33: Frequenzskalierung

Durch die Kombination aller Effekte für alle Paare von Terminals ergeben sich eine Reihe von Zeitserien, die alle möglichen Kommunikationslinks im System beschreiben (Abbildung 34 zeigt das exemplarisch für 3 Terminals). Auf diese Zeitserien wird am Ende das von Fraunhofer IIS zur Verfügung gestellte Abschattungsmodell angewendet. Das Ergebnis kann dann einmal für die Simulation der Algorithmen verwendet werden sowie in die Kanalsimulatoren im Testbed eingespeist werden.

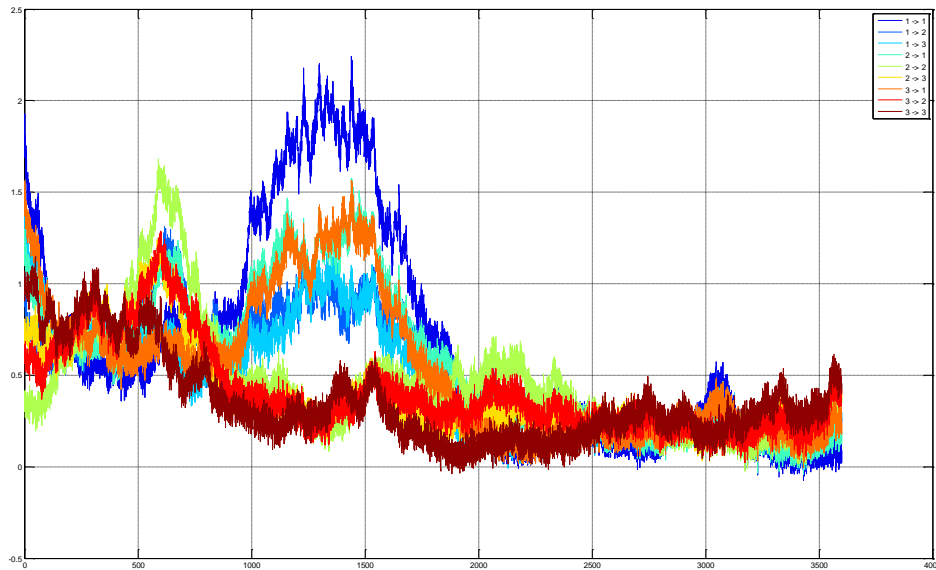


Abbildung 34: Total Link Time Series

#### 2.1.4.6 Design und Implementierung der höheren Schichten

Anwendungen auf Endsystemen (z.B. Workstations oder Laptops usw.) bieten Nutzern Kommunikationsdienste an. Diese Dienste sind im Bereich der Krisenkommunikation beispielsweise Sprachdienste oder Videodienste. Diese Anwendungen stellen Anforderungen an die Übertragung ihrer Daten an das Datentransportsystem, zum Beispiel bezüglich der benötigten Datenrate oder der maximalen Übertragungsverzögerung. Die Bekanntgabe der Anforderungen gegenüber einem Datentransportsystem kann über eine sogenannte Signalisierung oder mittels statischer Hinterlegung von Anforderungen im Datentransportsystem erfolgen. Zur Berücksichtigung dieser Anforderungen im Datentransportsystem werden verschiedenste Verfahren und Regelungsprozess im Datentransportsystem integriert. Die Hinterlegung von Anforderungen und die Verwaltung von Ressourcen zur Einhaltung der Übertragungsanforderungen im Datentransportsystem fasst man unter dem Begriff Ressourcenverwaltungssystem zusammen.

Das Ressourcenverwaltungssystem hat zur Aufgabe, die gegebenen Anforderungen zu gewährleisten. Zur Einhaltung von Anforderungen existieren unterschiedliche Verfahren, beispielsweise Klassifikation von Datenströmen in Dienstklassen, Datenströmen Prioritäten zuzuordnen oder den Zugang der Teilnehmer zu den gemeinsamen Netzressourcen zu kontrollieren. Im Rahmen des MoSaKa Projektes entwickelte das Fachgebiet „Integrierte Kommunikationssysteme“ (IKS) ein Ressourcenverwaltungssystem, das gezielt auf die Anforderungen eines satellitenbasierenden Transportnetzes zugeschnitten ist. Bestehende Lösungen wurden speziell auf Verwendbarkeit in Netzen mit hoher Latenz untersucht. Aufbauend auf den Erkenntnissen dieser Analysen entstand ein Konzept einer dezentralen Ressourcenverwaltungsarchitektur.

Die nachfolgenden Abschnitte fassen zu Beginn die Grundlagen zur MoSaKa Ressourcenverwaltungsarchitektur zusammen. Hierbei erfolgt eine inhaltliche Trennung in Anforderungen, Architekturkonzepte und Protokolle zur Umsetzung des MoSaKa QoS-Systems. Im Anschluss daran wird die Ressourcenverwaltungsarchitektur mit den funktionalen Eigenschaften und deren Umsetzung vorgestellt.

## Anforderungen

Der Anwendungsfall „Krisenkommunikation“ diene als Grundlage zur Ableitung der Anforderungen an das Gesamtsystem. Daraus abgeleitet entstanden in Zusammenarbeit mit der „Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft“ (IABG) Studien zum zukünftigen Einsatz von MoSaKa. Eine zentrale Nutzeranforderung war die Verbindung unterschiedlicher Typen von Kommunikationsnetzwerken, wie „Universal Mobile Telecommunications System“ (UMTS), „Global System for Mobile Communications“ (GSM), „Terrestrial Trunked Radio“ (TETRA), „Local Area Network“ (LAN) und „Wireless Local Area Network“ (WLAN) zu einem übergreifenden Netz. Als gemeinsamer Nenner der verschiedenen Technologien hat sich die *TCP/IP*-Protokollfamilie [16, 17] gegenüber anderen Systemen durchsetzen können. Das MoSaKa-Ressourcenverwaltungssystem sollte daher zwingend auf Basis dieser Protokollfamilie implementiert werden.

Im Vergleich zu kabelgebunden Netzen unterliegen Satellitensysteme hohen Signallaufzeiten und haben verhältnismäßig geringe Ressourcen zur Datenübertragung. Die Übertragungskapazität ist wegen veränderlichen Umgebungsbedingungen (Abschattungen, Bewegungen, Wolken, Nebel oder Regen) über die Zeit variabel. Dies erfordert im Hinblick auf ein Ressourcenverwaltungssystem die Möglichkeit der adaptiven Regulierung von Ressourcen. Aufgrund der im Projekt bestehenden Anforderungen hinsichtlich der Verzögerung beim Aufbau einer Kommunikationsverbindung ist MoSaKa als *Hub*-loses System ausgelegt. Dies hat direkten Einfluss auf die Architektur des Ressourcenverwaltungssystems, welches ebenfalls ohne zentralen Koordinator auskommen muss.

In einem System für die Kommunikation im Katastrophenfall ist das Bereitstellen von Ende-zu-Ende Garantien von entscheidender Bedeutung. Bestimmte Datenübertragungen – beispielsweise Notrufe – sind gegen Einfluss durch andere, unwichtigere Verbindungen zu schützen. Eine effiziente Zuteilung der dafür notwendigen Ressourcen bedarf der expliziten Bekanntgabe der Anforderungen von Applikationen durch ein Signalisierungsprotokoll.

Zusammenfassend dargestellt ergeben sich folgende Anforderungen an das MoSaKa Ressourcenverwaltungssystem:

- Unterstützung von heterogenen Netzwerkstrukturen
- Ende-zu-Ende QoS Garantien in Systemen mit wechselnden Linkkapazitäten
- Berücksichtigung hoher Signallaufzeiten im Datentransportsystem
- Dezentrale Ressourcenverwaltung
- Priorisierung von Datenströmen

## Stand der Technik

Auf dem Gebiet der *IP*-basierten Ressourcenverwaltung werden aktuell zwei Arten von Systemen unterschieden: „Differentiated Services“ (DiffServ) [18] und „Integrated Services“ (IntServ) [17, 19].

Die *DiffServ*-Architektur bietet statische Dienstklassen, die jeweils eine bestimmte Dienstgüte bieten. Pakete, welche in einem *DiffServ*-System übertragen werden, tragen eine Markierung der gewünschten Dienstgütekategorie im *IP*-Paketkopf. Abhängig von dieser Markierung bietet *DiffServ* zwei Mechanismen zur Paketbehandlung:

- Per Hop Behavior (PHB)
- Per Domain Behavior (PDB)

*Per Hop Behavior* beschreibt die Behandlung von Paketen bei der Weiterleitung in einem Netzwerkknoten (Priorisierung bestimmter Datenströme, maximale Latenzen, etc.). Mittels *Per Domain Behavior* kann ein Netzwerkbetreiber diese Parameter übergreifend über seine *DiffServ*-Domäne (ein Netzwerk von Knoten mit einer gemeinsamen *QoS-Policy*) beschreiben. *DiffServ* ist zustandslos und kommt ohne explizite Signalisierung aus. An den Domänengrenzen ist eine



statische Verkehrskontrolle vorgesehen. Datenströme gleicher Klassifikation werden innerhalb einer Domäne in Aggregate gruppiert denen eine feste Kapazität von Ressourcen zur Datenübermittlung zugewiesen ist. Innerhalb eines solchen Aggregates werden keine Regulierungen vorgenommen, was zu einer Verdrängung von Datenströmen durch Ströme in der gleichen Klasse führen kann. Beispielsweise führt dies auf Anwendungsebene bei Annahme mehrerer Audioströme innerhalb eines Klassenaggregates zu hörbaren Störungen oder Ausfällen der Sprachkommunikation. Die fehlende Möglichkeit zur bedarfsgerechten Zuweisung von Übertragungsressourcen schließt die Funktionalität der Ende-zu-Ende QoS Garantien im *DiffServ* Ansatz aus. Folglich wurde der *DiffServ* Ansatz für MoSaKa als nicht geeignet eingestuft.

*IntServ* ist ein zustandsbasierter Ansatz mit explizierter Reservierung von Ressourcen. Anforderungen an die Datenübertragung werden von einem Endsystem zum anderen signalisiert und auf dem dazwischenliegenden Pfad eingerichtet. Um eine solche Art von Reservierung zu realisieren, ist es notwendig, einen Protokollzustandsautomaten in den jeweiligen Übermittlungsinstanzen zu implementieren. Die notwendige Signalisierung wird aktuell durch zwei Protokolle umgesetzt: *IntServ* mit „Resource Reservation Protocol“ (RSVP) [20] oder *IntServ* mit „Next Steps in Signalling“ (NSIS) [21].

*RSVP* ist ein unidirektional reservierendes Protokoll, welches mittels eines einzigen Nachrichtenaustauschs einen Pfad reserviert. Die Quelle eines Datenstroms sendet periodisch *PATH*-Nachricht in Richtung des Empfängers. Der Empfänger beantwortet diese mit einer *RESV*-Nachricht, welche die Systeme entlang des Pfades zurück zum Sender veranlasst, die notwendigen Reservierungen einzurichten. *RSVP* weist für den Einsatz in einem satellitenbasierten Netz erhebliche Nachteile auf:

- Keine bidirektionale Reservierung
- Keine Nachrichtenkonsolidierung (zusammenfassen von Einzelnachrichten)
- Keine Detektion von verloren gegangenen Signalisierungsnachrichten

*NSIS* ist der designierte Nachfolger von *RSVP* und geht über dessen ursprünglichen Einsatzzweck hinaus. Das Protokoll bietet umfassende Möglichkeiten zur Signalisierung verschiedenster Netzwerkzustände und -ereignisse. Zu diesem Zweck ist *NSIS* in verschiedene Module gegliedert. Für die Signalisierung von QoS-Anforderungen existiert das „NSIS Signalling Layer Protocol“ (NSLP) [22]. Die Signalisierungsnachrichten werden durch das „NSIS Transport Layer Protocol“ (NTLP) [23] übertragen, welches seinerseits auf verschiedene Protokolle der Transportschicht zurückgreift. Dieses komplexe System bringt eine in satellitenbasierten Umgebungen nachteilige hohe Anzahl von *Handshakes* mit sich, welche den Verbindungsaufbau verzögern. Als vorteilhaft erwiesen sich die Fähigkeiten zur Aggregation mehrerer Signalisierungsvorgänge zu einem einzigen Nachrichtenaustausch sowie die Fähigkeit zur bidirektionalen Signalisierung.

## Auswertung

Die *IntServ*-Architektur zeigt ihre Stärken bei der feinen Granularität zur Unterscheidung von Dienstgütern. Jede Applikation ist in der Lage, entsprechend individueller Bedürfnisse Ressourcenanforderungen zu tätigen. Der Preis dafür ist ein Skalierungsproblem aufgrund des verteilten Zustandes, was einen Einsatz von *IntServ* in großen Netzen erschwert. Dieser Nachteil kommt allerdings erst in Netzen zum tragen, welche weit größer sind als im vorgesehenen MoSaKa Anwendungsfall. Wegen des zustandsbasierten Ansatzes mit der Möglichkeit der bedarfsgerechten Zuweisung von Ressourcen zur Datenübermittlung wird *IntServ* als Basisansatz für das MoSaKa Ressourcenverwaltungssystem vorgesehen. Die erwähnten Signalisierungsprotokolle finden hinsichtlich ihrer erwähnten Nachteile jedoch keine Anwendung, sondern werden anhand der Anforderung des Nachrichtentransportes in Satellitennetzwerken durch ein eigenes

entwickeltes Signalisierungsprotokoll ersetzt. Hierbei werden die Vorteile beider Protokolle übernommen und ihre spezifischen Nachteile durch angepasste Mechanismen vermieden.

### Das MoSaKa-Ressourcenverwaltungssystem

Das MoSaKa-Transportsystem ist ein *IP*-basiertes Netzwerk, das auf verschiedensten Kommunikationsarchitekturen aufsetzen kann. Die Architektur der Ressourcenverwaltung von MoSaKa ist modular aufgebaut, um eine flexible Anpassung an die Fähigkeiten der zugrundeliegenden Infrastruktur zu ermöglichen. Dies ermöglicht die Nutzung von *IPv4* oder *IPv6*. Jeder Netzknoten verfügt über eine Instanz der MoSaKa-Software, welche das generalisierte MoSaKa QoS-Modell auf die plattformspezifischen QoS-Primitiven des Knotens abbildet. Im Projektverlauf wurden Anpassungen für die MoSaKa MAC-Schicht, sowie das Betriebssystem Linux implementiert. C++ mit den *Boost* und *libNFqueue* Bibliotheken wurde hierbei als Implementierungssprache eingesetzt. Die *libNFqueue* Bibliothek bietet unter anderem die effizientere Behandlung von *IP*-Datenpaketen gegenüber den *raw-sockets* oder der *libpcap* Bibliothek. Die *Boost* Bibliothek ermöglichte die Umsetzung eines eigenen Softwaremodultest-Framework zur Validierung von Funktionsschnittstellen.

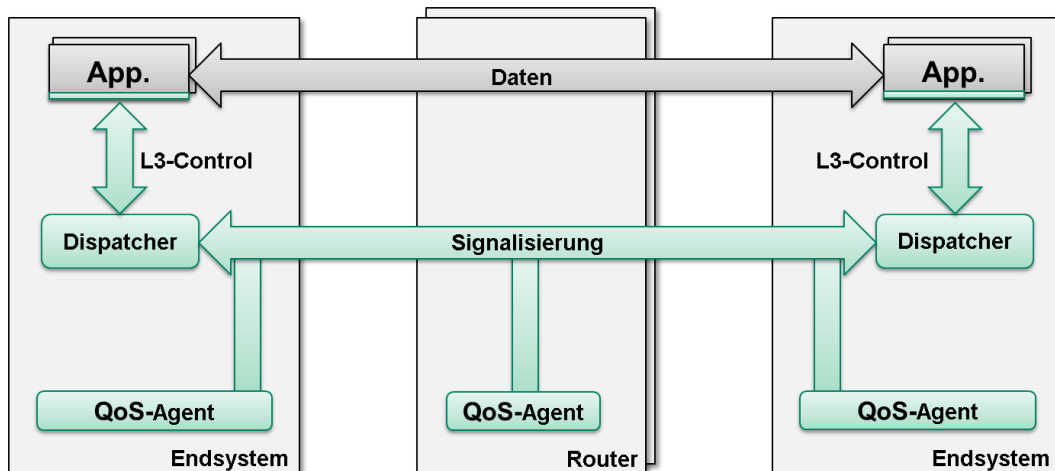


Abbildung 35: Überblick über die MoSaKa Schicht 3 Architektur

Wie in Abbildung 35 dargestellt wird, erstreckt sich die vorliegende Ressourcenverwaltungsarchitektur über alle Teile des Kommunikationsnetzwerkes: von den Endsystemen über die *Router* bis hin zu den MoSaKa-Satellitenterminals tragen alle Knoten zur Bereitstellung der gewünschten Dienstgüte bei. Im Folgenden wird auf die Details der einzelnen Komponenten genauer eingegangen.

### Die Endsysteme

Das erste Glied der MoSaKa QoS-Kette sind die Endsysteme mit ihren Applikationen. Als reservierungsbasiertes System ist MoSaKa durch die Anforderungen der Anwendungen getrieben und agiert ohne explizite Aufforderung rein passiv. Als Vermittler zwischen Anwendungen und Netz fungiert eine Softwarekomponente namens *Dispatcher*. Diese stellt eine standardisierte Schnittstelle für Anwendungen zur Verfügung, über welche die Anwendungen ihre Anforderungen an das QoS-System stellen und Rückmeldungen des Netzes erhalten können. Netzseitig dient der *Dispatcher* als Anlaufpunkt für jegliche MoSaKa-Signalisierungsnachrichten. Dieser hält die Reservierungen gegenüber dem Netz „am Leben“ und baut Pfade, soweit angefordert, auf und ab.

Applikationen im MoSaKa System werden in zwei Kategorien unterteilt: angepasste Applikationen und Standardsoftware. Um den vollen Funktionsumfang des MoSaKa-Systems nutzen zu können sind angepasste Applikationen notwendig. Nur diese können ihre Anforderungen geeignet signalisieren und auf Rückmeldungen des Netzes reagieren. Da eine Anpassung der riesigen Menge bestehender Applikationen unmöglich ist, wurde im Rahmen des Projektes die Möglichkeit geschaffen, über eine sogenannte „Wrappersoftware“ auch bestehende Anwendungen mittels statisch hinterlegter QoS-Profile in das MoSaKa-System zu integrieren. Hierbei steht allerdings nur ein eingeschränkter Funktionsumfang zur Verfügung: Alle Fähigkeiten zur dynamischen Adaption an veränderte Netzbedingungen entfallen mangels fehlender Auswertung von *Feedback*-Nachrichten, da diese vom *Wrapper* nicht an die Anwendung weitergereicht werden können.

### Die QoS-Agenten

Ende-zu-Ende QoS ist in MoSaKa entsprechend dem *IntServ*-Modell als Summe der QoS-Entscheidungen der Knoten entlang eines Pfades realisiert. Hierbei ist in paketvermittelten Netzwerken insbesondere die Weiterleitungsentscheidung für einzelne Pakete relevant. Das Betriebssystem hält üblicherweise für jede Netzwerkschnittstelle eine oder mehrere Paketwarteschlangen vor, in denen sich die zu übertragende Pakete sammeln. Stehen Übertragungsressourcen zur Verfügung, entscheidet das Flusssteuerungsmodul, welches der wartenden Pakete weiterzureichen ist.

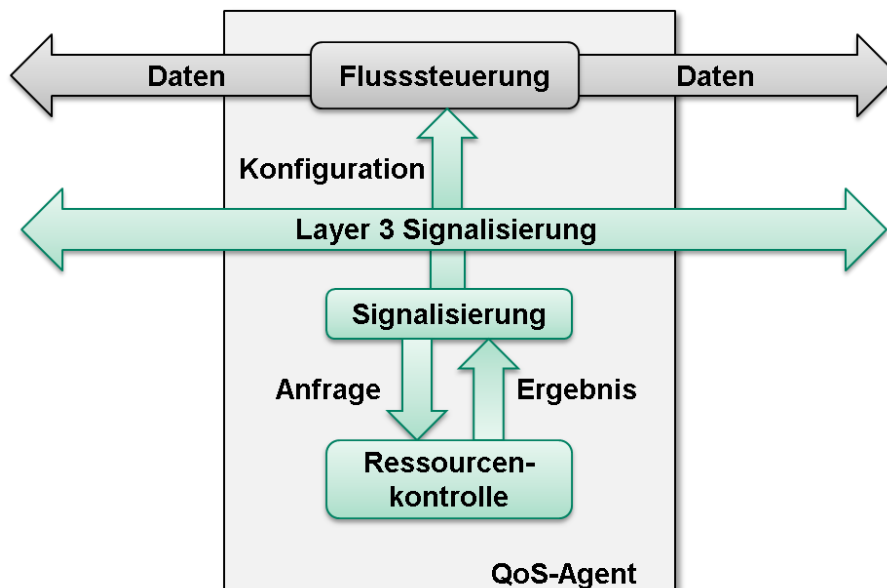


Abbildung 36: Struktur eines QoS-Agenten

Die Steuerung und Verbindung von Pfaden zur Realisierung von Dienstgüte ist die Aufgabe des MoSaKa *QoS-Agenten*. Diese Komponente wird auf Endsystemen, Routern und auf den Satellitenterminals eingesetzt. Aufgabe des *QoS-Agenten* ist es, Ressourcenanfragen aufzunehmen, zu interpretieren und die notwendigen lokalen Anpassungen durchzuführen.

Diese Aufgabe wird durch die drei in Abbildung 36 dargestellten Module gemeinsam umgesetzt: das Signalisierungsmodul, das – systemspezifische – Flusssteuerungsmodul und das Ressourcenkontrollmodul.

**Das Signalisierungsmodul** nimmt Nachrichten von den Endsystemen entgegen und leitet die Anfragen an das Ressourcenkontrollmodul weiter. Das Modul hält den Signalisierungsvorgang bis zur Entscheidung durch das Ressourcenkontrollmodul an. Das Anhalten der Signalisierung

führt grundsätzlich zu einer Verzögerung beim Verbindungsaufbau, verringert aber die Komplexität der Signalisierung und die Anzahl zu versendender Nachrichten erheblich. Des Weiteren wird je nach Ergebnis vom Ressourcenkontrollmodul das Flusssteuerungsmodul durch das Signalisierungsmodul konfiguriert.

**Das Ressourcenkontrollmodul** verwaltet alle im System eingerichteten Reservierungen sowie die vorhandene Kapazität auf den verschiedenen Netzwerkschnittstellen. Eintreffende Reservierungsanfragen werden mit den noch freien und verfügbaren Ressourcen abgeglichen und gegebenenfalls abgewiesen. Der enthaltene Cross-Layer Informationsaustausch von Layer 3 zu Layer 2/1 realisiert hierbei die dezentrale Ressourcenverwaltung. Am Satellitenterminal übermittelt das Ressourcenkontrollmodul dem Layer 2 die benötigten Anforderungen von den Applikationen. Im Layer 2/1 wird daraufhin der Gesamtressourcenbedarf in Carriern in Abhängigkeit vom Zustand des Satellitenlinks berechnet. Im Anschluss folgt der zyklische Ressourcenreservierungsprozess am Satellitenterminal. Dieser Prozess annonciert alle 250ms den Ressourcenbedarf vom Satellitenterminal an andere Satellitenterminals. Das Ergebnis, ob ausreichend Ressourcen in Form von Carriern am Satellitenterminal über den Layer 2/1 allokiert werden konnten, stellt der Layer 2 dem Layer 3 als Ergebnis zur Verfügung. Die Umrechnung der Carrier in Datenrate setzt hierbei der Layer 2 um. Die enge Verzahnung der Schichten 3, 2 und 1 ermöglicht die Behandlung von veränderlichen Übertragungsbedingungen am Satellitenterminal. Zu diesem Zweck wurde ein *Optimierer* implementiert, der bei nicht länger ausreichenden Übertragungskapazitäten bestehende Verbindungen prioritätenabhängig in einen Wartezustand („On Hold“) versetzt. Ressourcen, die diesen Verbindungen zugewiesen waren stehen dann kurzfristig höher priorisierten Verbindungen zur Verfügung. Vorhandene Kapazitäten die aufgrund der Reservierungen nicht zugewiesen werden können, stehen für die Übertragung von *Best-Effort*-Verkehr zur Verfügung. Um eine intelligente Reaktion der Anwendung auf Veränderungen im Netzwerk zu ermöglichen, werden Änderungen bezüglich der Reservierungszustände kommuniziert. Der Verbleib der Reservierung in einem Wartezustand verringert den Bedarf an erneuten Anfragen durch die Applikation und erhöht damit nicht zusätzlich die bereits vorliegende Ressourcenknappheit. Steht wieder genügend Übertragungskapazität zur Verfügung, wird die Reservierung systemseitig reaktiviert, was der Applikation durch eine weitere Signalisierungsnachricht mitgeteilt wird.

Eine Zuweisung von Ressourcen auf einem System kann nur dann garantiert werden, wenn die reservierten Parameter während der eigentlichen Datenübertragung auch durchgesetzt werden. Dies betrifft sowohl den Schutz eines reservierten Pfades gegenüber äußerer Einflüsse, als auch den Schutz der Umgebung gegenüber Anwendungen, welche ihre reservierten Parameter überschreiten. Diese Aufgaben fallen dem Flusssteuerungsmodul zu.

**Das Flusssteuerungsmodul** in paketvermittelten Netzwerken ist ein weites Forschungsfeld mit einer großen Menge an Vorarbeiten. Daher wurde für die L3-Flusssteuerung auf bewährte Komponenten der verwendeten Betriebssysteme zurückgegriffen. Diese werden durch den *QoS-Agenten* lediglich ausgewählt und geeignet konfiguriert. Das Ziel war eine flexible Anpassung an das jeweilige zugrundeliegende System. Im Rahmen des Projektes wurden Adapter für das Betriebssystem *Linux* und die MoSaKa-spezifische *MAC*-Schicht entwickelt.

### Das Signalisierungsprotokoll

Das verbindende Element der verschiedenen MoSaKa-Systeme ist das gemeinsame Signalisierungsprotokoll auf der Vermittlungsschicht. Mit diesem Protokoll werden sämtliche Informationen zum Auf- und Abbau von Pfaden transportiert.

Ein grundlegendes Ziel des Protokolls ist die effiziente, latenzarme Signalisierung mehrerer Pfade. In Umgebungen mit hoher Übertragungsverzögerung wie Satellitensystemen ist eine Minimierung der *Handshakes* im Nachrichtenaustausch für die Gesamtdauer des Verbindungsaufbaus von entscheidender Bedeutung. Vergleichbar zu *NSIS* unterstützt MoSaKa daher die gleich-

zeitige Signalisierung mehrerer Pfade in einem einzigen Signalisierungsvorgang. Dieser wird allerdings vergleichbar „einfach“ wie im Falle von *RSVP* durch einen Austausch von nur zwei Nachrichten realisiert. Eine *hop-by-hop*-Adressierung der beteiligten Pfadknoten findet hierbei nicht statt. Signalisierungsnachrichten werden zwischen den *Dispatchern* (welche auf den Endsystemen integriert sind) ausgetauscht und auf dem Weg durch das Netz von *QoS-Agenten* abgefangen und ausgewertet. Dieser Ansatz setzt statische Routen voraus und bietet einerseits den Vorteil einer minimalen Kopplung von Routing und Signalisierung, wobei andererseits die Einbindung nicht-MoSKa-fähiger Netzsegmente ohne weitere Änderungen ermöglicht wird. Letzteres kann jedoch zu Einschränkungen zur Einhaltung von Ende-zu-Ende QoS-Garantien führen, wenn Teilstrecken ohne Schutzmechanismen betrieben werden.

Das MoSaKa-Signalisierungsprotokoll wird über das „User Datagram Protocol“ (UDP) [24] realisiert. Es ermöglicht die volle Kontrolle über die vom System versendeten Nachrichten einschließlich Bestätigungen und Neuübertragungen. Informationen zur Auswertung und Handhabungen der Signalisierungsnachrichten werden zu Beginn des UDP-Payloads als Steuerdaten hinterlegt. Hiermit werden die Funktionalitäten zur Fragmentierung von Nachrichten und Nachrichtenbestätigung realisiert.

Die Kodierung der Reservierungen ist vergleichbar zu *RSVP* in zwei Bereiche gegliedert: Metadaten, welche die Charakteristik eines Datenflusses beschreiben (verwendetes Protokoll, eventuell *Port*-Nummern, beteiligte Endsysteme) und eine Anforderungsbeschreibung in welcher die geforderte Dienstgüte hinterlegt ist. Beide Bereiche sind für zukünftige Funktionen erweiterbar.

### Validierung des Systems

Die Evaluierung des Ressourcenverwaltungssystems wurde anhand eines virtualisierten *Testbeds* [23] durchgeführt. Abbildung 37 zeigt den Aufbau der virtuellen und realen der realen Systemkomponenten.

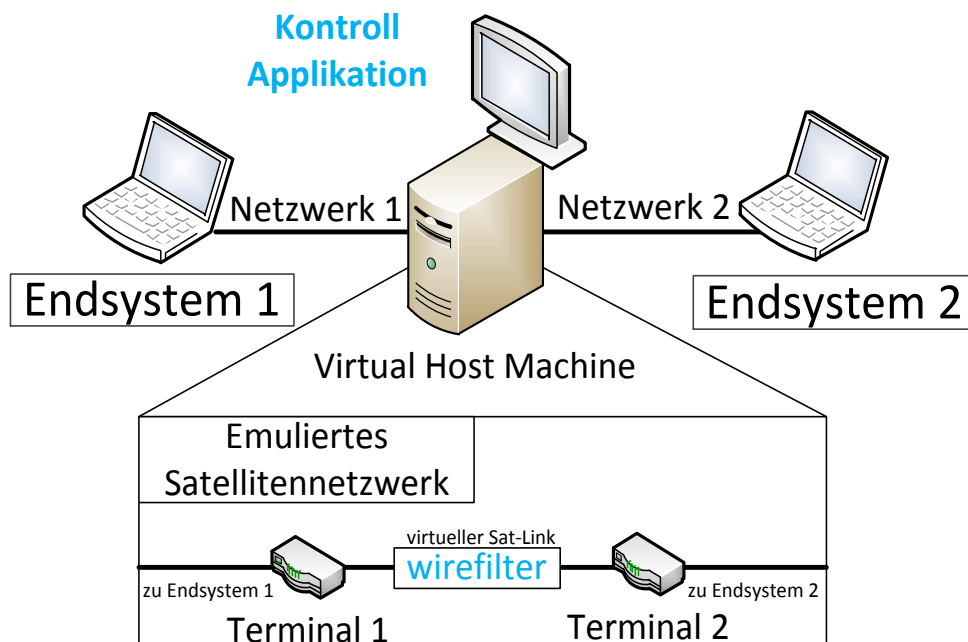


Abbildung 37: Virtuelles Testbed

Um die L3-Funktionalität zu testen, ist somit eine Inbetriebnahme des MoSaKa-Gesamtsystems nicht erforderlich, was eine deutlich größere Flexibilität bei Tests und Demonstration erlaubt. Der Funktionstest des Crosslayeraustausches (zu Schicht 2 und 1) wurde durch einen eigens für die

Testumgebung entwickelten *MAC*-Simulator realisiert. Eine zu Demonstrationszwecken am Fachgebiet erstellte *Voice-over-IP-Video-Chat* Anwendung konnte sowohl auf der EuroView in Würzburg, als auch zur Abschlussdemonstration die Funktionsweise der Ressourcenverwaltung verdeutlichen. Die VoIP-Video-Chat-Anwendung namens *HOMER* zeigte dem Zuschauer das adaptive Verhalten des MoSaKa-Ressourcenverwaltungssystems. Hierzu reserviert HOMER zu einem Kommunikationspartner Ressourcen zur Übertragung von Videodaten und Audiodaten. Im Laufe der Übertragung der Datenströme wurde die Kapazität des virtuellen Satellitenlinks an den Satellitenterminals reduziert. Das MoSaKa QoS-System signalisiert daraufhin der Anwendung, dass die Reservierung vom Videodatenstrom angehalten wurde. *HOMER* reagiert daraufhin mit einer entsprechenden Meldung der vorliegenden Datenübermittlungseinschränkung, während der Audiodatenstrom weiterhin reserviert bleibt und keinerlei Störungen zeigt. Nach Wiederherstellung der ursprünglichen Kapazität des Satellitenlinks an den Satellitenterminals signalisiert das QoS-System die Wiederaufnahme der Reservierung des Videodatenstromes, woraufhin *HOMER* mit einer sofortigen Wiederaufnahme der störungsfreien Videoübertragung reagiert.

Um dem Betrachter einen technischen Überblick über die Funktionsweise des Systems zu ermöglichen, wurde eine grafische Oberfläche für die Testumgebung realisiert. Abbildung 38 zeigt einen *Screenshot* der Kontrollapplikation.

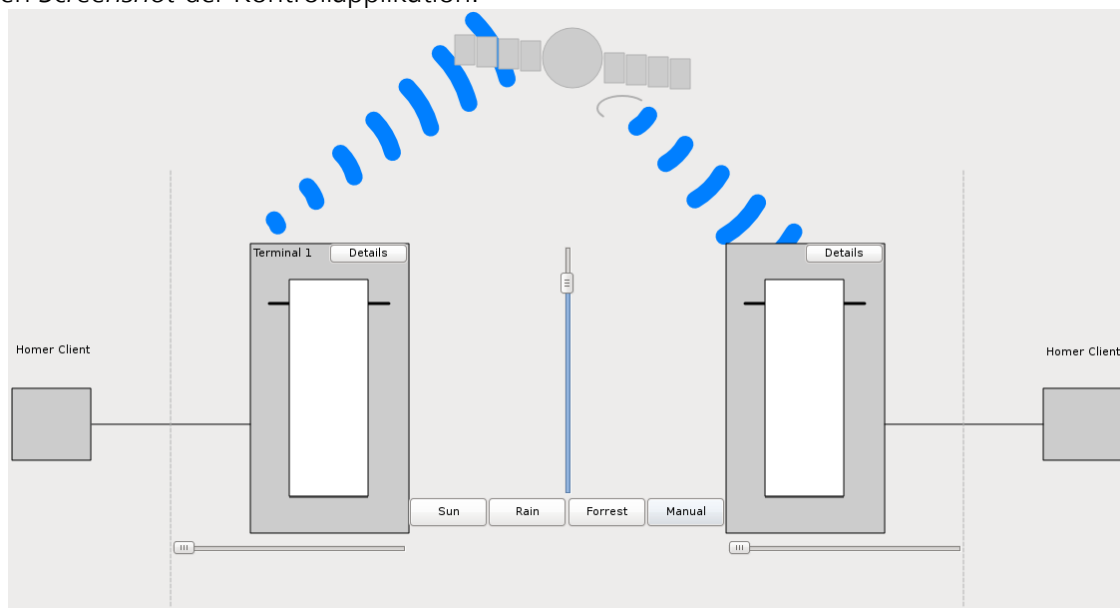


Abbildung 38: Kontrollapplikation zur Steuerung des virtuellen Satellitenlinks

Mit dieser lassen sich verschiedene Aspekte der Ressourcennutzung verdeutlichen und die emulierte Umgebung steuern [25]. Für die Erfassung von Messreihen wurden eigene *Traffic*-Generatoren entwickelt, welche die QoS-API zur Interaktion mit dem MoSaKa Ressourcenverwaltungssystem implementieren.

Zur Evaluierung des Gesamtsystems steht die Versuchsanlage des Fraunhofer IIS am Vogelherd in Ilmenau zur Verfügung. Im Rahmen des MoSaKa-Projektes entstand ein vollständiger Versuchsaufbau mit allen notwendigen Hardwarekomponenten zur Inbetriebnahme des MoSaKa-Systems. Diese wurde dem Publikum am 30-31.07.2012 vorgestellt.

### Wissenschaftliche Ergebnisse

Im Rahmen des MoSaKa Projektes entwickelte das Fachgebiet IKS ein dezentrales Ressourcenverwaltungssystem mit bedarfsgerechter Zuweisung von Ressourcen. Wissenschaftliche Neue-

rungen zum Ressourcenverwaltungssystem entstanden durch die Herausforderungen der hohen Signallaufzeiten und wechselnden Linkeigenschaften. Als besonders hervorzuheben gilt, dass das Ressourcenverwaltungssystem die Umsetzung von Ende-zu-Ende QoS Garantien in Satellitensystemen mit wechselnden Linkeigenschaften realisiert. Die enge Verzahnung des Ressourcenreservierungsprozesses über Layer 3/2 und 1 und unter zu Hilfenahme des Cross-Layer-Ansatzes agiert das Ressourcenverwaltungssystem völlig dezentral. Darauf aufbauend nutzt das System zur Adaption der wechselnden Linkeigenschaften den eingeführten Feedbackmechanismus. Dieser erlaubt es aktive Reservierungen im System auszusetzen und wieder aufzunehmen. Durch Einbeziehungen der Anwendungen in den Feedbackmechanismus werden erneute Reservierungsabläufe vermieden. Zur Entscheidungsfindung bei Reservierungsverletzungen nutzt das QoS-System einen entwickelten Optimierer der nach Prioritäten entscheidet welche Reservierungen im System pausiert oder wiederaufgenommen werden. Hinsichtlich der hohen Signallaufzeiten nutzt das QoS-System ein neu entwickeltes Signalisierungsprotokoll, welches durch reduzierte *Handshakes* den zeitlichen Abläufen des Nachrichtenaustausches entgegenwirkt.

## 2.1.5 Terminal ODU

### 2.1.5.1 Antennen und Transceiver-Frontend (Ka-Band)

#### High-Gain Antenne mit Conical Scan Nachführung

Die MoSaKa Berichte „Systemanforderungen und Einsatzszenarien“ (AP 2100) und „Gesamtarchitektur des satellitenbasierten Übertragungssystems“ (AP 2200) dokumentieren, dass für die *High-Gain* Antenne insbesondere eine hohe Datenrate für die Übertragung von Informationen aus und in das Krisengebiet gefordert wird. Die Möglichkeit, die Antenne in mobilen Szenarien verwenden zu können ist wünschenswert. Diese Anforderungen führten zu dem Ansatz, eine Parabolantenne mit zugehörigem elektrischen Positionierer zu verwenden um den hohen Gewinn zur Realisierung der hohen Datenrate zu erzeugen.

In der ersten Projektphase wurde ein bestehendes Ku-Band Terminal, welches für maritim mobile Einsätze konzipiert war, auf die Verwendung im Ka-Band angepasst. Dafür wurde die Umsetztechnik der Antenne durch einen Ka-Band Transceiver und ein im Rahmen des Vorhabens speziell entworfenes Speisehorn für den geänderten Frequenzbereich ersetzt und auf bidirektionalen Betrieb erweitert. Die Antenne verwendet lineare Polarisation, welche durch eine dritte Drehachse am Positionierer justiert werden kann. Die Nachführung der Antennenausrichtung erfolgt mittels eines mechanischen *Conical-Scan* Verfahrens [26]. Der Subreflektor der Cassegrain-Antenne wurde durch einen mittels Elektromotor schnell drehbaren und leicht verkippten Subreflektor ausgetauscht. Das bewirkt die Rotation einer leicht zur Symmetrieachse der Antenne verkippten Hauptkeule im Richtdiagramm, welche Informationen über eine Fehlausrichtung zum gewünschten Satelliten erfassbar und nachführbar macht.

Für die Realisierung des Transceiver *frontends* hat sich die Nutzung von Sendeempfängern der Firma ViaSat als günstig erwiesen. Diese Module kommen im SurfBeam Satellitenkommunikationssystem von ViaSat zum Einsatz und sind in ihrer Anschaffung sehr günstig, da sie inzwischen als Massenprodukt verfügbar sind [27]. Die technischen Daten dieser Umsetzer sind in Tabelle 7 aufgelistet. Das Modul bietet zudem den Vorteil, dass Empfangs- und Sendepfad in einem sehr kompakten und leichten Modul vereint sind, wodurch auch die Verwendung mehrerer dieser Geräte für eine Satelliten-Terminal *Outdoor Unit* möglich ist.

Tabelle 7: Technische Daten des ViaSat Ka-Band Transceivers für das HG Antennensystem

RX RF / TX RF	19,7-20,2 GHz / 29,5-30,0 GHz
RX IF / TX IF	1,0-1,5 GHz / 1,8-2,3 GHz
Rauschzahl	1,4 dB
Maximale Sendeleistung	3 W
Umsetzungsgewinn	52 - 62 dB
Abmessungen (LxBxH)	183 mm x 107 mm x 50 mm
Gewicht	0,7 kg
Synchronisation	manuell
<i>Transmit Mute Control</i>	10 MHz (Max. TX-Zeit am Stück: 1s)
Stromversorgung	24 - 32 V, < 44 W

Für die Umsetzung der *Conical-Scan* Nachführmethode wurde eine analoge Schaltung zur Auswertung der Trackinginformationen (siehe Abbildung 39) aufgebaut. Dieser Phasendiskriminator vergleicht die durch den *Conical Scan* bei Abweichung von der Satellitenrichtung entstehende Amplitudenmodulation in Betrag und Phase mit einem Referenzsignal, welches synchron zur Rotation des Subreflektors ist. Dadurch werden zwei Fehlerspannungen generiert, welche einer Abweichung von der Satellitenrichtung in Azimut und Elevation entsprechen. Damit steht ein mechanisch arbeitendes Ka-Band Nachführsystem mit einer Wiederholrate von 70 Hz für praktische Tests zur Verfügung.

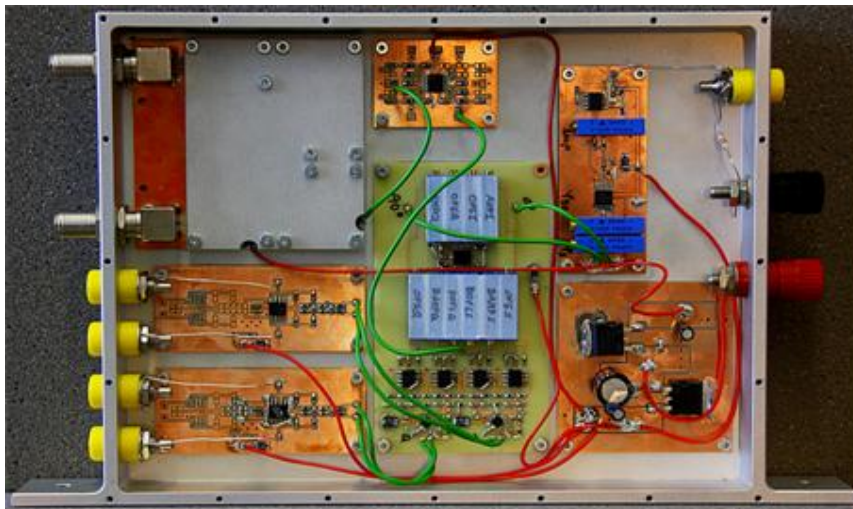


Abbildung 39: Analoge Schaltung zur Auswertung des *Conical-Scan* Trackingverfahrens

Die durch die Schaltung erzeugten Fehlerspannungen besitzen Maximalwerte von etwa -2 V und +2 V differentiell. Ist die Antenne optimal auf den Satelliten ausgerichtet, betragen die Spannungen jeweils 0 V. Zeigt die Antenne mehr als 2° neben den Satelliten, so sind die Fehlerspannungen ebenfalls 0 V. Der gemessene Verlauf für die Abweichungen in der Elevationsebene bei Winkelwerten zwischen 0 und 2 Grad ist in Abbildung 40 zu sehen.



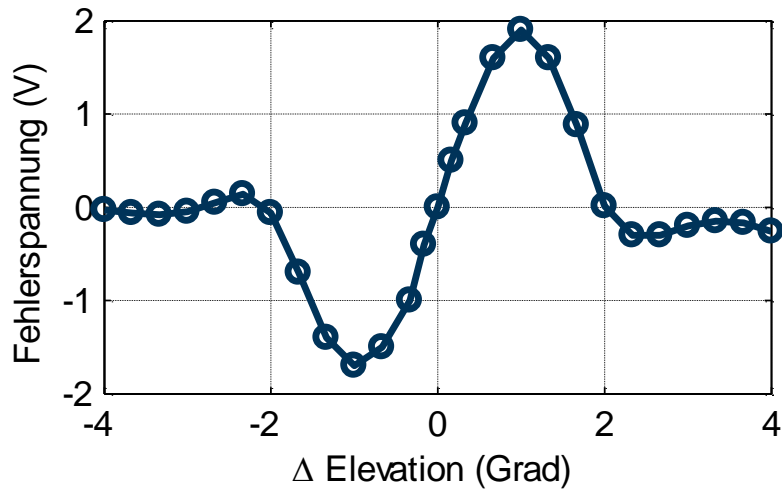


Abbildung 40: Zusammenhang zwischen elektrischer Stellgröße und Ablage der Hauptstrahlrichtung vom Satelliten in der Elevation

Das Funktionsprinzip für eine mobile *Conical Scan* Nachführung ist in Abbildung 41 zu sehen. Der Phasendiskriminator wird in die Empfangsleitung auf der Zwischenfrequenzebene eingefügt und erzeugt Fehlersignale, welche vom Regelkreis des Positionierers für dessen Nachführung in Satellitenrichtung verwendet werden. Diese Signale stellen somit eine wichtige Schnittstelle zum AP 5300 (Trackingverfahren) dar.

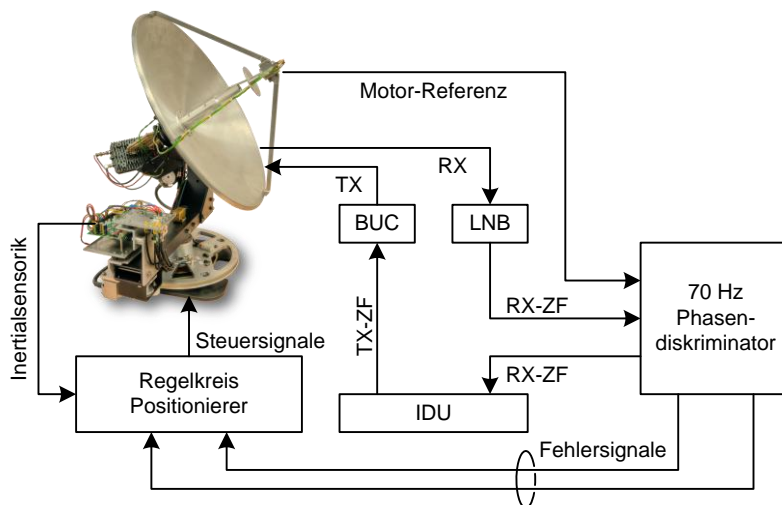


Abbildung 41: Funktionsprinzip der *Conical-Scan* Nachführung

Zur Bestimmung der Richtcharakteristik der *High-Gain* Antenne wurden sphärische Nahfeldmessungen mit anschließender Nahfeld-Fernfeld-Transformation durchgeführt [28]. Das Ergebnis für das Richtdiagramm der Parabolantenne ist in Abbildung 42 zu sehen, die Antenne besitzt einen realisierten Gewinn von etwa 37,5 dBi im Empfangs- und etwa 39 dBi im Sendefall. Das Diagramm zeigt auch die Verkippung der Hauptstrahlrichtung um ca.  $-0,3^\circ$ , welche für die *Conical-Scan* Nachführungsmethode benötigt wird.

Diese Variante der *High-Gain* Antenne konnte im Jahr 2010 bei einer internationalen Konferenz vorgestellt werden [29].

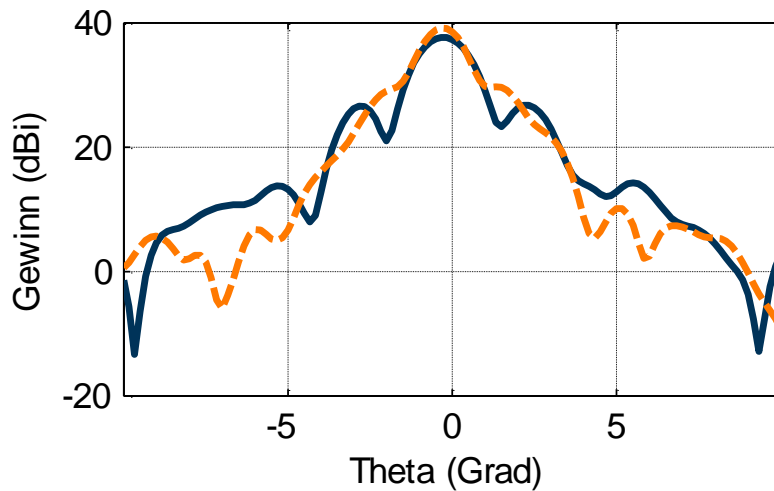


Abbildung 42: Gemessene Richtdiagramme der *High-Gain* Antenne mit *Conical Scan* für den Empfangsbereich bei 20 GHz (blau) und den Sendebereich bei 30 GHz (orange gestrichelt).

### High-Gain Antenne mit Multimode Monopuls Nachführung

Im weiteren Verlauf des Projekts wurde eine zweite Variante der *High-Gain* Antenne entworfen, welche umfänglich auf einer Eigenentwicklung basiert. Hierbei kommt eine für die Verwendung im Ka-Band konzipierte Cassegrain-Antenne von QuinStar zum Einsatz. Auch hier wurde eine für das MoSaKa-Terminal angepasste Speisestruktur entworfen und gefertigt. Für die Nachführung dieser Antenne kommt ein Nachführprinzip zum Einsatz, welches auf mechanisch bewegte Elemente verzichtet und stattdessen die Ausprägung höherer Moden im Rundhohlleiter nutzt. Dadurch sowie durch die Verwendung zirkularer Polarisation ist es möglich, die Anzahl der beweglichen Teile der *Outdoor Unit* signifikant zu reduzieren, da der Subreflektor starr angebracht werden kann und die Polarisations-Drehachse bei zirkularer Polarisation überflüssig wird. Für den Positionierer verbleiben somit nur die Azimut- und die Elevations-Achse als mechanisch bewegte Elemente.



Abbildung 43: Foto der speziell für MoSaKa entwickelten *High-Gain Outdoor-Unit* mit angedeutetem Radom ( $\varnothing$  80 cm x 100 cm)

Der für diese Variante der *High-Gain* Antenne benötigte Positionierer wurde von der Firma iMAR nach den für das MoSaKa Terminal benötigten Spezifikationen im Rahmen eines Unterauftrages hergestellt und erweist sich als dynamische Plattform für mobile Satellitenkommunikation (Abbildung 43). Der Positionierer kann eine Nutzlast von bis zu 12,5 kg mit einer Winkelbeschleunigung von mehr als  $300^\circ/s^2$  auf eine Winkelgeschwindigkeit von über  $300^\circ/s$  beschleunigen. Diese Dynamik ist nach aktuellem Stand der Erkenntnisse auch für den landmobilen Einsatz in schwerem Gelände ausreichend. Die Verwendung von hochauflösenden Winkelgebern ermöglicht eine Positionier-Wiederholgenauigkeit von 5'', wodurch die Nachführung der Antenne nicht nur sehr schnell sondern auch hochpräzise ausgeführt werden kann.

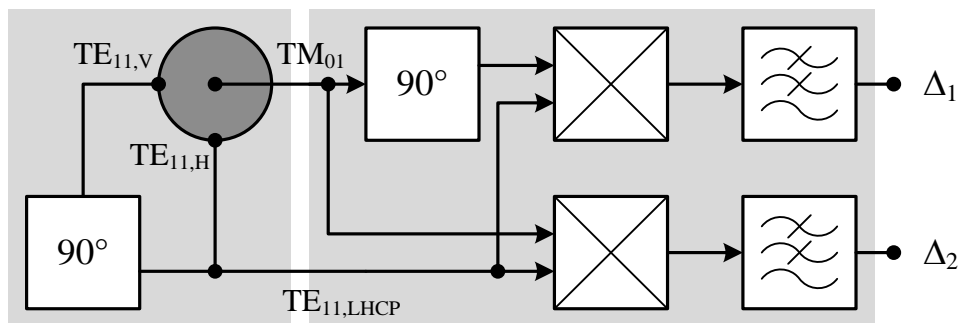


Abbildung 44: Blockschaltbild des Nachführsystems mit Modenkoppler und Phasendiskriminator

Das hier verwendete Trackingprinzip ist eine Form des Multimode Monopuls Trackings [26, 30, 31] bei der die Ausprägung des  $TM_{01}$  Modes für die Generierung von Fehlersignalen verwendet wird. Die Richtcharakteristik der  $TM_{01}$  gespeisten Parabolantenne besitzt eine Nullstelle in der Richtung des höchsten Gewinns, wenn die Antenne mit dem Grundmode  $TE_{11}$  gespeist wird. Ist die Antenne optimal auf den Satelliten ausgerichtet, befindet sich die Nullstelle im Tracking-Richtdiagramm genau in Richtung Satellit, sodass in diesem Pfad keine Leistung empfangen wird. Die Fehlersignale können durch einen Vergleich der in beiden Pfaden empfangenen Signale in Amplitude und Phase abgeleitet werden. Dieser Prozess wird durch einen Phasendiskriminator, welcher auf der Zwischenfrequenz-Ebene im L-Band arbeitet, durchgeführt (Abbildung 44). Diese Schaltung (Abbildung 45) liefert zwei differentielle Ausgangsspannungen, welche sich für kleine Winkel proportional zur Abweichung von der Satellitenrichtung in zwei orthogonalen Ebenen verhalten. Dies gilt für einen Bereich von etwa  $\pm 1^\circ$  zur Satelliten-Richtung, ab einem Winkel von  $\pm 2^\circ$  liefert der Diskriminator keine Fehlersignale mehr. Abweichungen, die außerhalb dieses Detektionsbereichs liegen, müssen durch andere Mechanismen, wie beispielsweise gyrostabilisierte Inertialsensoren, gemessen werden.

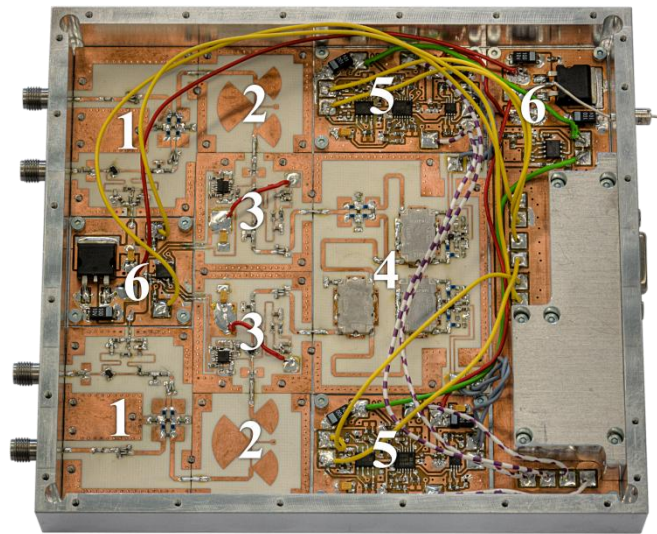


Abbildung 45: Foto des Phasendiskriminators bestehend aus Leistungsteilern (1), Filtern (2), Verstärkern (3), I/Q-Mischer (4), Differenzverstärkern (5) und Spannungsversorgungen (6)

Auch für diese Antennenvariante kommen die Transceiver von ViaSat zum Einsatz. Eine Herausforderung bei der Verwendung der Umsetzer war, dass sie keine Anschlüsse für eine gemeinsame Referenzfrequenz besitzen; für die Umsetzung des Multimode Monopuls Verfahrens ist allerdings die Verwendung von frequenzsynchroner Umsetztechnik zwingend notwendig. Durch Einbringen einer Feldsonde in die Resonatorchamber des Lokaloszillators wurde es möglich, die Oszillatoren per Koaxialkabel direkt miteinander zu koppeln. Diese Technik führt zu einer sehr stabilen Frequenzsynchronisation von mehreren Umsetzern.

Abbildung 46 zeigt die gemessenen Fehlerspannungen, welche der Phasendiskriminator für die Antennennachführung bereitstellt. Die Spannungen ergeben jeweils 0 V, wenn die Antenne direkt auf den Satellit zeigt, oder die Satellitenrichtung außerhalb des detektierbaren Bereichs von ca.  $\pm 2^\circ$  liegt. Die Messung wurde an der Fraunhofer IIS Testanlage in Ilmenau durchgeführt und zeigt das Verhalten der von der Schaltung generierten Fehlersignale bei Abweichungen der Antennenausrichtung relativ zur Richtung der Satellitennutzlast auf dem Antennenturm.

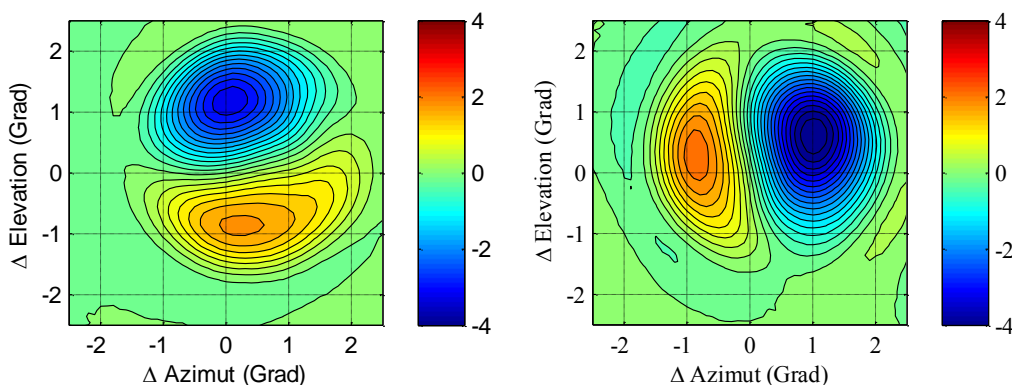


Abbildung 46: Gemessene Fehlerspannungen in Volt für die beiden Ausgänge des L-Band Phasendiskriminators in der Azimut-Elevation Ebene relativ zur Richtung des Satelliten

Abbildung 47 zeigt den prinzipiellen Aufbau der *Outdoor Unit* mit Multimode Monopuls Nachführung. Die beiden Empfangssignale, welche die Antenne liefert, werden dem Phasendiskriminator zugeführt, welcher daraus die Fehlersignale generiert. Das Empfangssignal aus dem TE<sub>11</sub>

Mode wird vom Phasendiskriminator an die *Indoor-Unit* weitergeleitet. Mit Hilfe der Fehlersignale und Sensorinformationen aus der MEMS-basierten Inertialsensorik steuert der Regelkreis den Antennenpositionierer in der Form, dass die Antenne während der Bewegung des Trägerfahrzeugs auf den Satelliten ausgerichtet bleibt.

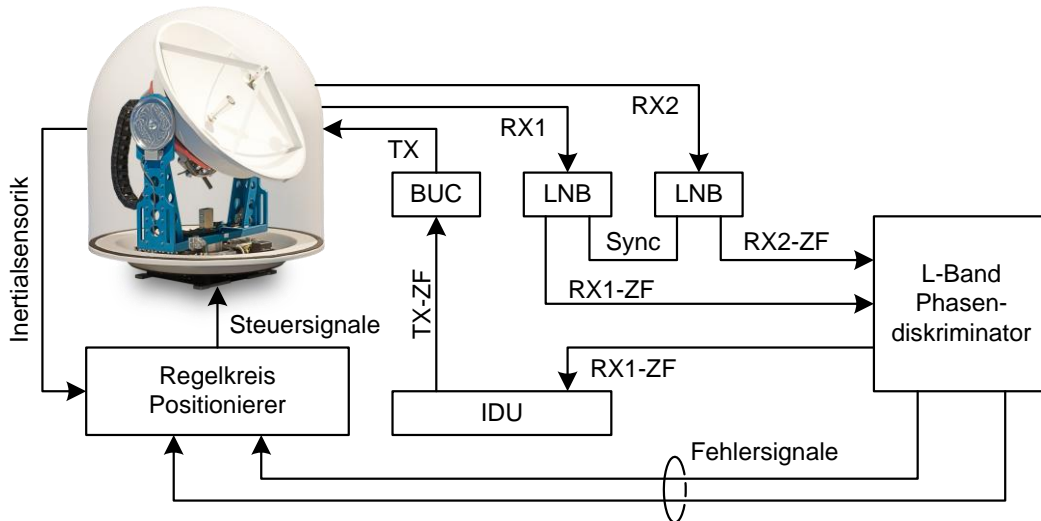


Abbildung 47: Funktionsprinzip der Multimode Monopuls Nachführung

Zur Erzeugung der für das Multimode Monopuls Verfahren benötigten Hohlleitermoden wurde ein spezieller Koppler entwickelt, welcher zirkulare Polarisation mit beiden Drehrichtungen für den Downlink- wie auch den Uplink-Frequenzbereich zur Verfügung stellt. Außerdem ermöglicht der Koppler den Empfang von Signalen, welche in den  $TM_{01}$  Mode einkoppeln und zur Generierung der Fehlersignale benötigt werden.

Im Projektverlauf wurde zunächst eine reine Empfangs-Variante entworfen und aufgebaut, um das Prinzip zu testen und die Verwendbarkeit für MoSaKa nachzuweisen [32]. Dieser Koppler wurde dann in eine Dualband-Lösung überführt, welche auch für den Sendefall einsetzbar ist [33].

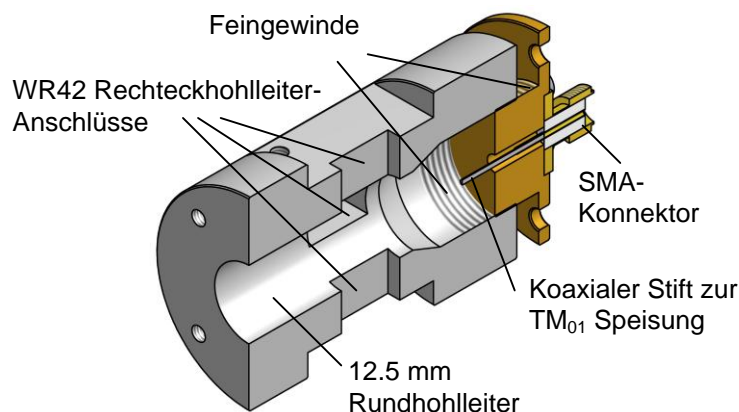


Abbildung 48: Modenkoppler für 20 GHz

Die Basis für den Koppler in beiden Ausführungen bildet das Modul aus Abbildung 48, bei dem der  $TE_{11}$  Mode im Rundhohlleiter von seitlich angebrachten WR42 Rechteckhohlleitern angeregt wird. Der für die Nachführung benötigte  $TM_{01}$  Mode wird durch einen koaxialen Stift, welcher mit einem SMA-Konnektor verbunden ist, ausgeprägt. Abbildung 49 zeigt das für die Speisung von zirkularer Polarisation bei 20 GHz benötigte Speisernetzwerk zu diesem Koppler. Das Netz-

werk besitzt zwei getrennte Hohlleiteranschlüsse für LHCP (Left Hand Circular Polarisation) und RHCP (Right Hand Circular Polarisation). Dadurch ist ein Umschalten zwischen bzw. der gleichzeitige Betrieb von beiden Polarisationen möglich.

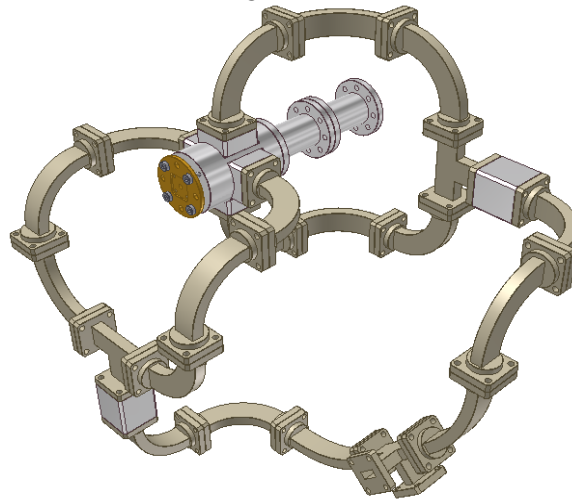


Abbildung 49: Monoband-Ausführung des  $TM_{01}$ -Modenkopplers mit Hohlleiter-Speisenetzwerk

Nachdem die Funktionalität des Monoband-Kopplers gezeigt werden konnte, wurde die Speisestruktur für die Verwendung im Uplink-Band erweitert. Hierbei kommt ein Diplexer zum Einsatz, welcher den  $TE_{11}$  Mode im Rundhohlleiter über den  $TE_{20}$  Mode im WR42 Rechteckhohlleiter Einkoppelt. Dies geschieht über den Rechteckhohlleiter, welcher bereits für die Speisung des Empfangspfades verwendet wird. Um den benötigten Bauraum zu minimieren, wurde die Einspeisung von Rechteck- zu Rundhohlleiter nicht symmetrisch von je zwei Seiten wie beim Monoband-Koppler realisiert, sondern durch eine Einspeisung von je nur einer Seite ersetzt. Die Erzeugung der zirkularen Polarisation geschieht hier durch die Speisung von vertikaler und horizontaler Polarisation mit einem Phasenversatz von  $\pm 90^\circ$ . Da auch beim Dualband-Koppler zur Verteilung der Signale auf die beiden linearen Komponenten eine Hohlleiterverzweigung (Magic Tee) verwendet werden kann, ist hier ebenfalls die Generierung von beiden zirkularen Polarisationen möglich. Abbildung 50 zeigt ein Foto des Dualband-Modenkopplers im Antennenmesslabor der TU Ilmenau.

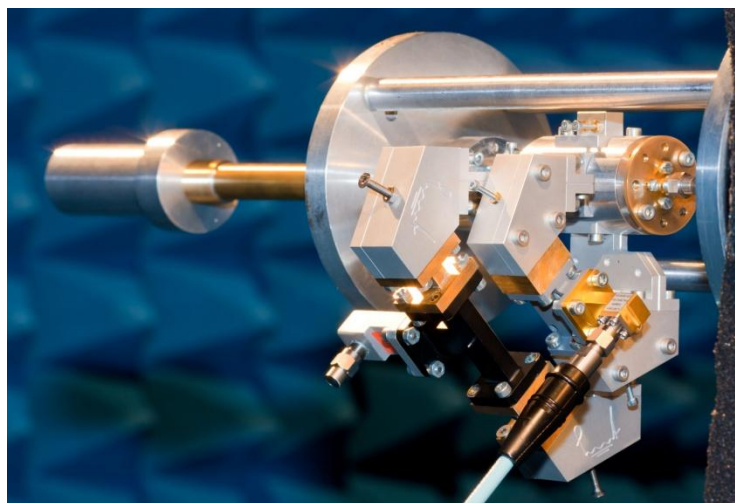


Abbildung 50: Dualband-Koppler (Up- und Down-Link) für Multimode Monopuls Nachführung im Ka-Band

Eine Messung der beiden Empfangs-Richtdiagramme ist in Abbildung 51 dargestellt. Die Nullstelle in der durch den  $TM_{01}$  Mode erzeugten Richtcharakteristik ist deutlich zu sehen, sie befindet sich erwartungsgemäß in der Richtung des maximalen Gewinns bei Speisung mit dem  $TE_{11}$  Mode für die Kommunikation. Die Antenne weist einen Gewinn von etwa 38 dBi bei 20 GHz und 40 dBi für den Sendebereich bei 30 GHz auf.

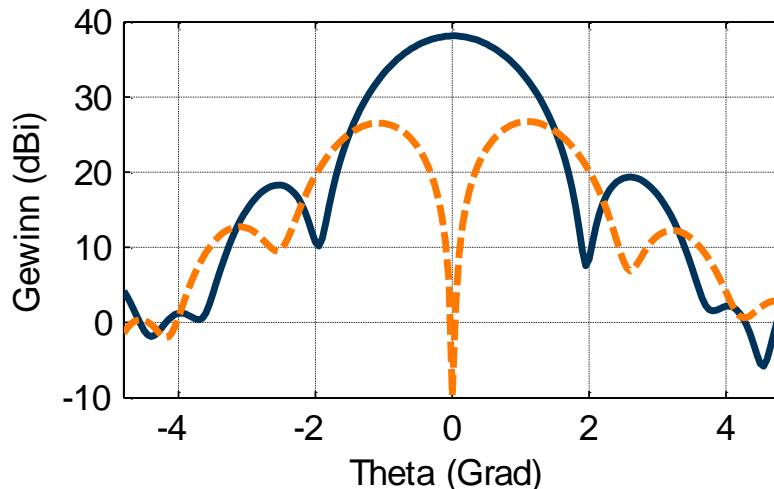


Abbildung 51: Gemessene Richtdiagramme der HG-Antenne gespeist mit dem  $TE_{11}$  Mode für Kommunikation (blau) und mit dem  $TM_{01}$  Mode für die Nachführung (orange gestrichelt) bei 20 GHz.

### Low-Profile Antenne - Konzept

Zu Projektbeginn wurde eine umfassende Ermittlung und Bewertung geeigneter Umsetzungsstrategien für nachführbare kompakte Gruppenantennen geringer Bauhöhe unter dem Gesichtspunkt einfacher Technologien vorgenommen. Hauptsächlich wurden folgende Realisierungsansätze untersucht und unter den für MoSaKa relevanten Gesichtspunkten bewertet:

- Mechanische Nachführung von Azimut und Elevation
- Phasengesteuerte Gruppenantennen (*Phased Arrays*)
- Elektronische Nachführung von Azimut und Elevation
- Hybrider Ansatz: mechanische Nachführung von Azimut und elektronische Nachführung der Elevation
- *Reflectarray* Antennen
- Rekonfigurierbare Antennen
- Fabry-Perot / PRS Antennen (*Partially Reflective Surface*)
- *Array-Lens* Antennen

Eine denkbare Umsetzungsstrategie für eine *Low-Profile* Antenne stellt die mechanische Nachführung des Azimuts mittels Positionierer und die mechanische Nachführung der Elevation über Neigung, zum Beispiel von mehreren Antennen-Paneelen geringer Bauhöhe, dar. Ein solcher Ansatz wird vom Unternehmen *RaySat* mit seiner Produktreihe *StealthRay* bzw. *EagleRay* für das Ku-Band verfolgt [34]. Bei diesem in Abbildung 52 dargestellten Grundprinzip wird deutlich, dass drei Paneele für den Empfangsfall bei 12 GHz und ein Paneel für den Sendefall bei 14 GHz zur Verfügung stehen. Phasenstellglieder sind lediglich für die konstruktive Signalzusammenführung der Einzel-Paneele erforderlich und nicht für jedes einzelne Strahlerelement. Die mechanische Neigung und die elektronische Phasenstellung pro Paneel ermöglichen die Einstellung der

Elevation. Diese Antenne deckt einen Elevationsbereich von  $30^{\circ}$ - $70^{\circ}$  ab, welcher eher für die Nutzung von geostationären Satelliten von entsprechend äquaturnahen Breitengraden aus vorgesehen ist. Bei neigbaren hintereinander aufgestellten Antennenaperturen stellt es sich generell schwierig dar, auch niedrige Erhebungswinkel über dem Horizont zu erzielen.

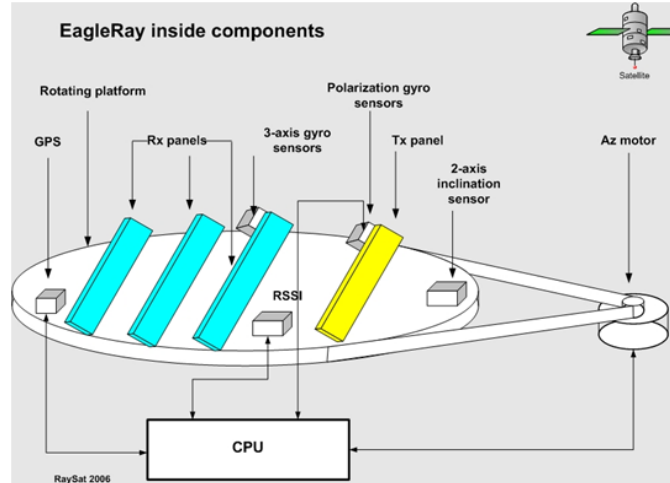


Abbildung 52: Ku-Band Satellitenantennenkonzept der Firma RaySat mit mechanisch neigbaren Paneelen [34]

Eine Schwierigkeit des vorgestellten Prinzips zeigt sich in der Verwendung einer geeigneten Antennenapertur. Bei der Verwendung eines leitungs gespeisten *Patch-Arrays* kommt es bei einer großen Anzahl von Einzelementen zu einer hohen Komplexität und Leistungsdämpfung im Speisetzwerk, was den Wirkungsgrad einer solchen Antenne beträchtlich verringert. Wenn man davon ausgeht, dass ein *Patch*-Einzelement einen Gewinn von 5 dBi zu realisieren vermag, so benötigt man 200 *Patch*-Elemente, um beispielsweise einen Gewinn von 28 dBi zu erreichen, ohne dass Speiseleitungsverluste berücksichtigt sind. Dieser Antennentyp wurde deshalb für die *Low-Profile* Antenne nicht in Erwägung gezogen.

Eine alternative Möglichkeit zur Realisierung einer Antennenapertur wäre ein Hohlleiter gespeistes Schlitzstrahler-Array (*Slotted Waveguide*) [35]. Diese Art der Speisung ist auch noch bei sehr vielen Strahlerelementen und langen Leitungen äußerst verlustarm. Als eine weitere Variante ohne ein kompliziertes Speiseleitungsnetzwerk wurde eine strahlungsgekoppelte Antennenapertur - zum Beispiel eine *Partially Reflective Surface* (PRS) – in Betracht gezogen [36, 37]. Hierbei kommt es zur Abstrahlung einer Leckwelle entlang einer zweidimensional periodisch fortgesetzten Struktur. Die Anregung erfolgt über einen Primärstrahler unterhalb der PRS, welcher als *Patch*-Antenne, Dipol, Schlitzstrahler oder offenes Hohlleiterende realisiert werden kann. Eine ähnliche Umsetzungsstrategie ist auch unter der Bezeichnung Fabry-Perot Antenne bekannt [38]. Hierbei wird eine periodisch fortgesetzte frequenzselektive Oberfläche (FSS – *Frequency Selective Surface*) oberhalb eines strahlungsgespeisten Hohlraumes angeregt und vermag auf diese Weise hohe Gewinne zu erzielen.

Für die Zielstellung im Projekt MoSaKa kamen in Azimut und Elevation elektronisch nachführbare *Phased Array* Antennen, wie in [39, 40, 41, 42] beschrieben, nicht in Frage. Diese vollständig digital strahlformenden (DBF) Antennen gehen bezüglich Komplexität und Leistungsaufnahme deutlich an den Forderungen des Projektes MoSaKa nach einfachen und kostengünstigen Technologien vorbei. Für die vollständige elektronische Formung und Nachführung der Antennenrichtcharakteristik benötigt jedes Einzelstrahlerelement ein eigenes Frontend, welches die Arbeitsfrequenz in eine niedrigere Frequenzlage umsetzt und entweder vor oder nach der Umsetzung die Phase entsprechend der Strahlrichtung variiert. Um derartiges zu realisieren, müssen



MMIC-Technologien (*Monolithic Microwave Integrated Circuit*) eingesetzt werden, und es kommt zu einem hohen Aufwand an rechnergestützter Steuerung und zu komplexen Speisernetzwerken. Bei manchen dieser DBF-Arrays entstehen weitere Probleme aufgrund der Abführung von Wärmeenergie, was zu zusätzlichem Aufwand und erhöhten Kosten führt. Aus diesen Gedanken ergab sich angesichts des von MoSaKa angepeilten Anwendungsbereiches, dass lediglich eine teilweise elektronisch gesteuerte Antenne (hybrider Ansatz) für die Realisierung einer *Low-Profile* Variante in Frage kommt.

Weiterhin wurde recherchiert, inwieweit sich *Reflectarrays* als mögliche Realisierungsansätze für eine *Low-Profile* Antenne eignen. Eine *Reflectarray*-Antenne besteht aus einem Primärstrahler, welcher die Apertur eines planaren, nicht parabolischen, Reflektors ausleuchtet, um so eine starke Strahlbündelung zu erzielen [43]. Eine solche Apertur mit den Abmessungen vieler Wellenlängen besteht aus einem Array resonanter strahlungsgekoppelter Einzelemente (z.B. *Patches*), welche eine bestimmte Reflexionsphase aufweisen. Mit Hilfe dieser Reflexionsphase wird der Strahlengang einer parabolischen Reflektorantenne nachgebildet. Durch geschicktes Verändern der Reflexionsphase dieser Einzelemente kann die Richtcharakteristik beeinflusst werden. Hierbei ist die Steuerung und Variation der Reflexionseigenschaften erforderlich, welche über Schalter (MEMS) oder veränderliche Kapazitäten (Varaktordioden) realisiert werden kann. Nachteilig wirkt sich die Dämpfung der Hochfrequenzleistung aus, die dann an jedem der vielen notwendigen Phasenstellglieder entsteht und somit zu einer schlechten Strahlungseffizienz der Antenne führt. Ein weiterer Nachteil dieses Ansatzes der Strahlformung ist die entstehende hohe Komplexität, wenn hunderte Einzelemente mit Phasenstellern ausgestattet werden, die mehrere Steuerleitungen benötigen.

Eine herkömmliche *Reflectarray*-Konfiguration mit Primärstrahler und Reflektor eignet sich aufgrund ihrer Bauweise und einem relativ großen Abstand des Primärstrahlers zum Reflektor nicht als eine *Low-Profile* Antenne. Es existieren allerdings Ansätze über gefaltete *Reflectarrays*, welche die Forderungen nach geringer Aufbauhöhe erfüllen [44, 45]. Hierbei handelt es sich um einen Aufbau, der aus einem reflektierenden *Patch-Array* und einem darüber liegenden Polarisationsgitter besteht (Abbildung 53). Die resonanten *Patches* sind in Abhängigkeit von ihrer Position im Array und der dadurch notwendigen Reflexionsphase mit unterschiedlicher Geometrie realisiert. Der Primärstrahler (Feed) befindet sich im Zentrum des reflektierenden Arrays und strahlt das Polarisationsgitter mit der linearen Polarisation an, mit der das Feld vollständig reflektiert wird. Die beiden Seitenlängen der resonanten *Patches* sind so entworfen, dass die Orientierung des E-Vektors und damit die Polarisation der Welle bei Reflexion um 90° dreht und auf diese Weise dann das Polarisationsgitter passieren kann.

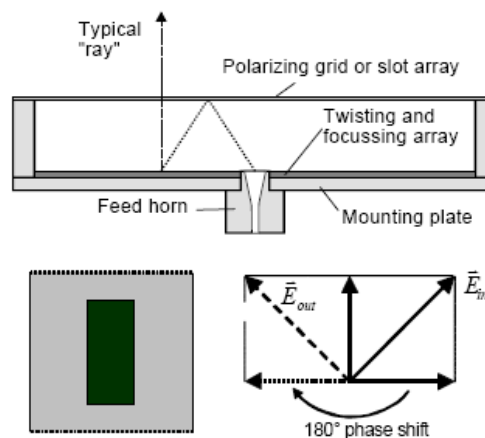


Abbildung 53: Funktionsprinzip eines gefalteten *Reflectarrays* [45]

Um niedrige Erhebungswinkel über dem Horizont (Elevation) zu erreichen, muss das gefaltete *Reflectarray* zusätzlich mechanisch geneigt werden und verliert zunehmend, vor allem bei großen Aperturen, seinen *Low-Profile*-Charakter. Ein großer Nachteil neben dem hohen Designaufwand, den eine solche Antenne mit vielen resonanten Einzelementen mit sich bringt, ist das Unvermögen, die erzeugte lineare Polarisation nachzuführen. Andere Umsetzungsstrategien lassen eine Verwendung zirkularer Polarisation zu, welche für mobile Anwendungsszenarien als zu bevorzugende Variante betrachtet wird. Ein gefaltetes *Reflectarray* ist jedoch aufgrund der Verwendung eines Polarisationsgitters an die Verwendung der linearen Polarisation gebunden.

Weitere untersuchte Ansätze für die Realisierung einer Satellitenterminal-Antenne mit geringer Bauhöhe sind rekonfigurierbare Antennen und *Array-Lens* Antennen [46, 47, 48, 49]. Diese beiden Antennenkonzepte lieferten lediglich Teilaspekte, aber keine Gesamtlösungen, für die Erfüllung der Projektziele. Während bei rekonfigurierbaren Antennen vor allem die Möglichkeit des Umschaltens von vordefinierten Richtcharakteristiken interessant ist, ergibt sich aus der Betrachtung von *Array-Lens* Antennen lediglich der bereits weiter oben vorgestellte Ansatz der strahlungsgekoppelten Aperturen, um Leitungsverluste zu vermeiden. Als *Low-Profile* Antenne kommen *Array-Lens* Konzepte aufgrund des großen Abstandes zwischen Primärstrahler und strahlungsgekoppelter Apertur nicht in Frage.

Nach der Untersuchung und Bewertung verschiedener Umsetzungsstrategien und Realisierungsmöglichkeiten für eine *Low-Profile* Antenne konnte ein geeignetes und weiter zu verfolgendes Antennenkonzept gefunden werden [50, 51].

Aus den MoSaKa Berichten „Systemanforderungen und Einsatzszenarien“ (AP 2100) und „Gesamtarchitektur des satellitenbasierten Übertragungssystems“ (AP 2200) ergibt sich, dass die *Low-Profile* Antenne vor allem auf eine mobile Übertragung mit moderater Datenmengen, wie z.B. Sprach-, Bild- und Positionsdaten, mit einer hohen Zuverlässigkeit ausgelegt werden muss. Eine hohe mobile Zuverlässigkeit kann nur durch eine schnelle und einfache Nachführung einer breiteren Abstrahlcharakteristik erreicht werden, was allerdings auch zu einem niedrigeren Antennengewinn im Vergleich zur *High-Gain* Antenne führt. Aus dem angestrebten Einsatzszenario lässt sich generell das Konzept einer Antenne mit rekonfigurierbarer Abstrahlcharakteristik ableiten. Bei rekonfigurierbaren Antennen existiert vor allem die Möglichkeit des Umschaltens von vordefinierten Richtcharakteristiken. Hierbei werden gemäß Abbildung 54 beispielsweise vier geneigte, aber fest auf einem Azimut-Positionierer installierte, Antennen-Paneele verwendet, welche mit ihren Richtcharakteristiken den notwendigen Elevationsbereich abdecken. Es handelt sich um einen modularen Ansatz, bei dem eine unterschiedliche Anzahl von Paneelen mit der Abdeckung des von der Einsatzregion abhängigen Elevationsbereiches denkbar ist. Mit geneigten Antennenaperturen sind vor allem auch niedrige Erhebungswinkel über dem Horizont erzielbar, wobei hier immer ein Kompromiss zwischen erreichbarem Gewinn und Aufbauhöhe der Antenne gefunden werden muss. Für den mobilen Anwendungsfall bietet sich die Verwendung von zirkularer Polarisation an, bei der im Gegensatz zur linearen Polarisation die dritte nachzuführende Drehachse entfällt. Aufbau und Komplexität einer Antenne mit geringer Aufbauhöhe werden dadurch erheblich vereinfacht. Darüber hinaus orientieren sich aktuell verwendete satellitenseitige Antennenkonzepte im Ka-Band ebenfalls an zirkularer Polarisation. Um eine möglichst kompakte Antenne für das Ka-Band zu entwickeln, beinhaltet das Konzept die Ausnutzung einer gemeinsamen Antennenapertur für sowohl den Empfangs- als auch den Sendefall bei 20 bzw. 30 GHz. Jedes der unterschiedlich geneigten dualbandigen Antennenpaneele ist für die parallele Umsetzung der Empfangs- und der Sendesignale mit der entsprechenden Anzahl an Konverter-Modulen verbunden, welche die umgesetzte L-Band Zwischenfrequenzlage für die Terminal-Inneneinheit (*Indoor-Unit*) bereitstellen. Neben einem GPS-Empfänger befindet sich auf dem Azimut-Positionierer eine Inertialsensorik, bestehend aus Kreiselkompass, Magnetometer

und Beschleunigungsmesser. Die Gesamthöhe aller Nutzlastaufbauten auf dem Positionierer beträgt weniger als 15 cm.

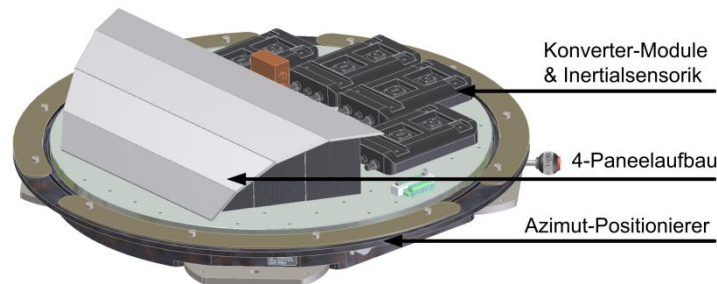


Abbildung 54: Realisierungsbeispiel einer *Low-Profile* Antenne mit vier unterschiedlich geneigten und fixierten Antennenpaneelen

Das Antennenkonzept verfolgt einen hybriden Ansatz für die Strahlnachführung. Neben der mechanischen Nachführung im Azimut durch Kenntnis der eigenen Lage, gestützt durch die entsprechende Inertialsensorik und GPS-Informationen, werden wie in Abbildung 55 dargestellt die Empfangssignale aller Antennenpaneel (Subaperturen) parallel in die Zwischenfrequenzlage und in das Basisband umgesetzt. Sie stehen dort dem Signalverarbeitungsverfahren *Maximum Ratio Combining* (MRC) [52] zur Verfügung. Die Nachführung der Elevation erfolgt elektronisch über die Auswahl des optimalen parallel ins Basisband umgesetzten Kanals. *Maximum Ratio Combining* kann gerade im Überschneidungsbereich mehrerer Paneel-Richtdiagramme, in Richtungen mit geringerer Direktivität, einen Kombinationsgewinn ermöglichen. Auf diese Weise werden immer die Signalpfadkombinationen ausgewählt, welche das bestmögliche Signal-Rausch Verhältnis ermöglichen. Mit Hilfe der durch die Empfangssignale gewonnenen MRC-Koeffizienten kann im Sinne einer geschlossenen Regelschleife (*Closed-Loop Tracking*) eine entsprechende Belegung bzw. Zuschaltung der Sendeaperturen erfolgen, sodass auch im Sendefall der Strahl korrekt ausgerichtet ist. Für den vollen Funktionsumfang dieser elektronischen Strahlnachführung müssen auch in der Zwischenfrequenzlage und im Basisband alle Empfangs- und Sendezweige mehrfach (z.B. dreifach) ausgelegt werden.

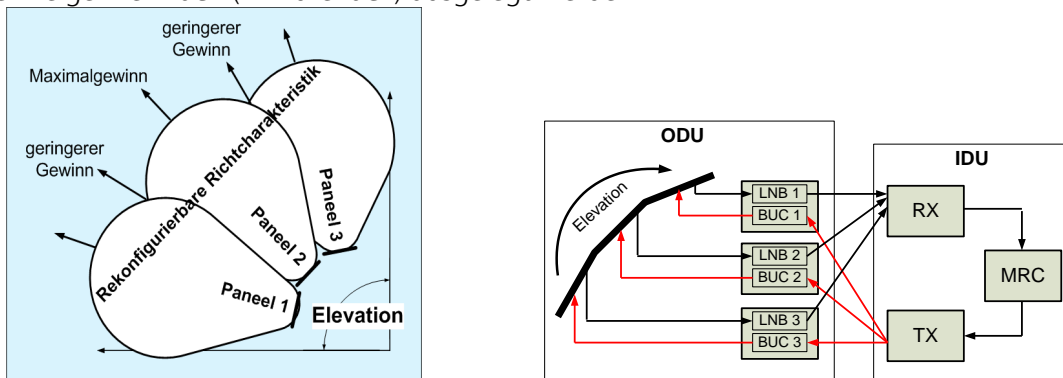


Abbildung 55: Prinzip eines Antennensystems mit rekonfigurierbarer Richtcharakteristik (links); Elektronische Antennennachführung mittels *Maximum Ratio Combining* (MRC); ODU: *Outdoor-Unit*; IDU: *Indoor-Unit*; LNB: *Low-Noise Block*; BUC: *Block Up-Converter*; RX: Empfänger; TX: Sender (rechts)

### Ka-Band Antennenpaneel

Zur Realisierung der beschriebenen Antennenpaneel und deren Apertur musste ein geeigneter Antennentyp unter Berücksichtigung des *Low-Profile* Antennenkonzeptes gefunden werden. Es wurde ein Konzept basierend auf Hohlleitertechnik und einer strahlungsgekoppelten Antennen-

apertur gewählt, um im Vergleich zu einem *Patch-Array* in Mikrostreifenleitungstechnik mit geringer Komplexität und geringen Speiseverlusten auszukommen. Bei der ausgewählten *Leaky Wave-Antenne* (LWA) [53] kommt es zur Abstrahlung einer Leckwelle entlang einer zweidimensional periodisch fortgesetzten Struktur, welche sich oberhalb einer Massefläche befindet. Die Anregung eines Parallelplatten-Hohlleitermodes erfolgt über einen Primärstrahler unterhalb der periodischen, frequenzselektiven Oberfläche (FSS oder auch PRS). Durch diese frequenzselektiven Eigenschaften ist es möglich, zwei verschiedenen PRS-Lagen übereinander anzuordnen, bei der die obere Lage ihre teilweise reflektiven Eigenschaften bei 20 GHz aufweist, während sie 30 GHz nahezu ungehindert passieren lässt. Die untere Lage erlaubt eine Anregung des Parallelplatten-Modes bei 30 GHz, während sie die Signale bei 20 GHz nicht beeinflusst. Durch Stapelung mehrerer PRS-Lagen mit Filtereigenschaften für einfallende elektromagnetische Wellen wird hiermit grundsätzlich Dualband-Betrieb ermöglicht. Dies erlaubt eine simultane Anwendung einer gemeinsamen Antennenfläche im Ka-Band bei 20 und 30 GHz [54, 55]. Der prinzipielle Lagenaufbau einer solchen dualbandigen Leckwellenantenne wird in Abbildung 56 links dargestellt. In Abbildung 56 rechts ist die obere und die untere Lage der verwendeten Elementarzelle mit einer Periodizität bzw. Gitterkonstante von 2,32 mm gezeigt.

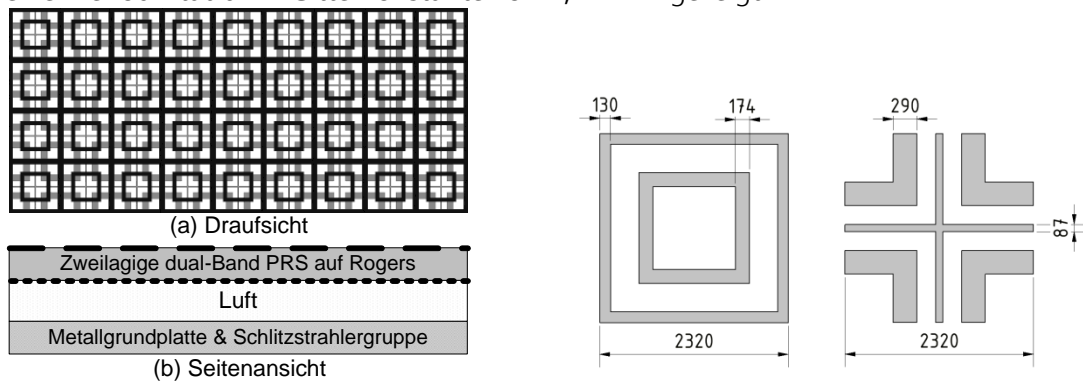


Abbildung 56: Lagenaufbau eines dualbandigen Leckwellen-Antennen-panels (links); Elementarzellendesign der dual-bandigen PRS (*Partially Reflective Surface*); obere Lage (links) und untere Lage (rechts); alle Zahlenangaben in µm (rechts)

Die beiden Lagen periodischer Strukturen können durch Ätzverfahren auf üblichen Hochfrequenzsubstraten (z.B. *Rogers Laminate*) realisiert werden. Die Speisung bzw. die Primärquelle der Leckwellenantenne wurde durch eine zirkular polarisierte Schlitzstrahler-Gruppe realisiert, welche mittels Laser in die Oberseite einer speisenden Rechteckhohlleiterverzweigung geschnitten wurde. Die Hohlleiterverzweigung kann durch herkömmliche CNC-Fräsverfahren in einer Metallgrundplatte realisiert werden.

Zunächst wurden mehrere monobandige Leckwellen-Antennenmodule für 20 GHz entwickelt und deren Eigenschaften mit Hilfe von FEM-Simulationen untersucht. Es wurden verschiedene Varianten realisiert, um die bisher erhaltenen Ergebnisse durch Messungen im Antennenmesslabor zu verifizieren und daraus neue Erkenntnisse für spätere und dualbandige Implementierungen ableiten zu können.

Um prinzipiell die dualbandige Funktionsweise der zweilagig aufgebauten periodischen Struktur (PRS) zu erproben, wurde ein Leckwellen-Antennenpaneel mit einer Apertur von 60 mm × 60 mm respektive 25 × 25 Elementarzellen entwickelt, aufgebaut und erfolgreich getestet (vgl. Abbildung 57 links). Die Ausnutzung einer gemeinsamen physikalischen Antennenapertur sowohl bei 20 GHz (Downlink) als auch bei 30 GHz (Uplink) wurde hierdurch messtechnisch erfolgreich nachgewiesen.

Für die zweilagige PRS mit einer Fläche von 60 mm × 60 mm wurde eine Speisestructur mit nur einem Schlitzstrahler entwickelt und gefertigt. Das 3D CAD-Modell der Metallgrundplatte mit integriertem 30 GHz Schlitzstrahler (transparente Darstellung) ist ohne Dualband-PRS in Abbildung 57 (rechts) dargestellt. Die Metallplatte mit integrierter Primärquelle kann ausgetauscht werden, um das Verhalten der gleichen Dualband-PRS bei beiden Frequenzen getrennt bewerten zu können.

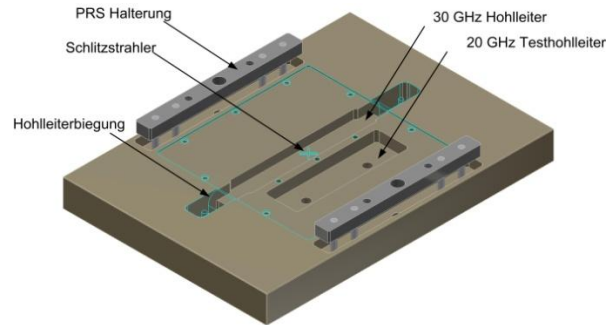
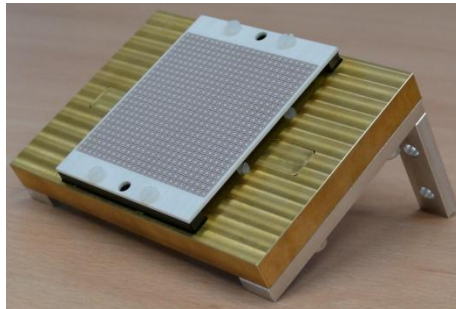


Abbildung 57: Leckwellen-Antennenpaneel inklusive der Dualband-PRS mit einer Apertur von 60 mm × 60 mm (links); 3D CAD-Modell der Metallgrundplatte mit integrierten Rechteckhohlleitern und einem zirkular polarisierten Schlitzstrahler als Primärquelle der Leckwellenantenne (rechts)

Diese Arbeiten und Ergebnisse führten dann zu einem dualbandigen und größeren Antennenpaneel mit höherem Gewinn, welches auch für den MoSaKa *Low-Profile* Antennendemonstrator Verwendung fand.

In Abbildung 58 ist die Realisierung eines dualbandigen und zirkular polarisierten Antennenpaneels mit einer Apertur von 60 mm × 200 mm dargestellt. Die verwendete PRS besteht sowohl in ihrer oberen als auch unteren Lage aus 25 × 86 der in Abbildung 56 (rechts) präsentierten Elementarzellen, welche mit einem Standard-Ätzverfahren auf einem 1,524 mm dicken Hochfrequenzträgermaterial (*Rogers RO4003C*) realisiert wurde. Die nach dem Ätzvorgang verbleibende Kupferdicke beträgt 18 µm und die periodisch angeordneten Leiterbahnen wurden mit einer maximalen symmetrischen Abweichung von 8 µm gefertigt.

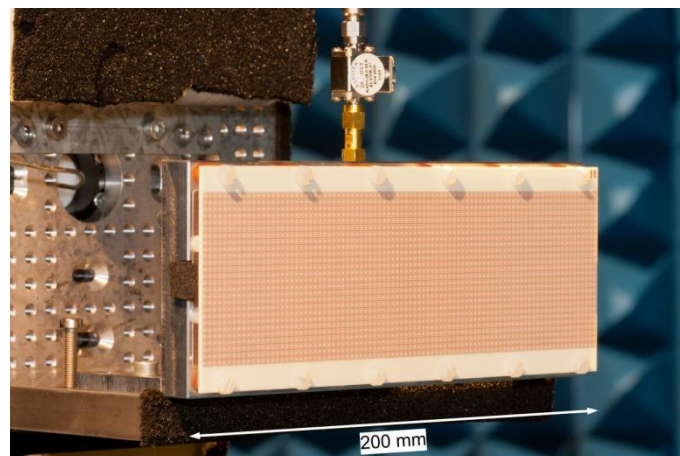


Abbildung 58: Zirkular polarisiertes Ka-Band Antennenpaneels mit einer Apertur von 60 mm × 200 mm in der Antennenmesskammer der TU Ilmenau

Dieses Ka-Band Antennenpaneel wird durch eine mittengespeiste Schlitzstrahlergruppe mit zirkularer Polarisation angeregt (vgl. Abbildung 59). Die Schlitzstrahler sind in die Oberseite eines in die Metallgrundplatte integrierten Rechteckhohlleiters geschnitten. Im Vergleich zu einem

Einzelstrahler, ist eine Gruppe von Schlitzstrahlern in der Lage, bis zu 90 % der eingespeisten Leistung abzustrahlen, bevor die Wanderwelle die Enden des Rechteckhohlleiters erreicht. Dies führt zu einer deutlichen Verbesserung der Gesamteffizienz der Antenne.

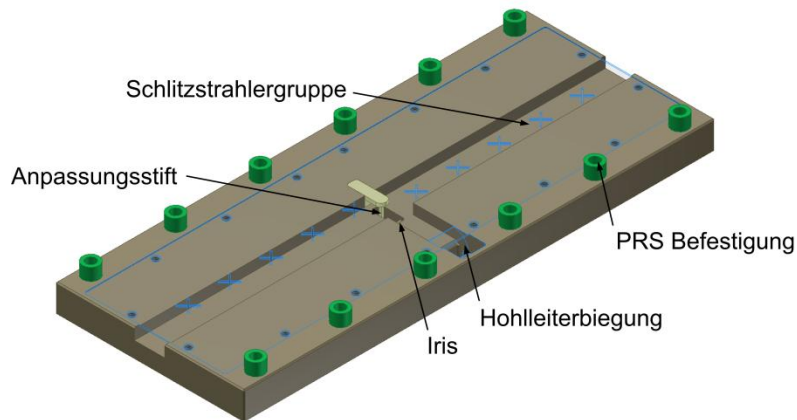


Abbildung 59: 3D CAD-Modell der Metallgrundplatte mit integrierter Rechteckhohlleiter-Speisung und einer zirkular polarisierten Schlitzstrahlergruppe als Primärquelle der Leckwellenantenne bei 20 GHz

Die gewählte Mittenspeisung der Schlitzstrahlergruppe verhindert eine Verkipfung der Hauptstrahlrichtung bei Frequenzen, die sich etwas abseits der Mittenfrequenz befinden. Dies entsteht durch den festen Phasenbezug zwischen den fest angeordneten Einzelstrahlern. Der vorliegende symmetrische Aufbau, realisiert durch einen E-Feld T-Hohlleiterabzweig, kompensiert diesen Effekt mindestens innerhalb der geforderten Bandbreite von 0,5 GHz sowohl im *Downlink*- als auch im *Uplink*-Band. Für 20 und 30 GHz wurden Metallgrundplatten mit verschiedenen Schlitzstrahlergruppen entwickelt, um die Eigenschaften der dualbandigen 60 mm × 200 mm PRS bei beiden Frequenzen getrennt untersuchen zu können. Der Einsatz eines sog. Magic-T ermöglicht, mit Hilfe seines E- und H-Anschlusses auf der Antennenrückseite, eine Auswertung der erzeugten Summen- und Differenzrichtdiagramme für eine Antennennachführung nach dem Monopuls-Verfahren in der Azimutebene.

Für 20 GHz wird eine Gruppe von 2 × 5 Strahlern mit linkshändig-zirkularer Polarisation (LHCP) eingesetzt und bei 30 GHz werden 2 × 7 Schlitze mit rechtshändig-zirkularer Polarisation (RHCP) verwendet (vgl. Abbildung 60). Die Schlitze wurden in eine 0,5 mm dicke, austauschbare Aluminiumplatte mittels Laserstrahls geschnitten. Dieses mechanische Bearbeitungsverfahren erlaubt es, die Position, die Länge und Breite der Schlitze mit einer symmetrischen Toleranz von 3 µm zu fertigen. Bei 20 GHz variieren die Schlitzlängen von 6,8 bis 7,25 mm und bei 30 GHz von 4,450 bis 4,775 mm. Diese gewollte Variation der Schlitzresonanzen erlaubt es, die Amplitudenverteilung der Strahlergruppe zu beeinflussen, welche durch die Wanderwelle im speisenden Rechteckhohlleiter erzeugt wird.

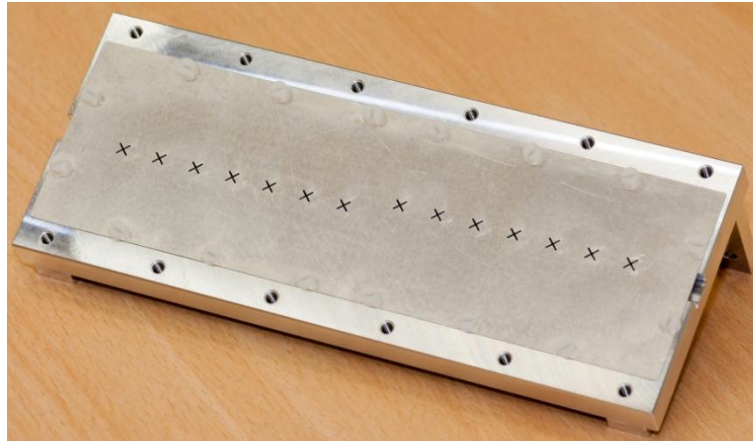


Abbildung 60: Metallgrundplatte für 30 GHz mit integrierter rechtshändig-zirkular polarisierter Primärquelle mit 2x7 Schlitzstrahlern

Dieses Ka-Band Antennenpaneel wurde in den Bereichen von 19 bis 21 GHz und 29 bis 31 GHz in der Antennenmesskammer verifiziert. Die Abbildung 61 stellt die Messung der LHCP *Downlink*-Richtcharakteristik bei 20,1 GHz dar. Das Richtdiagramm weist eine breite Hauptkeule für eine schnelle und einfache Nachführung in der Elevationsebene auf und eine schmale Keule im Azimut für eine präzise Ausrichtung zum Satelliten mit erhöhtem Gewinn. Der realisierte Gewinn beträgt 19,1 dBi in Hauptstrahlrichtung, während eine Direktivität von 21,4 dBi ermittelt wurde. Diese Werte führen zu einem Gesamtwirkungsgrad von mindestens 60 % bei 20,1 GHz. Tendenziell ist die gemessene Richtwirkung immer etwas höher als der simulierte Wert (21,0 dBi) wegen der Anwesenheit von Absorbern um die zu vermessende Antenne und aufgrund der Abschattung durch die Positioniererrückseite.

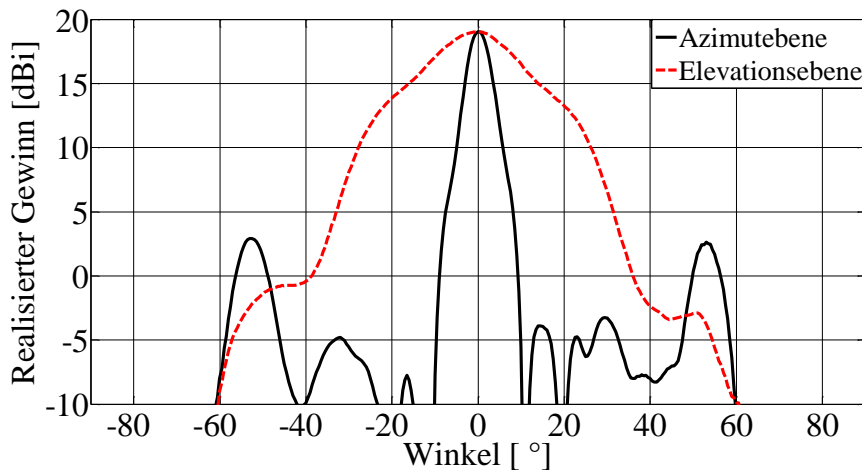


Abbildung 61: Messung der LHCP Richtcharakteristik der Azimut- und Elevationsebene bei 20,1 GHz (*Downlink*)

Die Abbildung 62 zeigt die Messung der korrespondierenden RHCP Richtcharakteristik bei 30,4 GHz derselben zweilagigen PRS. Der realisierte Gewinn in Hauptstrahlrichtung beträgt 22,2 dBi und die Richtwirkung wurde mit 23,2 dBi ermittelt (Simulationsergebnis: 22,7 dBi). Daraus ergibt sich ein gemessener Gesamtwirkungsgrad von mindestens 78 % bei 30,4 GHz.

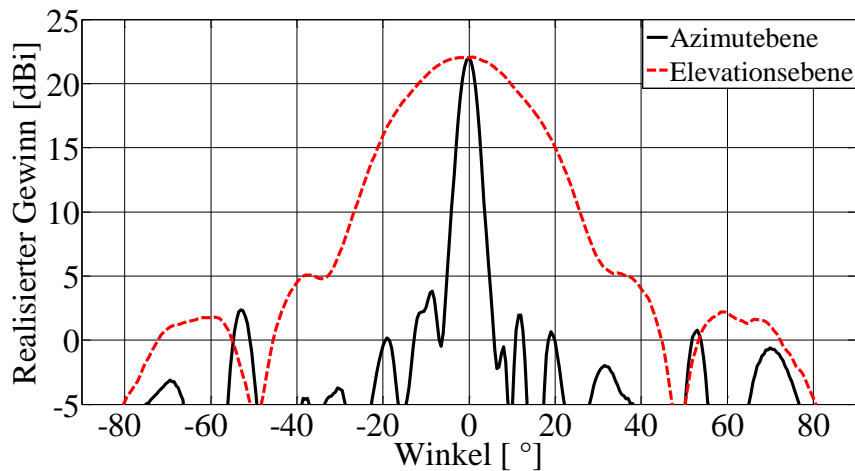


Abbildung 62: Messung der RHCP Richtcharakteristik der Azimut- und Elevationsebene bei 30,4 GHz (*Uplink*)

Wie in Abbildung 63 dargestellt, konnte ein realisierter LHCP Gewinn von mehr als 17,5 dBi über einer Bandbreite von 0,8 GHz (19,7-20,5 GHz) gemessen werden. Die Kreuzpolarisations-entkopplung (XPD) beträgt 17 dB bei 20,1 GHz.

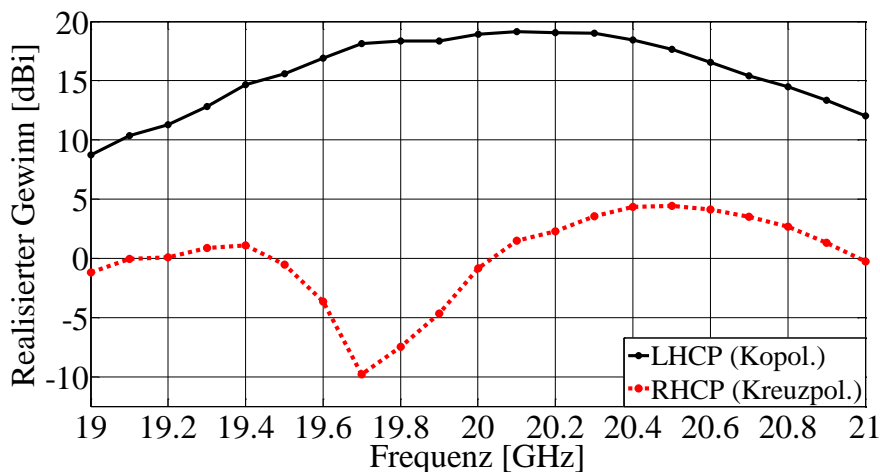


Abbildung 63: Messung des realisierten Gewinns für beide Drehrichtungen der zirkularen Polarisation im *Downlink*-Band

Die Abbildung 64 zeigt einen realisierten RHCP Gewinn von mehr als 20 dBi über eine Bandbreite von 1,1 GHz im *Uplink*-Band. Allerdings wurde der maximale Gewinn mit einem Frequenzversatz von 0,4 GHz bei 30,4 GHz ermittelt. Diese Verschiebung ist auf leicht abweichende Leiterbahnbreiten zurückzuführen, welche nach dem Herstellungsprozess der periodischen Struktur auf dem Hochfrequenzsubstrat entstanden sind. Aufgrund der hohen erzielten Bandbreite von 1,1 GHz ist die Antenne trotz des Versatzes im gewünschten Frequenzbereich von 29,5 bis 30,0 GHz funktionstüchtig. Die gemessene XPD beträgt bei 30,4 GHz etwa 30 dB.



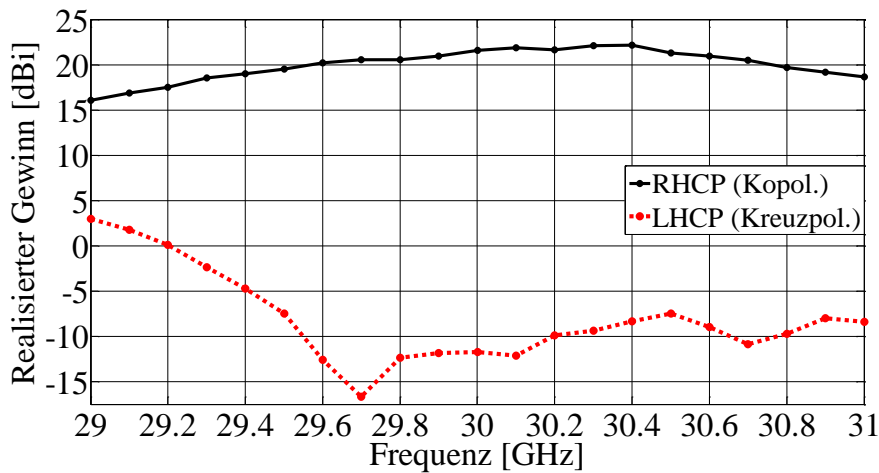


Abbildung 64: Messung des realisierten Gewinns für beide Drehrichtungen der zirkularen Polarisation im *Uplink*-Band

Die Messung der Summen- und Differenzrichtcharakteristiken in der Azimutebene bei 20,1 GHz sind in Abbildung 65 dargestellt. Diese Richtdiagramme werden vom E- und H-Anschluss der in die Metallgrundplatte integrierten Hohlleiterverzweigung (*Magic-T*) bereitgestellt. Das Summenrichtdiagramm entspricht der konventionellen Richtcharakteristik im Azimut der Ka-Band-Antenne. Die Differenzrichtcharakteristik hingegen weist zwei Hauptkeulen in der Azimutebene mit einer tiefen Nullstelle bei 0° auf. Das neu entwickelte Antennenpaneel stellt somit erste Informationen für die Antennennachführung in der Azimutebene nach dem Monopuls-Verfahren bereit. Der Amplitudenvergleich der beiden Signale lässt Rückschlüsse auf die Abweichung von der Soll-Position zu und die Phasendifferenz liefert Informationen über die Richtung der Abweichung. Die mit 0,5°-Schritten gemessene Amplitudendifferenz in Hauptstrahlrichtung beträgt ca. 22 dB und der Einfangbereich für die Nachführung beträgt in Abhängigkeit vom verwendeten Phasendiskriminator mindestens +/- 4°.

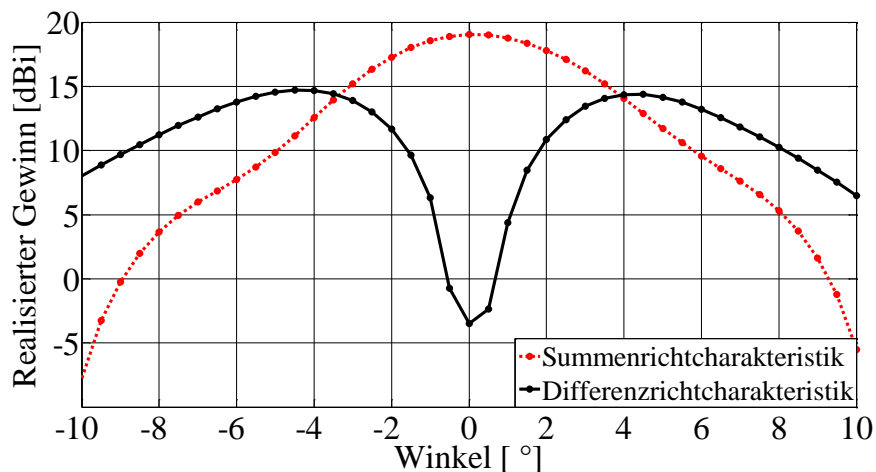


Abbildung 65: Messung der Summen- und Differenzrichtcharakteristik, welche durch die beiden Rechteckhohlleiteranschlüsse auf der Rückseite des Ka-Band Antennenpaneels in der Azimutebene bei 20,1 GHz bereitgestellt werden

### Demonstrator für Low-Profile-Antenne

In den letzten Projektmonaten stand vorrangig der Aufbau der Außeneinheit (*Outdoor-Unit*) des mobilen Terminals im Vordergrund. Dieser *Low-Profile* Antennendemonstrator hatte zum Ziel,

Teilaspekte des in MoSaKa entwickelten Antennenkonzeptes zu realisieren, deren Funktion nachzuweisen und weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf zu identifizieren. Neben dem Nachweis über die generelle Funktionstüchtigkeit und die Fähigkeiten des Nachführalgorithmus kann auch die mechanische Nachführung mittels Azimut-Positionierer bezüglich erreichbarer Positioniergenauigkeiten, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen überprüft werden. Darüber hinaus erlaubt der Demonstrator in Zukunft die Durchführung von Feldversuchen bzw. Versuchsfahrten zur Evaluation der Kommunikationsrobustheit, z. B. durch Tests mit einem geostationären Satelliten.

Der *Low-Profile* Antennendemonstrator ist in Abbildung 66 dargestellt [56]. Es wurden jeweils zwei Sende- und Empfangsantennenpaneele auf der Nutzlastplatte des Azimut-Positionierers aufgebaut. Die Paneele weisen unterschiedliche Neigungen auf und überstreichen, gemessen am 3-dB-Öffnungswinkel, einen Winkelbereich von ca. 15° bis 65° in der Elevation. Darüber hinaus befinden sich auf dem Positionierer die zugehörigen Ka-Band Konvertermodule bzw. Transceiver der Firma ViaSat.

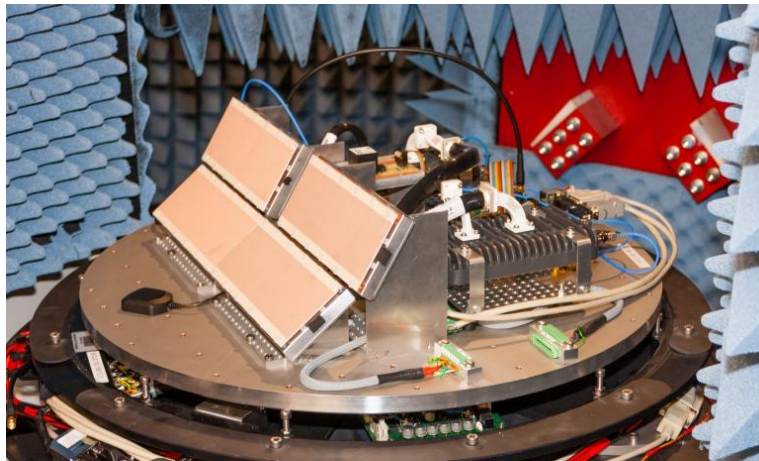


Abbildung 66: Ka-Band Low-Profile Antennendemonstrator bzw. Außeneinheit des mobilen MoSaKa-Terminals

Die *Up*- und *Down*-Konverter sind auf der HF-Seite (Ka-Band) über verlustarme flexible Hohlleiter mit den 20 und 30 GHz Flanschen an den Antennenpaneel-Rückseiten verbunden und auf der ZF-Seite (L-Band) führen Koaxialkabel über eine 6-Kanal-Drehkupplung zur Inneneinheit des *Terminals*.

Für die Anfertigung der Demonstrator-Antennenpaneele konnte das bereits beschriebene Design der für Dualband-Betrieb vorgesehenen periodischen Leckwellenstruktur verwendet werden. Jedoch mussten für die Implementierung am Demonstrator erneut alle Antennenkomponenten in ausreichender Stückzahl gefertigt werden. Vor der Integration war die erneute Vermessung in der Antennenmesskammer notwendig, um die Funktionstauglichkeit der gesamten Außeneinheit zu gewährleisten. Diese erneute Messung der mehrfach hergestellten Antennenpaneele stellte darüber hinaus eine gute Möglichkeit dar, die Reproduzierbarkeit von gewünschten Antennenparametern nach dem Herstellungsprozess erfolgreich messtechnisch zu validieren.

### 2.1.5.2 Antennennachführung und Regelung

Inhalt dieses Arbeitspaketes war der Aufbau eines mobilen Antennennachführsystems (auch Antennen-Pointing/Tracking-System). Dieses System soll die jeweilige MoSaKa-Ka-Band-Antenne auf einem Fahrzeug so stabilisieren, dass diese zu jeder Zeit auf den Zielsatelliten zeigt, so dass die abgestrahlten Off-Axis-Emissionen die zulässigen Grenzwerte der spektralen Leistungsdichte

entsprechend internationaler Normen [57] auch bei mobiler Bewegung des Fahrzeuges nicht überschreiten.

Es gibt für mobile Terminals im Ka-Band noch keine in Europa verbindlichen (ETSI-) Normen. Es wurden daher die Normen für feste Terminals (ETSI [58], FCC) als Zielvorgabe angenommen. Die entsprechende Maske ist in Abbildung 67 dargestellt.

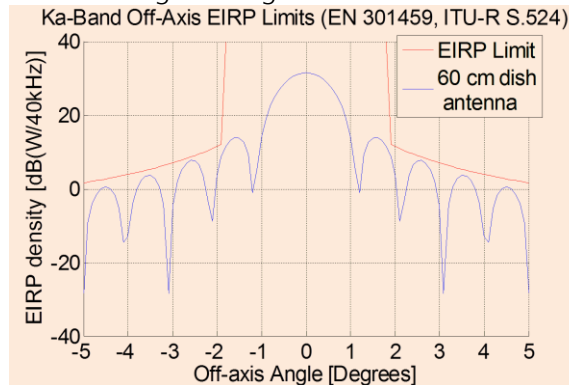


Abbildung 67: ITU-Norm für Ka-Band-Antennen

Es gibt im Wesentlichen 4 Einflussfaktoren auf die Einhaltung der Maske:

1. Die Form des Antennenpatterns. Dies ist in der Regel durch die Konstruktion der Antenne vorgegeben. Bei elektronisch beam-formenden Antennen kann das Pattern elektronisch geändert werden. In aller Regel wird versucht, eine möglichst schmale Hauptkeule in Richtung des Satelliten zu erzeugen.
2. Die mechanische Richtung des Antennenpatterns: Es sollte immer auf den Satelliten ausgerichtet sein, d. h. das Maximum und die Hauptkeule sollten sich immer im mittleren Bereich von  $\pm 1.8^\circ$  befinden, da es dort keine Leistungsbegrenzungen gibt.
3. Die Sendeleistung: Man kann die Sendeleistung reduzieren um die Maske einzuhalten – dies hat einen unmittelbar negativen Effekt auf die Performanz der Kommunikationsstrecke.
4. Die Bandbreite: Man kann das Signal im Frequenzbereich spreizen und so die Leistung im Frequenzbereich verteilen (und so die Maske einhalten). Allerdings ist dieses Verfahren nicht frequenzeffektiv.

Für die in MoSaKa untersuchten drei Antennen (vgl. Abschnitt 2.1.5.1) wird das Antennenpattern nicht elektronisch erzeugt und daher als fest angenommen. Bei der Low-Profile-Antenne wurde eine Umschaltung zwischen zwei jeweils wieder festen Pattern umgesetzt. Die Ausrichtung der Antenne konnte dabei direkt mit Hilfe mechanischer Antennenpositionierer beeinflusst werden (Abbildung 43,Abbildung 66).

Weiterhin konnte die aktuelle Schätzung des Depointings an die IDU übermittelt werden. Diese Information kann bei der Erzeugung des Sendesignals geeignet berücksichtigt werden, incl. eines Ausschaltens des Senders, wenn das Depointing zu groß wird.

Aufgabe war daher, die Lage der Antenne relativ zum Zielsatelliten zu schätzen und die Antenne entsprechend nachzuführen.

Inhalt dieses Kapitels ist die Beschreibung der innerhalb von MoSaKa durchgeführten Arbeiten zur Entwicklung der Antennennachführregelung. Als Grundlage diente hierbei eine ausführliche Bedarfs- und Systemanalyse, -modellierung sowie -simulation. Der Vorteil dieser Vorgehensweise bestand darin, dass die Erarbeitung von Regelungsansätzen parallel mit der Entwicklung für

Hardware und Software vorangetrieben werden konnte. Des Weiteren erlaubte diese Herangehensweise eine hardware-schonende Erprobung der entworfenen Regelstrategien.

### Modellierung des Nachführsystems

Im vorherigen Kapitel wurde die hardwaretechnische Umsetzung dreier Antennen und deren Nachführsysteme vorgestellt. Bei der Modellierung, Simulation und Regelung wurde jedoch gemäß der Projektziele nur auf die Low-Profile-Antenne (Abbildung 66) sowie die High-Gain-Antenne (Abbildung 43) fokussiert. Das dritte System diente nur zu Studienzwecken, da schon frühzeitig klar wurde, dass dieses System – eigentlich für den maritimen Einsatz konstruiert – die später zu diskutierenden hohen Anforderungen der Positioniergeschwindigkeit für landmobile Systeme nicht würde erreichen können.

Die Modellierung der beiden Nachführeinheiten wurde in drei Teile gegliedert,

- die Modellierung der Mechanik,
- die Modellierung der Aktuatorik und
- die Modellierung der Sensorik.

### Mechanische Modelle

Zur Modellierung der Mechanik diente für jede der beiden Antennennachführeinheiten jeweils das Modell eines räumlichen Mehrkörpersystems, wobei die Fahrzeughalterung, die Azimut-Aufhängung(Drehtisch) und im Falle der High-Gain-Variante auch die Elevationsaufhängung mit Parabolantenne jeweils durch einen Starrkörper repräsentiert wurden. Die einzelnen Körper wurden dabei durch reibungsbehaftete Drehgelenke miteinander verbunden. Für die Reibung in den Drehgelenken diente das Modell der Stribeck-Reibung, nach Abbildung 68.

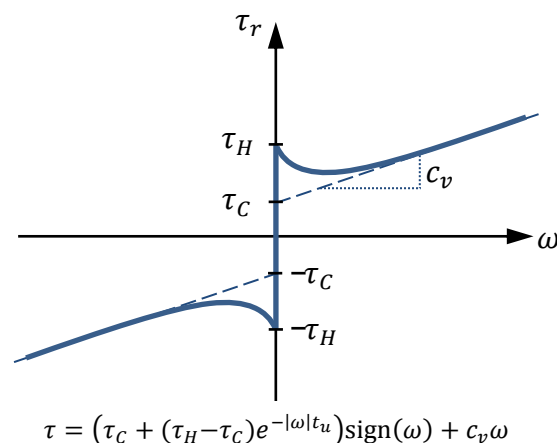


Abbildung 68: Stribeck-Kurve, stellt den Zusammenhang von Reibmoment und Drehgeschwindigkeit dar

Zur mathematischen Beschreibung wurde jeweils ein Antennen- und Fahrzeugkoordinatensystem eingeführt. Das Fahrzeugkoordinatensystem ist so ausgerichtet, dass die positive x-Richtung immer in Fahrtrichtung zeigt, während die positive y- und z-Richtung aus Sicht des Fahrzeuges nach rechts bzw. nach unten weisen. Das Antennenkoordinatensystem entsteht aus dem Fahrzeugkoordinatensystem jeweils durch Drehungen um die vorhandenen Drehachsen derart, dass die positive x-Achse im Falle der High-Gain-Variante in Hauptabstrahl- bzw. Haupt-

empfangsrichtung der Antenne zeigt und im Falle der Low-Profile-Variante in der Ebene maximaler Abstrahlung liegt und mit der Hauptabstrahlrichtung einen Winkel von weniger als 90° einschließt (Vergleiche Abbildung 72 und Abbildung 73).

Als Referenzkoordinatensystem wurde das Navigationskoordinatensystem verwendet (vergleiche [59]), dessen positive x- bzw. y-Achse nach Norden bzw. Osten weisen. Die positive z-Achse zeigt in Richtung der Schwerebeschleunigung. Die Erdrotation wurde vernachlässigt<sup>2</sup>. Das Referenzkoordinatensystem kann damit als inertiales System betrachtet werden. Der Zielsatellit als geostationärer Satellit wird somit inertial fest. Ziel der Regelung ist es, die Antenne unabhängig von der Bewegung des Fahrzeuges möglichst stabil in Richtung des inertial festen Satelliten auszurichten, d. h. in verschiedenen Achsen die Bewegung bezüglich des Referenzkoordinatensystems zu verhindern. Als Störung muss dabei die Bewegung des Fahrzeuges angesehen werden, die über die Aufhängung der Antenne entweder direkt oder indirekt die Bewegung der Antenne beeinflusst, indem in Folge der Reibung Störmomente auf die Gelenke wirken. Einflussfaktoren sind dabei sowohl die Fahrbahn, das dynamische Verhalten als auch die Geschwindigkeit des Fahrzeuges. Das Antennennachführsystem sollte für hochdynamische, mobile, katastrophentypische Einsatzszenarien untersucht werden.

Im Rahmen des Projektes wurden dazu realistische Anwendungsszenarien erörtert und durch Testfahrten analysiert. Als Messumgebung stellte das THW München verschiedene, geeignete Fahrzeuge zur Verfügung, mit denen – soweit möglich – unterschiedliche Teststrecken abgefahren wurden. Dabei wurden die translatorische als auch die rotatorische Bewegung des Fahrzeuges erfasst und als Fahrzeugbewegungsdaten abgelegt.

### Ermittlung der Anforderungen

Für die Ermittlung der Fahrzeugbewegungsdaten wurden verschiedene Messreihen mit unterschiedlichen Fahrzeugen des THW durchgeführt (Vergleiche Abbildung 69). Die Messdaten wurden mit dem hochwertigen, durch RTK-GPS gestützten Inertial-Messsystem ADMA der Firma GENESYS aufgezeichnet.



Abbildung 69: Fahrzeuge für die Messfahrten beim THW

Tabelle 8 gibt einen Überblick über alle durchgeführten Messungen. Die Strecken wurden dabei nach ihren Fahrbahntypen kategorisiert. Einige Strecken wurden mit dem NEOPLAN-Bus nicht befahren, da nach Einschätzung der THW-Fahrer der Bus für derartiges Gelände ungeeignet ist.

Tabelle 8: Übersicht über die Messreihen der unterschiedlichen THW-Fahrzeuge

Fahrbahn	Fahrzeug		
	Geländewagen: Mercedes G-Klasse	NEOPLAN Bus	IVECO EURO-CARGO LKW
Stadt	X	X	X

<sup>2</sup> Die Messungenauigkeiten der verwendeten MEMS-Gyroskope waren der beschränkende Faktor. Es ist jedoch mittlerweile absehbar, dass sich dies durch die schnell voranschreitende Entwicklung auf diesem Gebiet in naher Zukunft ändern wird.

Autobahn	X	X	X
Landstraße	X	X	X
Schotterweg gut (kleine Unebenheiten)	X		X
Schotterweg schlecht (größere Schlaglöcher)	X		X
Leichtes Gelände (leicht wellige Wiese, keine Straße)	X		X
Schweres Gelände (zügig durchfahrene, anspruchsvolle Panzerstrecke)	X		X
Extremes Gelände (künstlich aufgeschüttete Hügel mit großer resultierender Neigung)	X		X

Die Einteilung erfolgte nach subjektivem Empfinden. Eine Klassifizierung mit mathematischen Methoden wurde durchgeführt [60] und ergab eine Unterteilung in drei Erschütterungsklassen. Für den praktischen Gebrauch, insbesondere die Diskussion mit den Nutzern bezüglich deren Anforderungen, hat sich jedoch die o.g. subjektive Einordnung als günstiger erwiesen. Beide Methoden kommen bezüglich der Parameter der Nachführeinrichtung zu ähnlichen Ergebnissen, nämlich dass eine Nachführgeschwindigkeit von ca. 300%/s notwendig ist und Frequenzanteile > 8 Hz für die Positioniergenauigkeit unerheblich sind [61], [60].

### Eingesetzte Sensorik und deren Modelle

Beim Antennentracking wird zwischen zwei grundsätzlichen Methoden unterschieden, „Open Loop“ und „Closed Loop“. Diese unterscheiden sich dadurch, dass das „Closed-Loop“-Verfahren die Lageinformationen durch Auswertung des Empfangssignals des Satelliten bezieht, wo hingegen das Open-Loop-System die Information der Antennenlage auf andere Weise, z.B. ein inertiales Messsystem zur Lagebestimmung verwendet. Im Rahmen von MoSaKa wurde ein hybrider Ansatz verfolgt, um die Nachteile des Closed-Loop-Ansatzes (vollständiger Verlust der Tracking-Informationen bei Abschattung des Satelliten) sowie des Open-Loop-Ansatzes (teure Sensorik) möglichst auszugleichen.

Grundsätzliches Ziel bei der Entwicklung der Demonstratoren war der Einsatz preisgünstiger Inertialsensorik. Als primär verwendetes inertiales Messsystem kam daher eine inertielle Messeinheit (IMU) auf der Grundlage von MEMS (micro-electro-mechanical systems) zum Einsatz. Speziell wurde ein Analog Devices ADIS16405 [62] eingesetzt, das durch seine würfelförmige Form und seine geringe Baugröße sehr flexibel montiert werden konnte und bezüglich des Güte/Kosten-Verhältnisses den zum Zeitpunkt der Auswahl neuesten Stand der Technik repräsentierte. Das Messsystem ist eine Kombination aus einem dreiachsigen Gyroskop, einem dreiachsigen Accelerometer und einem dreiachsigen Magnetometer (digitalem Kompass). Zusätzlich sind ein Temperatursensor sowie ein Betriebsspannungssensor integriert. Für die Entwicklung der Regelstrategie wurde entschieden, die IMU direkt an der Antenne zu befestigen, um die Bewegung der Antenne als Ergebnis der Regelung direkt messtechnisch erfassen zu können. Ein weiterer inertialer Sensor, der direkt am Fahrzeug montiert werden könnte, wurde zunächst in Erwägung gezogen, wurde aber schließlich aus Zeitgründen nicht umgesetzt.

Das vorhandene, präzise Inertialmesssystem ADMA ist für die direkte Bestimmung der Antennenausrichtung aufgrund der Baugröße und des Gewichts sowie des hohen Preises ungeeignet.

Der beschriebene Ansatz wird oftmals als „Open-Loop“-Ansatz bezeichnet. Für den Closed-Loop-Ansatz wurden die Empfangssignale ausgewertet. Dabei wurde eine elektronische Aus-

wertung der Empfangssignale (im Falle der HG-Antenne) mit einer hybrid elektronisch/mechanischen Auswertung (HG/Conical Scan und LP) verglichen (vgl. Abschnitt 2.1.5.1).

Für die schnelle Regelung sind die Ergebnisse aus der elektronischen Gewinnung aufgrund der geringen Latenz und der hohen Bandbreite den hybriden bzw. mechanischen Verfahren überlegen, jedoch um den Preis des signifikant höheren Aufwandes (zweiter Downconverter/Frontend).

Für die Modellierung der Sensorik wurden alle eingesetzten Sensoren hinsichtlich ihrer wesentlichen statischen und dynamischen Eigenschaften analysiert. Hierbei standen vor allem der Messbereich, die Messgenauigkeit, das Rauschverhalten, die Bandbreite, Messabweichungen durch Bias-Effekte sowie deren dynamisches Verhalten (Bias-Stabilität), die Auflösung der meist digitalen Messwerte (also deren Quantisierung) und die Abtastrate im Vordergrund.

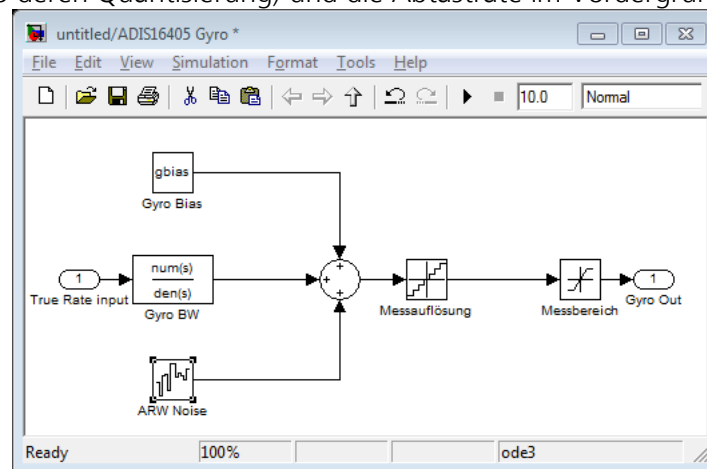


Abbildung 70: Modell des Gyroskops für eine Achsrichtung

In Anlehnung an [63] wurde jede Achse des Gyroskops zunächst als Tiefpass erster Ordnung modelliert, um der gegebenen Bandbreitenbeschränkung Rechnung zu tragen. Eingangssignal des Tiefpasses ist die exakte Winkelgeschwindigkeit in der lokalen Achsrichtung gegenüber dem Referenzkoordinatensystem. Dem Ausgangssignal wurde additiv diskretes weißes Rauschen und ein konstanter Bias überlagert. Abschließend wurde das Signal sowohl quantisiert als auch in seiner maximalen Amplitude beschränkt (siehe Abbildung 70). Die Modelle für Accelerometer und Magnetometer waren ähnlich aufgebaut.

Aus der Mehrkörpersimulation wurde die Lage der Antenne simuliert und das Depointing berechnet. Damit konnte die Empfangsfeldstärke anhand der von der TU Ilmenau / HMT zunächst simulierten, später des in der Antennenmesskammer gemessenen Antennenpattern berechnet werden. Dies erlaubte die frühzeitige, realitätsnahe Simulation des Gesamtsystems, inklusive der Berechnung der SNR pro Panel sowie dem zu erwartenden Gesamtsignal mittels Maximum Ratio Combining.

### Wahl der Antriebe und deren Modelle

Anhand der ermittelten Vorgaben wurden die Antennenpositionierer von der Firma iMAR entsprechend unserer Spezifikation entwickelt und gefertigt. Die Antriebe müssen in der Lage sein, die Störungen innerhalb eines ermittelten Frequenzbereiches auszugleichen und die dazu nötige Dynamik erreichen. Die Firma iMAR entschied sich dazu, in jedem der Gelenke einen Servo-Direktantrieb der Firma KOLLMORGEN zu verbauen, speziell den Typ KBM-43S02-D/KBM-43H02-D. Die gewählten Antriebe sind mit einer Servosteuerung (SimpleIQ) der Firma Elmo

Motion Control und einem Positionssensor (Inkrementalgeber) ausgerüstet und damit in der Lage, Teile der Regelungsaufgabe intern zu realisieren. Für die spätere Regelungsaufgabe wurde jedoch ausschließlich die Stromregelung als innerster Regelkreis verwendet. Die Geschwindigkeits- und Positionsregelung wurden extern realisiert.

Die Modellierung der Antriebe erfolgte auf verschiedenen Abstraktionsebenen. Ausgehend von einem sehr präzisen Modell, das neben der Mechanik auch die elektrische Modellierung samt Stromregelung enthielt, wurden sinnvolle Vereinfachungen getroffen, um vergleichsweise schnelle Simulationen zu ermöglichen. Der Antrieb wurde dabei als ideale Drehmomentenquelle angesehen und das Encodersignal als zeit- und wertediskretes Signal infolge von AD-Wandlung und Abtastung ausgegeben.

Die Ansteuerung des Antriebes war zunächst über Ethernet geplant. Es stellte sich jedoch heraus, dass Ethernet nicht zuverlässig über die verwendete Drehkupplung übertragen werden konnte. Wurde kurzfristig der Link verloren, kam es zu z. T. signifikanten Aussetzern, ehe die Ethernet-Verbindung wieder zur Verfügung stand. Es schied daher für die Steuerung kritischer Parameter aus.

Es wurde daher das im Automobilbau und in der Industrie übliche, international standardisierte CANopen-Protokoll eingesetzt. Für die Modellierung einer solchen Ansteuerung war vor allem die zeitliche Latenz zu berücksichtigen, die im Modell als konstante Totzeit im Sinne einer Worst-Case-Abschätzung eingeflossen ist. Die Totzeit der CANopen-Strecke lag im Bereich von 2 ms.

#### Hardware zur Umsetzung der Steuerung und Regelung:

Für die zu entwerfenden Steuerungs- und Regelungsalgorithmen und das Interfacing zu Sensoren und Aktoren wurde innerhalb des Projektes ein prototypisches Board entwickelt, das über einen Mikrocontroller mit einer Taktfrequenz von 120MHz auf ARM-Cortex-Basis verfügt. Die Aktoren können analog, seriell, per Ethernet oder mittels CAN-Bus angesteuert werden. Wie bereits erwähnt erwies sich die Ansteuerung der Hardware auf der Grundlage des CANopen-Protokolls (über CAN-Bus) aufgrund der hohen Störsicherheit und der akzeptablen Latenzzeit als günstigster Kompromiss.

#### Parameteridentifikation

Die zuvor beschriebenen Modelle haben nur qualitativen Charakter. Sie enthalten eine Reihe von Parametern, deren möglichst genaue Zahlenwerte für quantitative Aussagen notwendig sind. In den nachfolgenden Abschnitten werden daher die gewählten Ansätze zur Bestimmung konkreter Zahlenwerte bzw. Messergebnisse vorgestellt.

#### Mechanische Parameter

Für die Modellierung der Mechanik sind vor allem die Trägheitsmomente der Starrkörper sowie die Parameter des angesetzten Reibmodells von Bedeutung. Zur Ermittlung dieser Parameter wurden verschiedene Messreihen an den unterschiedlichen Varianten des Antennennachführsystems durchgeführt. Exemplarisch soll hier nur auf die Parameter der Low-Profile-Antenne eingegangen werden. Hierbei wurden zur Identifikation der Parameter<sup>3</sup> verschiedene Auslauf- und Beschleunigungsversuche mit konstanter Drehmomentenvorgabe auf der Basis der bereits vorhandenen Stromregelung durchgeführt. Unter der Annahme einer bekannten Motorkonstante konnten alle angeführten Parameter eindeutig analytisch bestimmt werden. Eine Vergleichssimulation verdeutlichte, dass das angesetzte Reibmodell die wesentlichen Eigenschaften der Lagerreibung an der Low-Profile-Antenne widerspiegelt, jedoch im unteren Drehzahlbereich Effekte

---

<sup>3</sup> Die Parameter sind das Trägheitsmoment  $J$  um die Drehachse, das Haftreibungsmoment  $\tau_H$ , das Coulombsche Reibmoment  $\tau_C$ , der viskose Reibkoeffizient  $c_v$  und der Übergangparameter  $t_u$ . Vergleiche auch Abbildung 68.



---

auftreten, die durch das angegebene Modell nicht abgebildet werden (z. B. positionsabhängige Reibung in den Lagern).

### Parameter der Sensorik

Die für die Sensorik notwendigen Parameter wurden weitgehend den entsprechenden Datenblättern entnommen und experimentell geprüft. Dies betrifft insbesondere die Stabilität bzw. das Rauschen mittels der Allen-Varianz. Der Messbereich der Gyroskope des ADIS16405 liegt bei  $\pm 300^\circ/\text{sec}$ , die Messauflösung beträgt  $0.05^\circ/\text{sec}/\text{LSB}$ . Der Initial Bias Error ist mit bis zu  $3\%$  angegeben, unterscheidet sich aber von Exemplar zu Exemplar und ist u.a. abhängig von der Umgebungstemperatur. Die Bias Stabilität wird durch ihre Varianz bzw. Standardabweichung von ca.  $0.007\%$  angegeben. Dem Sensorsignal ist weiterhin ein Messrauschen überlagert. Es gibt mehrere Rauschquellen, im hier relevanten Kurzzeitbereich (20..30 Sekunden) ist jedoch das weiße Rauschen dominant.

Auch für die Magnetometer finden sich entsprechende Angaben im Datenblatt des Herstellers [62]. Die genauen Angaben sind für die Anwendung jedoch weitgehend irrelevant, da aufgrund der Konstruktion mit vielen metallischen Anbauten davon ausgegangen werden musste, dass eine starke Missweisung entstehen kann. Insbesondere wurde aufgrund der großen Motorströme (bis 20A) mit einer hohen dynamischen Missweisung gerechnet. Das Magnetometer kann daher nur begrenzt eingesetzt werden, z.B. um die Lage bei Nichtverfügbarkeit anderer Sensoren und ausgeschaltetem Nachführmotor grob zu schätzen und so den Suchbereich für das Satellitensignal einzugrenzen.

### Parameter der Antriebe

Auch die Parameter der Antriebe basieren vornehmlich auf den vorliegenden Datenblättern der Firmen KOLLMORGEN [64] und Elmo Motion Control [65]. Die für die Simulation relevanten Parameter (wie Motorkonstante, Beschränkungen des Motorstromes und ähnliches) wurden direkt im Modell mit berücksichtigt.

### Simulation

Für die Simulation wurde das Softwarepaket Matlab/Simulink eingesetzt und zwar mit der Toolbox SimMechanics, zur objektorientierten Modellierung räumlicher Starrkörpersysteme. Dieses Softwarepaket wurde aus Gründen der Verfügbarkeit und der Integration in bestehende Matlab-Umgebungen gewählt.

Für jede Variante der Antennennachführeinheit wurde dabei ein Simulink-Modell erstellt, das sowohl die Mechanik, als auch die Sensorik und Aktorik hinreichend genau beschreibt. Die Fahrzeugbewegungsdaten wurden dabei als kinematische Bewegungsvorgabe dem Fahrzeug und der starr verbundenen Antennenfahrzeughalterung aufgeprägt. Alle im weiteren Verlauf abgedruckten Simulationsergebnisse basieren auf den hier beschriebenen Simulink-Modellen.

### Regelung

Die Aufgabe der Regelung ist es, die Antenne bei hochdynamischer Bewegung des Fahrzeuges immer bestmöglich in Richtung des Satelliten zu führen. Die Regelung der Antennennachführeinheiten basiert auf kaskadierten Regelkreisstrukturen, wie vereinfacht in Abbildung 71 dargestellt. Die unterste Ebene bildet dabei ein Stromregelkreis, der bereits durch die Servoansteuerung eines jeden Antriebes separat realisiert wird. Darüber befindet sich eine Drehzahl- bzw. Geschwindigkeitsregelung, die über das externe zuvor beschriebene Controllerboard verwirklicht wurde. Sie greift dabei vornehmlich auf Daten der Inertialsensorik und ggf. der Inkrementalgeber bzw. einer Lageschätzung zurück und liefert der unterlagerten Stromregelung Sollvorgaben. Ihre Aufgabe ist es, bei ausgeschalteter Positionsregelung die relative Drehgeschwin-

digkeit der Antenne gegenüber dem Satelliten entsprechend den Möglichkeiten der Konstruktion auf null zu regeln. Auf oberster Ebene wurde eine Positionsregelung vorgesehen, die ausgehend von einer Lageschätzung versucht, die Hauptsende- und -empfangsrichtung bestmöglich auf den Satelliten auszurichten. Im Tracking-Modus basiert die Lageschätzung für die Positionsregelung im Wesentlichen auf dem Empfangssignal der HF-Empfangseinheit.

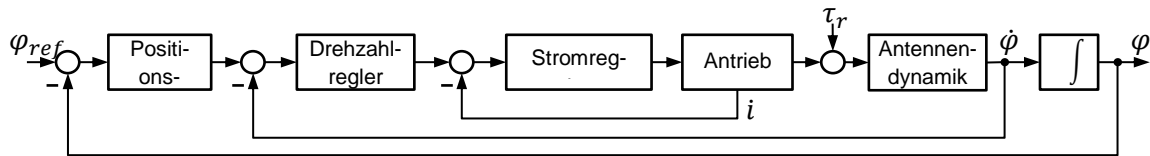


Abbildung 71: Schematische Darstellung der Regelkreisstruktur

### Low-Profile-Antenne

Die Low-Profile-Antenne besitzt nur einen mechanischen Freiheitsgrad gegenüber dem Fahrzeug. Sie ist in der Lage, sich um die fahrzeugfeste z-Achse zu drehen. In Elevationsrichtung verfügt die Antenne über keinen mechanischen Freiheitsgrad, kann aber – wie zuvor geschildert – elektronisch an den aktuellen Einfallswinkel angepasst werden. In diesem Abschnitt wird ausschließlich auf die mechanische Nachführung der Antenne eingegangen, wobei davon ausgegangen wird, dass die Antenne dann ideal ausgerichtet ist, wenn die Viertelebene zwischen positiver x-Achse und negativer z-Achse des Antennenkoordinatensystems den Satellitenvektor  $\mathbf{v}$  enthält (vergleiche Abbildung 72).

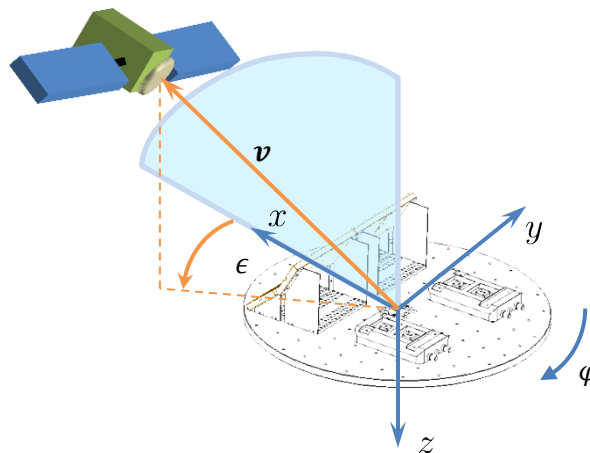


Abbildung 72: Low-Profile-Antenne mit Antennenkoordinatensystem

Der Winkel  $\epsilon$  zwischen dem Satellitenvektor und der beschriebenen Viertelebene wird als Fehlermaß für die Abweichung von der idealen Ausrichtung angesehen.

Für die Geschwindigkeitsregelung wurden zunächst nur die Informationen des dreiachsigen Gyros als Messwerte herangezogen, also die Komponenten  $\omega_x$ ,  $\omega_y$  und  $\omega_z$  des Drehvektors  $\boldsymbol{\omega}_{Ant}$  bezogen auf das Antennenkoordinatensystem. Aus der Forderung, dass die zeitliche Änderung dieses Winkels durch einen Wert  $\dot{\epsilon}_{ref}$  von der überlagerten Positionsregelung vorgegeben wird, folgt für die Abweichung  $\Delta\dot{\phi}$  der zu regelnden Drehgeschwindigkeit  $\dot{\phi}$  des Drehtellers von der benötigten Drehgeschwindigkeit  $\dot{\phi}_{ref}$  folgende Beziehung:

$$\Delta\dot{\phi} = -\omega_z + \frac{v_z}{v_x} \omega_x - \dot{\epsilon}_{ref} \sqrt{1 - \left(\frac{v_z}{v_x}\right)^2}$$

Diese Abweichung sollte möglichst klein bleiben, was durch den Einsatz eines PID-Reglers entsprechend

$$\tau_\varphi = K_p \Delta\varphi + K_i \int_{t_0}^t \Delta\varphi dt' + K_d \frac{d\Delta\varphi}{dt}$$

erzwungen wird. Die auftretenden Komponenten  $v_x$  und  $v_z$  des Satellitenvektors  $\mathbf{v}$  im Antennenkoordinatensystem wurden dabei zunächst als bekannt angenommen und müssen einer entsprechenden Lageschätzung entnommen werden. Diese kann direkt auf der Grundlage der HF-Empfangseinheit erfolgen oder über eine Sensorfusion in einem erweiterten Kalman-Filter. Innerhalb des Projektes wurde ein solcher erweiterter Kalman-Filter, basierend auf den Messdaten des Accelerometers und des Magnetometers, sowie die zugehörige Geschwindigkeitsregelung entworfen und simulativ erprobt. Der Einsatz des Magnetometers erwies sich jedoch innerhalb der Messkammer als ungeeignet, da aufgrund der guten elektro-magnetischen Schirmung das Erdmagnetfeld nicht mehr messbar war. Ein alternativer Schätzalgorithmus konnte aus Zeitgründen nicht mehr auf der Hardware implementiert werden.

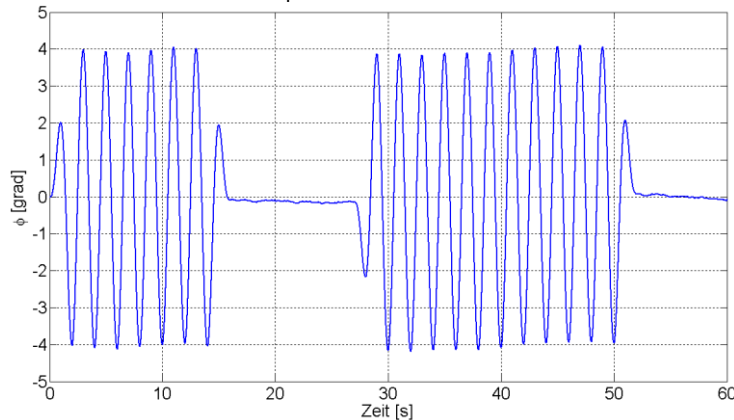


Abbildung 73: Positionsabweichung mit Zu- und Abschaltung der Positionsregelung nach dem Conical-Scan-Verfahren

Wie weiter oben beschrieben wurde für die Entwicklung der Positionsregelung angenommen, dass die Low-Profile-Antenne kein Monopuls-Signal liefert, das direkten Aufschluss über die Lageabweichung liefern könnte. Um die Abweichung von der idealen Ausrichtung zu erfassen und gegebenenfalls zu korrigieren musste ein Step-Tracking-Verfahren entworfen werden, das auf der Bewegung der Antenne um die lokale z-Achse basiert. Grundlage für die Bewegungsvorgabe war der zuvor entworfene Geschwindigkeitsregelkreis sowie ein Trajektoriengenerator, der die notwendige Bewegung plant. Innerhalb des Projektes wurden verschiedene Verfahren simulativ erprobt. Aufgrund des hohen zu erwartenden Rauschanteils wurde letztlich jedoch ein Conical-Scan-Verfahren mit integrierend wirkendem Schätzalgorithmus als sinnvoll erachtet. Der Trajektoriengenerator erzeugt dabei ein zur Ausgangslage symmetrisches Schwenksignal, das der Positionsregelung überlagert wird. Damit der Geschwindigkeitsregelkreis der vorgegebenen Schwenkbewegung folgen kann, musste ein hinreichend glatter Verlauf vom Trajektoriengenerator erzeugt werden. Neben der Sollvorgabe für den Geschwindigkeitsregelkreis berechnet der Trajektoriengenerator gleichzeitig Schätzwerte für die aktuelle Position innerhalb der Schwenkbewegung, die zur Schätzung der Lageabweichung benötigt wird. Der für die Simulation implementierte Positionssensor schätzt ausgehend vom HF-Empfangsstärkesignal die Abweichung zur idealen Ausrichtung auf den Satelliten. Auf der Basis dieser Schätzwerte wurde ein PD-Regler entworfen, der über den Geschwindigkeitsregelkreis die Position regelt.

Wird für eine gewisse Zeit ein sehr kleiner Positionsfehler geschätzt, so wird die Positionsregelung abgeschaltet und der Schwenkvorgang entsprechend Abbildung 73 beendet. Die Ausrichtung auf den Satelliten muss dann allein durch den Geschwindigkeitsregelkreis („open loop“) erfolgen. Sinkt das Empfangssignal unter einen Schwellwert ab, beginnt der Schwenkvorgang abermals. Nach einer entsprechenden Einschwingzeit des Schätzers wird die Positionsregelung wieder zugeschaltet. Dieses Vorgehen bietet mehrere Vorteile. Zum einen werden durch das fehlende Schwenken bei guter Ausrichtung die Antriebe geschont, die aufgenommene Leistung in den Antrieben reduziert und die Empfangs- und Sendeleistung erhöht. Erst wenn die Antenne deutlich von der idealen Ausrichtung abweicht, wird die Positionsregelung wieder eingeschaltet, um korrigierend einzugreifen.

### High-Gain-Antenne

Die High-Gain-Variante (Abbildung 74) kann in zwei zueinander orthogonalen Achsen bewegt werden, um die Antenne möglichst genau auf den Satelliten auszurichten. Damit ist es möglich, entstehende Abweichungen sowohl in Elevations- als auch in Azimutrichtung zu korrigieren. Als ideal ausgerichtet gilt die Antenne, wenn der Satellitenvektor in Hauptempfangsrichtung zeigt. Für die Geschwindigkeitsregelung wird gefordert, dass sie die Antenne bezüglich der y- und z-Achse des Antennenkoordinatensystems mit den Referenzwinkelgeschwindigkeiten  $\omega_{y,ref}$  und  $\omega_{z,ref}$  bewegt.

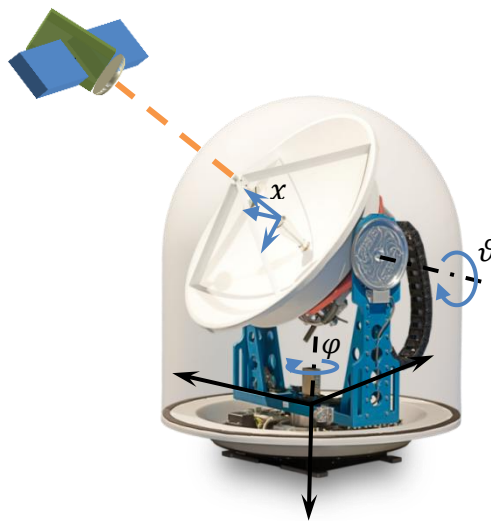


Abbildung 74: High-Gain-Antenne mit Antennen- (blau) und Fahrzeugkoordinatensystem (schwarz)

Für die beiden Drehachsen ergibt sich dann eine Abweichung  $\Delta\dot{\vartheta}$  bzw.  $\Delta\dot{\varphi}$  der Drehgeschwindigkeit  $\dot{\vartheta}$  bzw.  $\dot{\varphi}$  von der notwendigen Drehgeschwindigkeit  $\dot{\vartheta}_{ref}$  bzw.  $\dot{\varphi}_{ref}$  entsprechend den Gleichungen

$$\Delta\dot{\vartheta} = \omega_{y,ref} - \omega_y$$

$$\Delta\dot{\varphi} \cos \vartheta = \omega_{z,ref} - \omega_z$$

Dabei bezeichnen  $\omega_y$  und  $\omega_z$  auch hier die gemessenen Komponenten des Drehvektors bezogen auf das Antennenkoordinatensystem. Zwei separate PID-Regler werden eingesetzt, um die entsprechenden Abweichungen in beiden Achsen klein zu halten:

$$\tau_{\vartheta} = K_p \Delta\dot{\vartheta} + K_i \int_{t_0}^t \Delta\dot{\vartheta} dt' + K_d \frac{d\Delta\dot{\vartheta}}{dt}$$

$$\tau_{\varphi} = K_p \Delta\dot{\varphi} + K_i \int_{t_0}^t \Delta\dot{\varphi} dt' + K_d \frac{d\Delta\dot{\varphi}}{dt}$$

Die beiden Winkelgeschwindigkeiten  $\omega_{y,ref}$  und  $\omega_{z,ref}$  sind die Ausgänge der Positionsregelung. Hierfür stehen im Falle der High-Gain-Antenne zwei Monopuls-Signale zur Verfügung, die innerhalb des Empfangsbereichs in zwei Achsen die Abweichung der rotatorischen Lage gegenüber der exakten Ausrichtung auf den Satelliten angeben. Diese Achsen stimmen im Allgemeinen nicht mit den Achsen des Antennenkoordinatensystems überein. Ihre Verdrehung gegenüber dem Antennenkoordinatensystem musste zunächst vermessen werden, um für die Positionsregelung eine Korrektur vornehmen zu können. Anschließend konnte die Abweichung in y- wie auch in z-Richtung gegenüber dem Antennenkoordinatensystem separat durch jeweils einen PID-Regler geregelt werden, dessen Stellsignal als Führungssignal des zugeordneten Geschwindigkeitsreglers dient.

### Simulationsergebnisse

Aus der Vielzahl an Simulationsergebnissen werden hier beispielhaft die zwei herausgegriffen, die für jede der beiden Antennen das Verhalten der Geschwindigkeitsregelung zeigen. Abbildung 75 zeigt dabei die Abweichung  $\epsilon$  der LP-Antenne in Azimutrichtung bei der Autobahnfahrt des Geländewagens. Für die Fahrdauer von ca. 350 Sekunden ergab sich dabei für  $\epsilon$  eine Standardabweichung von kleiner als  $0.2^\circ$ . Deutlich größere Werte ergaben sich bei der Abweichung für die Geschwindigkeitsregelung der HG-Antenne bei der Fahrt des Geländewagens durch schweres Gelände (vergleiche Abbildung 76). Die Standardabweichung des Gesamtfehlers liegt hier kleiner als  $0.5^\circ$  bei einer Fahrdauer von 60 Sekunden.

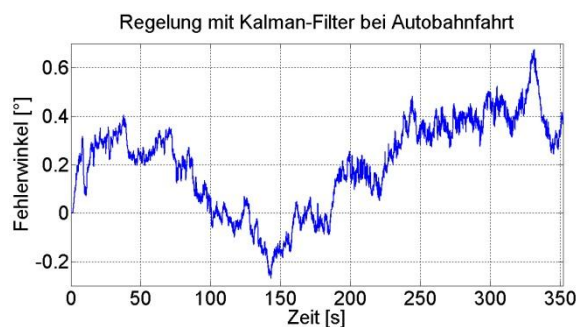


Abbildung 75: Fehler der Geschwindigkeitsregelung bei der LP-Antenne während der Fahrt mit dem Geländewagen auf der Autobahn

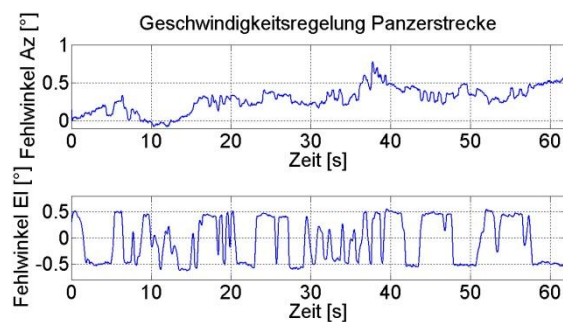


Abbildung 76: Fehler der Geschwindigkeitsregelung in Azimut und Elevation bei der HG-Antenne während der Fahrt mit dem Geländewagen im schweren Gelände

### Implementierung in Hardware

Die beschriebenen Regelverfahren wurden simulativ untersucht, in Teilen auf dem Prototypen-Controllerboard als Echtzeit-Regelung implementiert, getestet und erfolgreich am Demonstrator präsentiert.

#### 2.1.6 Validierung und Demonstration

##### 2.1.6.1 Testanlage „Am Vogelherd“

Das Ziel dieses Teilprojektes war die Konzeption und Implementierung eines Systems für Test und Evaluierung von Antennen-Nachführsystemen. Dafür musste ein realitätsnahes Umfeld für mobile Satellitenterminals geschaffen werden, welches auf der Testanlage „Am Vogelherd“ ohne Einbindung realer Satelliten erzeugt werden kann. Zusätzlich musste eine Messeinrichtung für das Depointing der Antenne entwickelt werden.

Die Testanlage „Am Vogelherd“ bietet gute Voraussetzungen für ein solches System: Zum einen ein Laborgebäude mit einer aufgesetzten Messkammer, die als Terminalstandort dient und zum anderen in ca. 100 Meter Entfernung einen 50m hohen Antennenturm, der als „Satelliten-träger“ genutzt werden kann (Abbildung 77). Die Messkammer kann in Richtung Turm geöffnet werden, so dass eine reale Funkverbindung aufgebaut werden kann. Zusätzlich sind diverse infrastrukturelle Einrichtungen, wie Netzwerkverbindungen, hochwertige Koaxialverbindungen zwischen den wichtigen Orten an Turm und Gebäude und entsprechende Überwachungs- und Steuerungseinrichtungen vorhanden.



Abbildung 77 Luftbild der Testanlage

Das konzeptionierte System für Test und Evaluierung kann in mehrere Bereiche untergliedert werden: Bewegungsemulation, Satelliten- und Kanalemulation, Detektorkreuz zur Depointing-Messung und Steuerung und Synchronisierung der gesamten Anlage.

### Bewegungsemulation

Bei der Bewegungsemulation werden die rotatorischen und translatorischen Bewegungen getrennt behandelt.

Die rotatorischen Bewegungen werden durch einen Motion-Emulator erzeugt, der die Verdrehung in allen drei Achsen ermöglicht. Wobei die innere Achse um 360° drehbar ist und die Richtung des Fahrzeugs (Yaw) wiedergibt. Die mittlere Achse ist um 90° drehbar und stellt die Verkipfung (Pitch) des Fahrzeugs entlang der Längsachse dar und die äußere Achse dient der Emulation der seitlichen Verkipfung (Roll), ebenfalls um 90°.

Alle Bewegungen sind mit einer Geschwindigkeit von bis zu 300°/s möglich und die Beschleunigung kann mit bis zu 1000°/s<sup>2</sup> erfolgen.

Durch die Entwicklung geeigneter Software können auch aufgezeichnete Profile (z.B. die Profile der Messungen aus Abschnitt 2.1.5.2) realistisch wiedergegeben werden.

Die translatorischen Bewegungen hingegen können nicht real ausgeführt werden. Deshalb werden diese durch die Einspielung von aufgezeichneten oder generierten GPS-Profilen emuliert. Hierzu wurde ein GPS-Recorder beschafft, der die empfangenen Signale z.B. während einer

Messfahrt, aufzeichnet und exakt wiedergeben kann. Dadurch ist es möglich reale GPS-Profile an die Terminals weiterzugeben. Dies kann sowohl per Kabel als auch über die Luftschnittstelle in der Messkabine erfolgen.

### Satelliten- und Kanalemulation

Die Emulation des Satelliten erfolgt vom Antennenturm aus. Dieser wurde mit einem klimatisierten Technikschränk ausgestattet, der im oberen Teil ein hochfrequenzdurchlässiges Fenster besitzt, hinter dem die Antennen für Empfang und Senden beweglich angebracht sind. Des Weiteren befindet sich eine Umschaltmatrix in diesem Schränk, die zur Umschaltung der Polarisation und der Frequenzbereiche dient, aber auch Dämpfungsglieder, zur Pegelanpassung beinhaltet. Kernstück sind aber Frequenzumsetzer, die Signale aus dem Ka-Band auf eine 140 MHz-Zwischenfrequenz umsetzen und die eigentliche Payload repräsentieren. Zusätzlich sind in diesem Schränk noch Geräte zur Steuerung, Überwachung und Spannungsversorgung verbaut worden.

Die umgesetzten Signale werden über die Verkabelung am Turm zum Kanalsimulator weitergeleitet. Dort findet die Emulation von Delay, Fading und Doppler statt. Diese kann entweder statisch oder dynamisch in Form von zeitlichen Profilen erfolgen. Diese Profile sind ferngesteuert und synchronisiert abspielbar.

### Detektorkreuz

Eng verbunden mit dem Satellitenemulator ist das Detektorkreuz zur Depointing-Messung. Es besteht aus vier Boxen, die wie der Technikschränk ein hochfrequenzdurchlässiges Fenster aufweisen, hinter dem die Antennen zum Empfang verbaut sind. Diese Antennen sind direkt an Leistungsdetektoren montiert, die die empfangene Leistung in ein symmetrisches Spannungssignal wandeln. Dieses Spannungssignal wird von einer PC-Messkarte im Technikschränk digitalisiert und aufgezeichnet. Die Karte wurde speziell auf ihre Eigenschaften bezüglich der synchronen Abtastung aller Kanäle und der hohen Samplerate (250 ksps) ausgewählt. Die erforderliche Samplerate lässt sich aus der maximalen Geschwindigkeit der Antenne berechnen. Diese liegt im Fall der (eigentlich anormalen) Gleichbewegung von Antenne und Motion-Emulator bei ca. 850°/s. Bei einer Auflösung von 0.1° ergibt sich nach dem Abtasttheorem eine Samplerate von mindestens 17000 sps. Die Wahl von 250 ksps begründet sich nicht aus der Bewegung, sondern aus der Modulation des Signals, da diese zu Einbrüchen unabhängig von der Bewegung führen kann und somit die Messung verfälschen oder die Auflösung herabsetzen könnte.

Die Methodik und erreichbare Genauigkeit wurden im Rahmen einer Masterarbeit untersucht und beschrieben [66] [67].

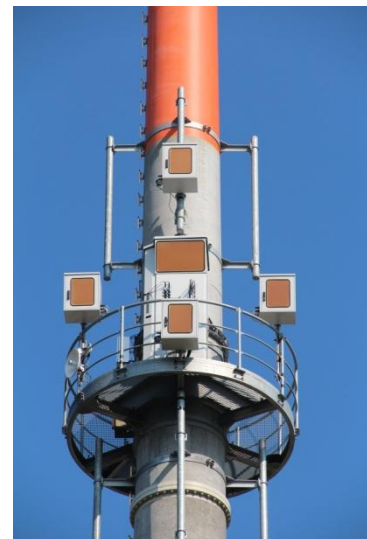


Abbildung 78 Detailsicht Detektorkreuz

### Steuerung und Synchronisation

Alle Komponenten der Anlage können von einem Bedienraum im Laborgebäude aus ferngesteuert werden. Um diese zentrale Bedienung zu ermöglichen wurde eine Software entwickelt die sowohl die Einstellungen vor Beginn einer Messung vornehmen lässt, als auch die synchronisierte Steuerung der einzelnen Komponenten während eines Testlaufs ermöglicht.

Die Synchronisation erfolgt auf zwei Wegen, zum einen über einen 10MHz-Referenz-Takt, zum anderen über das Network-Time-Protocol (NTP). Das Taktsignal dient dabei zur Stabilisierung der internen Taktgeber und damit der via NTP verteilten Uhrzeit. Beide Signale stammen von einem GPS-stabilisierten Zeitserver, der trotz langer Übertragungstrecken eine Synchronität von einer Millisekunde ermöglicht. Da die einzelnen Profile mit einer Genauigkeit von 1ms oder weniger aufgezeichnet wurden, ist diese Genauigkeit ausreichend. Einzig die Messkarte des Detektorkreuzes arbeitet mit einer höheren Samplerate von 250 kHz um auch kurzfristige Signaleinbrüche auf Grund der Modulation erkennen zu können.

### 2.1.6.2 Demonstration verschiedener Applikationen für ein Katastrophenszenario

#### Repräsentatives Demonstrationsszenario für einen typischen Kriseneinsatzfall

Nach der Analyse der Nutzeranforderungen wurden diese bei der Definition des MoSaKa-Demonstrators berücksichtigt und die wesentlichen Erkenntnisse umgesetzt. Dabei waren folgende Rahmenbedingungen bestimmend:

Tabelle 9: Übertragung der Nutzeranforderungen auf einen Demonstrator

Wichtigste Anwendungen	GPS, Lagebilddarstellung, unterschiedliche Geodaten (GIS) Textnachrichten Dateien / Fotos Video
Mobilität / Anwendungen	Stationär >> Nomadisch (z.B. Geodaten) Nomadisch/Mobil >> Stationär (z.B. Fotos) Mobil >> Stationär (z.B. GPS)
Datenraten / Terminals	HG / HG: 4 Mbit/s HG / LP: 120 kbit/s LP / LP: 32 kbit/s

Der Demonstrationsaufbau sollte alle Punkte aus Tabelle 9 abdecken und so die geforderten Anforderungen simulieren.

Mithilfe der Satellitenkommunikation können räumlich weit auseinander liegende mobile Einheiten, verbunden werden. Agieren die Einheiten jedoch in einem geringeren Radius, kann auf ein Wireless Local Area Network (WLAN) mit erhöhter Sendeleistung und ad-hoc Vernetzung zurückgegriffen werden. Dies stellt für Rettungskräfte eine kostengünstige Erweiterung des Aktionsradius der Einsatzkräfte um das Satellitenterminal dar. Deswegen wurden beide Arten von Kommunikationssystemen verwendet, um so die komplementären Vorteile beider Kommunikationssysteme zu demonstrieren. Um den Demonstrationsaufbau so realistisch wie möglich zu gestalten wurde ein typischer Einsatzablauf des THWs nach einem schweren Unwetter abgebildet. Für den Demonstrationsaufbau wurden vier Einheiten ausgewählt. Bei diesen Einheiten handelte es sich um drei Zugtrupps (ZTrs) und eine Fachgruppe Führung und Kommunikation (FGr FK). Hierbei stellen die FGr FK den nomadischen bzw. den stationären Teil und zwei der ZTrs den mobilen Teil, welche über ein High Gain Terminal (HG) und ein Low Profile Terminal



(LP) miteinander verbunden sind. Der dritte ZTr ist über ein WLAN mit der FGr FK verbunden und stellt ebenfalls eine mobile Komponente dar. In der Abbildung 79 ist der prinzipielle Aufbau der Demonstration dargestellt, wobei hier nur der ZTr 1 „echt“ mobil ist und die beiden anderen simuliert werden.

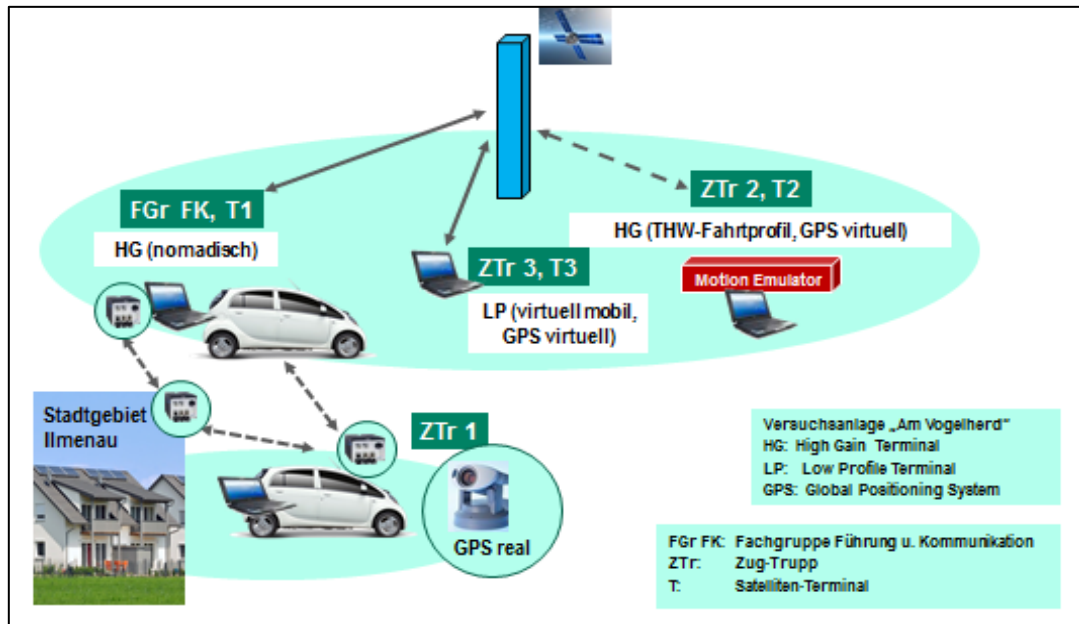


Abbildung 79: Aufbau des Demonstrationssetups

Bei der Konzeption wurde Wert darauf gelegt, dass sowohl Applikationen aus dem Open Source- und dem Commercial of-the-shelf-Bereich (COTS) implementiert und verwendet werden können. Für die Demonstration wurden hierbei aus dem jeweiligen Bereichen Applikationen ausgewählt und in das Konzept integriert. Für den COTS-Bereich wurde das Produkt ArcGIS der Firma ESRI (Environmental Systems Research Institute) und für den Open Source Bereich ein proprietärer GeoData Viewer auf SOA-Basis verwendet.

### GeoData Viewer

Bei dem GeoData Viewer handelt es sich um eine proprietäre Anwendung. Diese Applikation besitzt die Möglichkeit Karten aus verschiedenen Quellen zu importieren und darzustellen, wodurch man nicht an einen bestimmten Kartenanbieter gebunden ist. Mit dieser Software lassen sich auch Einsatzlagen auf den Karten darstellen und eine Einsatzplanung durchführen. So kann beispielsweise eine Routenplanung erstellt und mittels GPS-Tracking überwacht werden. Ebenso ist das Einzeichnen und Markieren von speziellen Flächen, wie Gefahrenzonen, möglich. Auch ein Versenden der erstellten Informationen ist möglich. So können beispielsweise Fahrtrouren erstellt und mittels eines File Transfers an andere Nutzer versandt werden. Auch lassen sich nicht nur Routen, sondern auch Bilder, Texte und andere Geodaten versenden. Um den Versand dieser Daten so einfach wie möglich zu gestalten, beinhaltet der GeoData Viewer ein eigenes Messenger Tool, mit dem diese Aktionen durchgeführt werden können. In der Abbildung 80 ist das Graphical User Interface (GUI) des GeoData Viewers dargestellt. Hier sieht man im Hintergrund die Kartendarstellung auf der Basis von Open Street Maps. Zusätzlich sind in die Karte Tracks von unterschiedlichen Fahrzeugen und Einheiten aus dem Katastrophenschutz eingezeichnet, welche mit Hilfe eines Symbolgenerators erzeugt werden können. In der linken Bild-

hälfte ist ein Fenster sichtbar, welches eine Bilddatei zeigt, die gerade über den Messenger empfangen worden ist.

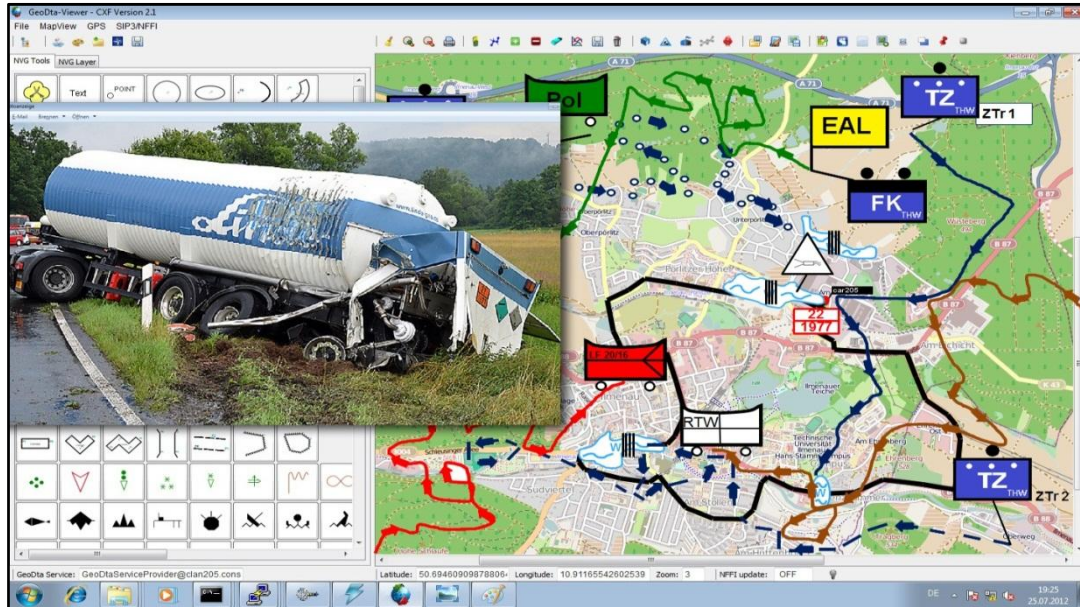


Abbildung 80: GUI des GeoData Viewers

### ArcGIS von ESRI

Wie bereits erwähnt wurde bei der Konzeption darauf geachtet, dass sowohl Applikationen aus dem Open Source Bereich und dem COTS-Bereich verwendet werden können. Mit dem Programm ArcGIS von ESRI wird der COTS-Bereich abgedeckt. Bei dieser Applikation handelt es sich um ein Programm das zur Geodatenverarbeitung und Kartendarstellung verwendet wird. Ein beispielhafter Screenshot ist in Abbildung 81 dargestellt.

Mit ArcGIS ist es möglich verschiedene Informationen als Layer einzubinden. Bei diesen Layern handelt es sich um einzelne Folien die unterschiedliche Informationen beinhalten. So können beispielsweise Straßennetze, Gewässer oder Höhenlinien in diese eingezeichnet und je nach Verwendungszweck überlagert werden. Mit diesen unterschiedlichen Layern ist es möglich nur die für einen bestimmten Anwendungszweck erforderlichen räumlichen Informationen in den Karten darzustellen, umso eine bessere Übersicht zu erreichen.

Durch die Überlagerung oder Verschneidung von Layern mit unterschiedlichen Geoinformationen können raumbezogene Analysen durchgeführt und in Form einer Karte visualisiert werden. So kann beispielsweise durch das Erstellen eines Layers mit Überschwemmungsflächen und anschließendem Verschneiden mit einem Layer, der das Straßennetz darstellt, ein Layer mit überschwemmten Straßen erzeugt werden.

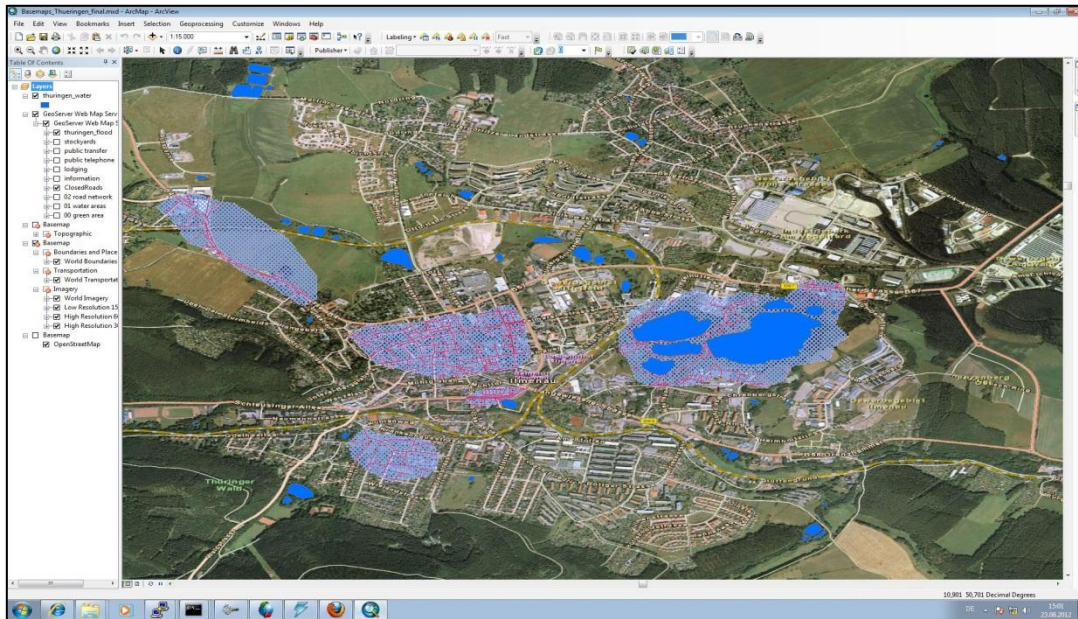


Abbildung 81: Screenshot von ArcGIS

### Web Map Service

Unter dem Web Map Service (WMS) versteht man die zentrale Ablage von Kartenlayern, welche mit Hilfe von einer Applikation, wie beispielsweise ArcGIS, erstellt werden. Nachdem die Karten, oder auch spezielle Layer mit ArcGIS erstellt worden sind, werden diese in einer zentralen Ablage auf dem WMS abgelegt. Dieser WMS (Abbildung 82) dient dazu die Geodaten auszutauschen, ohne dass diese über ein Messenger Tool verschickt werden müssen. Dies erleichtert die taktische Planung für die Einsatzleitung erheblich, da alle Einheiten über den WMS auf dieselben Daten zugreifen können. Diese Karten- oder Layer-Files werden dann von den jeweiligen Einheiten mit ArcGIS lokal heruntergeladen. Die Geodaten können sowohl mit ArcGIS als auch mit dem GeoData Viewer verwendet werden.

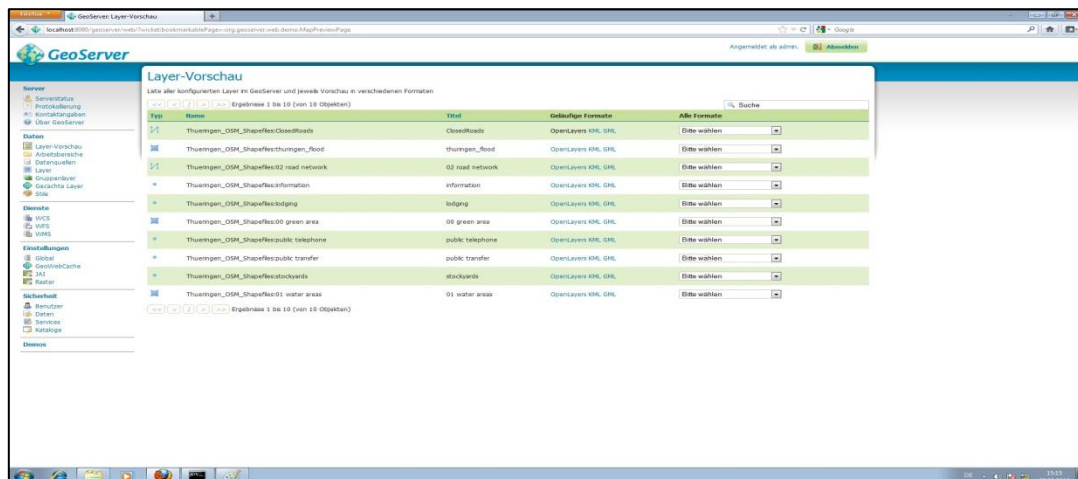


Abbildung 82: GUI des WMS

### Service Orientierte Architektur

Eine IT-Architektur die vorhandenen EDV-Komponenten in Dienste kapselt und dann so koordiniert, dass ihre Leistungen zu höheren Diensten zusammengefasst und anderen Nutzern zur

Verfügung gestellt werden kann, bezeichnet man als Service Orientierte Architektur (SOA). Im Rahmen des MoSaKa-Demonstrators wurde eine speziell für den behördlichen Bereich entwickelte SOA auf Basis eines verteilten, logischen Enterprise Service Bus (ESB) realisiert. Neben dem Austausch von Nachrichten zwischen den Nutzern bietet der ESB auch eine umfangreiche Intelligenz zum Transformieren von Nachrichteninhalten und –Protokollen, zur Verbesserung der IT-Sicherheit und zum Synchronisieren von Nachrichten. Das Grundprinzip des ESBs und die einzelnen Fähigkeiten sind in Abbildung 83 dargestellt.

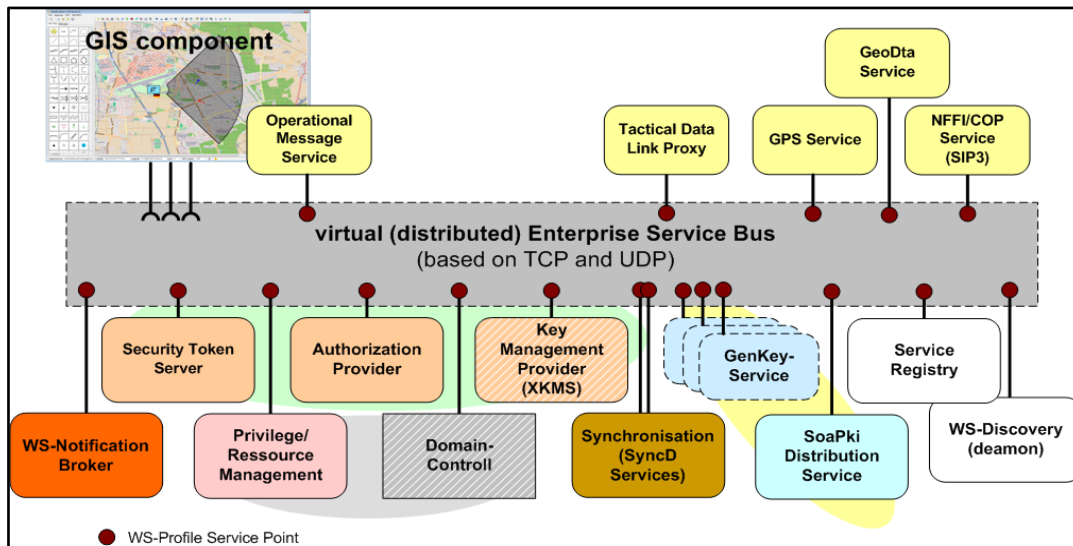


Abbildung 83: Aufbau eines verteilten Enterprise Service Buses

---

## 2.1.7 Zusammenfassung

Wie die Analyse der Nutzeranforderungen gezeigt hat, existiert im Bereich des Krisenmanagements ein hoher Bedarf an einer autarken und breitbandigen Kommunikation. Diese Notwendigkeit resultiert aus der fehlenden oder durch die Katastrophe eingeschränkten Verfügbarkeit terrestrischer Kommunikationsinfrastruktur im Einsatzgebiet. Bisher ist für die Einsatzkräfte die Sprachverbindung der wichtigste Kommunikationsdienst. Die Übertragung von Textnachrichten, Dateien, Videos und Geodaten im Bereich des Katastrophenschutzes nimmt jedoch immer mehr an Bedeutung zu. Diese höherwertigen Dienste ermöglichen es den Einsatzleitungen, sich ein genaueres Bild über die vorherrschende Lage zu machen und so die Einsatzkräfte noch effizienter einzusetzen und deren Einsatz raumbezogen zu dokumentieren.

Im Rahmen des Projektes MoSaKa wurde ein Satellitenkommunikationssystem entwickelt, welche diese Anforderungen adressiert.

Für das MoSaKa-Terminal wurden zwei nachgeführte Antennen für das Ka-Band entwickelt.

Die High-Gain-Antenne realisiert einen ausreichenden Gewinn auch für hochdatenratige Dienste, wohingegen die Low-Profile-Antenne für eine möglichst geringe Bauhöhe entworfen wurde. Für beide Verfahren wurde die prinzipielle Machbarkeit von Open- als auch Closed-Loop-Tracking unter Einsatz von Low-Cost-MEMS-Sensoren anhand von Demonstratoren nachgewiesen.

Die für MoSaKa entwickelte Wellenform bietet voll vernetzte Konnektivität sowie ein dezentrales und dynamisches Ressourcen-Management ohne zentrales Terminal (Hub).

Durch die Verwendung von SC-FDMA, leistungsfähiger Fehlerschutzverfahren und schneller Link-Adaption wird die begrenzte EIRP des Uplink-Terminals zum Satelliten effizient ausgenutzt.

IP- und IPv6 - Pakete werden mittels eines RLE-basierten MAC-Layers transportiert. Die Synchronisation der unterschiedlichen Terminals erfolgt dabei unter Verwendung eines genauen GPS-Empfängers.

Sowohl Schicht 2 als auch die höheren Schichten ermöglichen die Einhaltung einer definierten QoS. Die Realisierung der QoS sowie deren Signalisierung ist auf allen Schichten implementiert. Die Funktion des QoS wurde anhand einer Beispielanwendung demonstriert.

Bei dem Projekt MoSaKa wurde speziell auf diese höherwertigen Anwendungen, wie Text-, Bild- und Videoübertragung, ein besonderes Augenmerk gelegt. Bisherige Kommunikationssysteme für den BOS-Bereich beschränken sich vornehmlich auf die Sprachübertragung. Jedoch ist aus den Nutzerbefragungen hervor gegangen, dass eben genau diese höherwertigen Applikationen als wichtig für zukünftige Kriseneinsätze gesehen werden. Um dieser Forderung nach neuen Datenübertragungsmöglichkeiten nachzukommen müssen andere Kommunikationssysteme verwendet werden. Diese sollen autark und hochmobil arbeiten können. Mobile / nomadische Satellitenkommunikation im Ka-Band (MoSaKa) in Kombination mit einem WLAN-basierten Ad-Hoc Netzwerk ist hierfür ein geeigneter Kandidat.

## 2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Folgenden werden die wesentlichsten Positionen des Verwendungsnachweises dargestellt.

Die bewilligten Mittel wurden zweckgebunden für das MoSaKa-Projekt eingesetzt. Neben den Kosten für das wissenschaftlich-technische Personal wurde als wesentliche Investition Ausstattung für in Kapitel 2.1.6.1 beschriebene SatCom-Testanlage beschafft.

### 2.2.1 SatCom-Testanlage

Das wesentliche Ausstattungsmerkmal der Anlage ist der in Abbildung 84 gezeigte 3-Achs-Motion-Emulator der Firma Acutronic. Dieses Gerät ermöglicht die realitätsnahe Wiedergabe von Bewegungs- und Erschütterungsprofilen. Es ermöglicht den Test von Antennenterminals bis zu einer Gesamtmasse von 30 kg unter hochdynamischen Bedingungen. Der Test von schwereren Systemen ist für eingeschränkte Dynamik ebenfalls möglich.

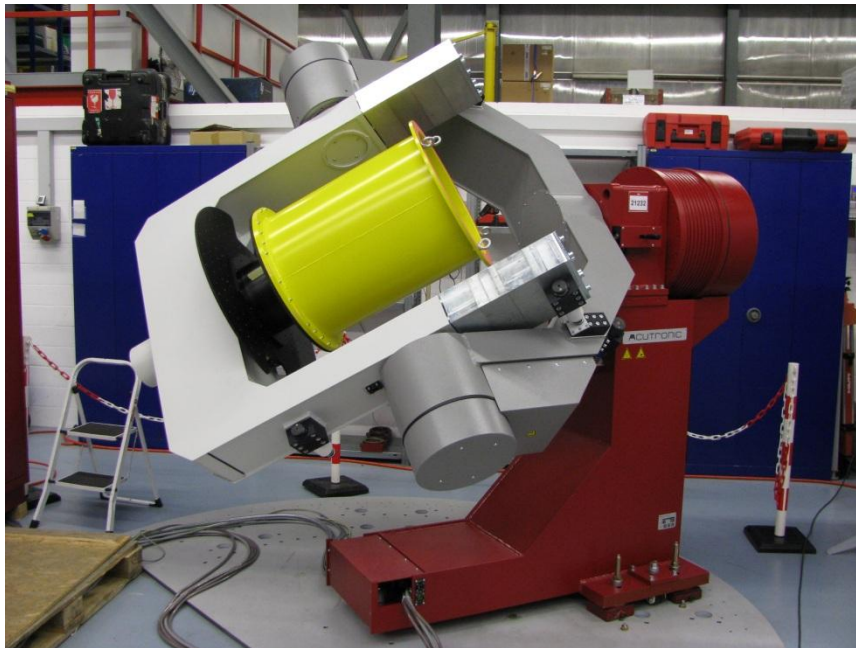


Abbildung 84 3-Achs-Motion-Emulator der Firma Acutronic

Um die zu berücksichtigenden Bewegungsprofile messen zu können, wurde ein Fahrdynamik-Messsystem „GENESYS ADMA“ beschafft. Dieses System fusioniert Messungen aus faseroptischen Gyroskopen und einem RTK-GPS mit Hilfe eines Kalmanfilters.

Neben den Bewegungsprofilen wurden auch die empfangbaren GPS-Signale aufgezeichnet. Die GPS-Signale können parallel zu den Bewegungsprofilen abgespielt werden. Dazu diente die Record-/Playback-Lösung „LabSat“ von RaceLogic.

Die Satellitenübertragungstrecke kann auf der Testanlage originalgetreu nachgebildet werden. Die dabei entstehende Verzögerung, Fading, und sonstige Impairments werden dabei mittels des Kanalsimulators IZT DCS 3020 nachgebildet. Um den Kanalsimulator auf den von Satelliten

benutzten Frequenzbändern anbinden zu können, waren mehrere Up- und Downconverter-Module nötig.

Die Konverter sowie die Antennen wurden in einem klimatisierten Schrank auf dem Antennenturm in 32 m Höhe auf einem Betonmast angebracht. Notwendige Verkabelung, Umschalter sowie die Elektronik für das Detektorkreuz (vgl. Abschnitte 2.1.6.1) wurden ebenfalls aus Projektmitteln beschafft.

### 2.2.2 Terminal IDU/ODU

Die mechanischen Positionierer für die High-Gain bzw. Low-Profile-Antennen der Outdoor-Einheit wurden projektspezifisch von der Firma iMar Navigation entwickelt und geliefert. Als weitere signifikante Position ist die Summe der Materialkosten für die Entwicklung und den Aufbau der DT4000-basierten Physical-Layer-Hardware, den Pointing-/Tracking-Controller sowie die für die höheren Schichten beschafften Rechner zu nennen. Um die Kommunikation mehrerer Terminals testen zu können, musste diese Komponenten jeweils in mehrfacher Ausführung beschafft werden.

Um Integration und Test mit den Anwendungen der IABG zu ermöglichen und die Interaktion mit bodengestützten Netzwerkfunktionen zu überprüfen, wurden die im Umfeld der Krisenkommunikation eingesetzte HiMonn-Knoten beschafft.

## 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit

Wie im Projektantrag beschrieben, bestand (und besteht) notwendiger Forschungsbedarf. Die Technologie landmobiler Satellitenterminals generell – nicht nur auf das Ka-Band beschränkt – ist noch sehr wenig verbreitet. Die zu erwartende steigende Verbreitung dieser Dienste hat einen steigenden Frequenzbedarf zur Folge. Die Situation der Frequenzbelegung in anderen Satellitenbändern hat sich während der Projektlaufzeit verschärft und wird sich weiter verschärfen. Aufgrund des ebenfalls rapide steigenden terrestrischer Funkanwendungen, insbesondere des Mobilfunks, besteht die reale Gefahr, dass langfristig bisher für Satellitenfunk genutzte Frequenzbänder dem Mobilfunk zugeschlagen werden. Der Satellitenfunk kann und muss dann auf höhere Frequenzen, wie z.B. das Ka-Band ausweichen. Das Ka-Band stellt dabei besondere Herausforderungen an sendefähige Antennen, da Up- und Downlink-Frequenzbereich einen signifikanten Frequenzabstand aufweisen.

Selbst die Grundanwendung des mobilen Satellitenfunks ist derzeit nur schwach verbreitet. Die verwendeten Terminals sind entsprechend groß und teuer, oder auf niedrigbitratige Dienste beschränkt. Insbesondere wird jedoch beim Systemdesign von einer zentralen Gateway-Station ausgegangen. Dieses zentrale Gateway erweist sich bei der beabsichtigten Nutzung in Krisenfällen als Single-Point-Of-Failure. Für eine höhere Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit ist ein dezentralisiertes System sinnvoll, in dem einzelne Terminals unabhängig von einer Ankerstation ein Satellitennetzwerk aufbauen können. Dabei sind allerdings Fragen des Kanalzugriffs und der QoS zu beantworten.

Einige der sich ergebenden wissenschaftlichen und technologischen Fragen der Nutzung des Ka-Bandes im mobilen Umfeld, insbesondere auch mit Antennen kleiner Bauhöhe, konnten im Rahmen des Projektes MoSaKa adressiert werden. Grundlagen für ein krisengeeignetes, hoch-

verfügbares, dezentrales Satellitenkommunikationssystem unter Berücksichtigung von modernen Modulationsverfahren sowie von Quality-of-Service-Anforderungen wurden gelegt. Die Durchführung des Vorhabens war daher sowohl notwendig als auch angemessen. Im Übrigen wird auf die Zwischenberichte sowie die erzielten guten Ergebnisse verwiesen.

## 2.4 Voraussichtliche Nutzen im Sinne des Verwertungsplanes

Ziel des Projektes MoSaKa war die Entwicklung von technologischen Komponenten und Systemgrundlagen für die mobile Satellitenkommunikation im Ka-Band.

Entsprechend des Verwertungsplanes wurden für die IABG wertvolle Erkenntnisse sowohl bezüglich der Wünsche und Erwartungen der Anwender als auch Erfahrungen in der Planung und Betrieb von Systemen für die Kommunikation im Krisenfall gewonnen. Diese Erkenntnisse versetzen IABG in die Lage, in Zukunft Rettungs- und Krisenhilfskräften effizientere, bessere und dem tatsächlichen Bedarf besser angepasste Kommunikationsmittel zur Verfügung zu stellen.

Für die beteiligten Forschungsinstitute wurden wichtige Ergebnisse auf dem Gebiet von Know-how und Erfahrung auf dem Gebiet der Implementierung von Satellitenkommunikation gewonnen. Dies beinhaltet nicht nur lizenzierbares geistiges Eigentum, sondern insbesondere auch die Entwicklung und den Aufbau der in Kapitel 2.1.6.1 beschriebenen Testanlage. Diese Testanlage bietet insbesondere deutschen Unternehmen signifikante Vorteile bei Entwicklung und Test ihrer Terminals. Erste diesbezügliche Nutzungen durch Unternehmen sind zwischenzeitlich erfolgt; weitere Firmen und Bedarfsträger haben Ihr Interesse signalisiert.

Die insbesondere für die universitären Partner wichtigen Punkte wie Erkenntnisgewinn sowie die Erschließung und Etablierung neuer Technologien wurde erreicht. Die umfangreiche Liste an erfolgten bzw. geplanten Publikationen ist in Abschnitt 2.1.6.1 aufgeführt.

Im Rahmen des Projektes wurden im Rahmen der studentischen Ausbildung mehrere Abschlussarbeiten angefertigt. Die Forschungsarbeiten bilden weiterhin die Grundlage für mehrere geplante Dissertationen.

Aus den Vorarbeiten innerhalb des MoSaKa-Projektes resultierten weitere Forschungsprojekte bzw. sind diese geplant. Konkret werden z.B. die Tracking-Anforderungen (Abschnitt 2.1.5.2) im Rahmen des ESA-Projektes „Characterisation of Mobile Tracking Needs“ detaillierter untersucht.

## 2.5 Während der Projektdurchführung bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen

Auch andere Forschergruppen beschäftigten sich während der Projektlaufzeit mit dem Thema „Mobile Satellitenkommunikation im Ka-Band“. Bekannt sind z.B. das ebenfalls vom DLR geförderte Projekt SANTANA, welches technologisch allerdings einen zu MoSaKa komplementären Ansatz (Elektronisches Beamforming) verwendete.

Insbesondere auf dem militärischen Segment gewinnt das Ka-Band fortlaufend an Bedeutung. Eine größere Studie des Militärs untersuchte den Einsatz von mobilen Ka-Band-Terminals für



militärische Anwendungen [68]. Die veröffentlichten groben Ergebnisse ähneln denen von MoSaKa; die Details sind jedoch nicht veröffentlicht.

Im Bereich der Notfall- und Krisenkommunikation wurde 2011 die Initiative emergency.lu [69] gegründet. Die Regierung von Luxemburg hat mit einer Arbeitsgemeinschaft aus 3 Luxemburger Firmen (HITEC Luxembourg S.A., SES ASTRA TechCom S.A. in Zusammenarbeit mit Ducair-Luxembourg Air Ambulance) eine Vereinbarung über die weltweite Bereitstellung einer Einsatzlösung für Katastrophenhilfe und humanitäre Einsätze getroffen (zitiert aus [70]). Die Einsatzbereitschaft des Systems war für Ende 2011 geplant.

In Bezug auf die angedachten Anwendungsszenarien des MoSaKa Systems, v.a. in der Frühphase ähneln sich beide Systeme. Die wesentlichen Unterschiede sind

- Emergency.lu bietet eine Lösung aus einer Hand an. Das System ist soweit integriert, dass eine Entsendung in eine Krisenreaktion innerhalb 2 Stunden mit eigenen Flugzeugen beworben wird.
- Emergency.lu bietet stationäre und nomadische Terminals für die Kommunikation im C- oder Ku-Band
- Das emergency.lu Terminal stellt ein Gateway dar, das ein lokales Netzwerk (z.B. LAN oder WLAN) über den Satelliten an das Internet an (IP Verbindungen)
- Verwendung von kommerziellen Diensten (z.B. Skype)
- Durchmesser der Antennen bis 2.4 m
- Mobile Kommunikation über den Satelliten ist nicht angedacht

Bzgl. der Technik zur Mobilien Kommunikation über den (Ka-Band) Satelliten und der Verwendung des Satelliten zur Kommunikation von mehreren Terminals im Einsatzgebiet direkt und Infrastrukturlos miteinander hebt sich das MoSaKa System dennoch von dieser Lösung ab.

## 2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

- M.A. Hein, H. Bayer, A. Krauss, R. Stephan, C. Volmer, A. Heuberger, E. Eberlein, C. Keip, M. Mehnert, A. Mitschele-Thiel, P. Drieß, T. Volkert, „*Perspectives for Mobile Satellite Communications in Ka-Band (MoSaKa)*“, EuCAP'2010, Barcelona, Spain, 2010
- H. Bayer, C. Volmer, A. Krauß, R. Stephan, M.A. Hein, „Tracking Antenna for Mobile Bi-directional Satellite Communication in Ka-Band“, IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems, Honolulu, Hawaii, 2010
- H. Bayer, A. Krauss, R. Stephan, M.A. Hein, „Multimode monopulse tracking feed with dual-band potential for land-mobile satellite communications in Ka-band“, Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Rome, 2011.
- H. Bayer, A. Krauss, R. Stephan, M.A. Hein, „A Dual-Band Multimode Monopulse Tracking Antenna for Land-Mobile Satellite Communications in Ka-Band“, EuCAP'2012, Prague, Czech Republic, 2012
- H. Bayer, A. Krauss, R. Stephan, and M.A. Hein, „A High-Gain User Terminal Antenna for Land-Mobile Bi-Directional Satellite Communications in Ka-Band,“ Proc. 34th ESA Antenna Workshop, Noordwijk, The Netherlands, 2012
- A. Krauss, H. Bayer, C. Volmer, R. Stephan, and M.A. Hein, „Low-Profile Antenna for Mobile Ka-Band Satellite Communications,“ Proc. 32nd ESA Antenna Workshop, Noordwijk, The Netherlands, 2010
- A. Krauss, H. Bayer, R. Stephan, and M.A. Hein, „A Dual-Band Leaky-Wave Antenna for Mobile Ka-Band Satellite Communications,“ Proc. IEEE APWC'2011, Torino, Italy, 2011

- A. Krauss, H. Bayer, R. Stephan, and M.A. Hein, "Low-Profile Ka-Band Satellite Terminal Antenna Based on a Dual-Band Partially Reflective Surface", Proc. EuCAP'2012, Prague, Czech Republic, 2012
- A. Krauss, H. Bayer, R. Stephan, and M.A. Hein, "A Low-Profile User Terminal Antenna for Mobile Bi-Directional Ka-Band Satellite Communications," Proc. 34th ESA Antenna Workshop, Noordwijk, The Netherlands, 2012
- P. Drieß, F. Evers und M. Brückner, *A Resource Management Architecture for Mobile Satellite-based Communication Systems*, *The Eighth Advanced International Conference on Telecommunications, AICT 2012*, Stuttgart, 2012.
- P. Drieß, F. Evers und M. Brückner, *Demonstrating MoSaKa – A QoS System for Unstable Links With High Delay*, *12th Würzburg Workshop on IP: ITG Workshop "Visions of Future Generation Networks"*, EuroView2012, 2012.
- M. Alazab, „De-pointing Estimation for Satellite Communication-On-The-Move(SOTM) Earth-Terminals Based on the Fraunhofer Test Facility. (Masterarbeit TU Ilmenau),“ 2012.
- M. Alazab, W. Felber, G. Del Galdo, A. Heuberger, M. Lorenz, M. Mehnert, F. Raschke, G. Siegert und M. Landmann, „Pointing Accuracy Evaluation of SOTM Terminals Under Realistic Conditions,“ in Proc. 34th ESA Antenna Workshop, Noordwijk, The Netherlands, 2012.
- M. Lorenz, M. Mehnert und A. Heuberger, „Measurements of Mechanical Disturbances of Vehicle Mounted, Mobile Very Small Aperture Terminals,“ in Workshop Digital Broadcasting, Erlangen, 2012.

Das Projekt wurde auf der Nationalen Konferenz Satellitenkommunikation in Bonn (2012) sowie von den Projektpartnern in kleineren Präsentationen interessierten Parteien vorgestellt.

Die Vorstellung des Projektes MoSaKa sowie der Messanlage waren zentraler Teil des der Sat-Com-Workshops im Rahmen der Deutschen Mikrowellenkonferenz im März 2012 (GeMiC2012).

Am 30.7.2012 wurde das Gesamtprojekt neben dem DLR auch interessierten Vertretern der Wirtschaft und der Anwender vorgestellt.

Weitere Veröffentlichungen bzw. Präsentationen sind geplant:

- AFCEA Technologieforum 2012
- Mechatronik-Tagung, Aachen 2013
- IEEE Vehicular Technology Conference Spring, Dresden 2013

## 3 Anhang

### 3.1 Abkürzungsverzeichnis

A/D, ADC	Analog-Digital Converter
AGC	Automatic Gain Control
AP	Arbeitspaket
ASB	Arbeiter-Samariter-Bund
BCH	zyklischer Block-Code nach Bose-Chaudhuri-Hocquenghem
BDR	Baseline Design Review
BKA	Bundeskriminalamt
BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
B-/Q-/8-PSK	Modulationsverfahren digitale Phasenumtastung (, Binary/Quarternary/8-PhaseShift Keying)
BUC	Block Upconverter
BW	Bandbreite (Band Width)
COP	Coefficient of Performance
COTS	Commercial of-the-Shelf
CW	Codewort
D/A, DAC	Digital-Analog-Converter
(DE)MUX	(De-)Multiplexer
DIGFE	Digitale Vorverarbeitung (Digital Frontend)
DLRG	Deutsche Lebens-Rettungs-Gesellschaft
DRK	Deutsches Rotes Kreuz
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EIRP	Sendeleistung (Effective Isotropic Radiated Power)
ESB	Enterprise Service Bus
ESRI	Environmental Systems Research Institute
FDM(A)	Zugriffsverfahren (Frequency Division Multiple (Access))
FEC	Kanalkodierung (Forward Error Correction)
FGr FK	Fachgruppe Führung und Kommunikation
FL	Forward Link
FPGA	Field Programmable Gate Array
FW	Firmware
GIS	Geografisches Informationssystem
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
GUI	Graphical User Interface

HG	High Gain Terminal (MoSaKa)
HW	Hardware
(i)DFT	(inverse) Diskrete Fourier Transformation
IDU	Indoor Unit
IF	Intermediate Frequency (Zwischenfrequenz)
(i)FFT	(inverse) Fast Fourier Transformation
IPL	Inner Physical Layer
I/Q	komplex-wertig (Inphase/Quadratur Komponente)
IT	Informationstechnik
IU	Interleaver Paket (Interleaver Unit)
IW	Informationswort (unkodiert)
JUH	Johanniter-Unfall-Hilfe
KHK	Krisenhilfskräfte
LKA	Landeskriminalamt
LLC	Link Layer Control
LLR	Logarithmic Likelihood ratio
LNB	Low Noise Block Converter
LO	Local Oscillator
LP	Low Profile Terminal (MoSaKa)
MAC	Media Access Control
MANET	Metropolitan Area Network
MHD	Malteser Hilfsdienst
MoSaKa	Mobile Satellitenkommunikation im Ka-Band
MPLS	Multi Protocol Layer Switching
MRC	Maximum Ratio Combining
NCO	Numerical Controlled Oscillator
NFFI	NATO Friendly Force Information
ODU	Outdoor Unit
(O)FDM	Modulationsverfahren (Orthogonal) Frequency Division Multiple (Access)
OPL	Outer Physical Layer
PDR	Preliminary Design Review
PHY	Physikalische Schicht
PPS	Pulse-Per-Second
QoS	Quality of Service
RL	Return Link
RX	Empfänger (Receiver)
SATA	Datenschnittstelle (Serial Advanced technology Assessment)
SatCom	Satellite Communication

SC-FDMA	Modulationsverfahren Single-Carrier Frequency Division Multiple Access
SDR	Satellite Digital Radio
SEEWA	Schnell-Einsatz-Einheit Wasser Ausland
SOA	Service Orientierte Architektur
S/P	Seriell/Parallel
SW	Software
TDM(A)	Zugriffsverfahren (Time Division Multiple (Access))
TCP	Transmission Control Protocol
TETRA	TErrestrial TRunked RAdio
THW	Technisches Hilfswerk
TX	Sender (Transmitter)
UDP	User Datagram Protocol
UFTG	FPGA Platine (Universal FPGA board Fourth Generation)
UML	Unified Modeling Language
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VHF	Very High Frequency
VSAT	Very Small Aperture Terminal
WIFI	Wireless Fidelity (WLAN)
WLAN	Wireless Local Area Network
WMS	Web Map Service
WS	Web Services
XKMS	XML Key Management Specification
XML	Extensible Markup Language
ZB	Zwischenbericht
ZTrs	Zugtrupps

## 3.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Typischer zeitlicher Verlauf nach einer Katastrophe.....	6
Abbildung 2:	Asymmetrischer Kommunikationsfluss in der Frühphase .....	16
Abbildung 3:	Symmetrischer Kommunikationsfluss in der Reaktionsphase.....	16
Abbildung 4:	Übersicht Physikalische Schicht .....	18
Abbildung 5:	Blockschaltbild der Kanalkodierung für einen QoS Datenstrom .....	18
Abbildung 6:	Blockschaltbild des IPL .....	20
Abbildung 7:	Prinzip des Ressourcen Managements .....	22
Abbildung 8:	Veranschaulichung eines SC-FDMA Multiplexes bei Verwendung von Antennen verschiedener Güte.....	23
Abbildung 9:	Adaptiver Frequenzmultiplex.....	23
Abbildung 10:	Überblick über das MoSaKa Demonstrationssetup .....	24
Abbildung 11:	Partitionierung der PHY Signalverarbeitung auf die DT4000 Plattform .....	26
Abbildung 12:	Vorderansicht des DT4430 MoSaKa Transceiver PHY .....	26
Abbildung 13:	Blick in das DT4430 Gehäuse.....	27
Abbildung 14:	Blockschaltbild der Sendeseite .....	29
Abbildung 15:	DT4430 MoSaKa Transceiver – GUI Einstiegseite.....	30
Abbildung 16:	DT4430 MoSaKa Transceiver – Rx Demux/Dekoder Überblicksseite.....	31
Abbildung 17:	Blockschaltbild der Empfangsseite.....	32
Abbildung 18:	Blockschaltbild des (O)FDM-Demodulators .....	33
Abbildung 19:	Blockschaltbild der TDM Verarbeitung (parallele Nutzer) .....	33
Abbildung 20:	Star- und Mesharchitekturen .....	36
Abbildung 21:	Ressourcenmanagementkomponenten.....	36
Abbildung 22:	Kanalgruppen .....	37
Abbildung 23:	Kanalgruppenänderung.....	38
Abbildung 24:	QoS Ströme .....	38
Abbildung 25:	Mapping von QoS, Kanalgruppen, Prioritäten, StreamIds .....	39
Abbildung 26:	Signalisierungszeitschlitze .....	39
Abbildung 27:	L2 Signalisierungspaket .....	40
Abbildung 28:	Resource request.....	41
Abbildung 29:	Channel Quality Report .....	42
Abbildung 30:	L2 Struktur.....	44
Abbildung 31:	Örtlich korreliert Regendämpfung.....	45
Abbildung 32:	Szintillation .....	46
Abbildung 33:	Frequenzskalierung.....	46
Abbildung 34:	Total Link Time Series .....	47
Abbildung 35:	Überblick über die MoSaKa Schicht 3 Architektur .....	50
Abbildung 36:	Struktur eines QoS-Agenten .....	51
Abbildung 37:	Virtuelles Testbed .....	53
Abbildung 38:	Kontrollapplikation zur Steuerung des virtuellen Satellitenlinkes .....	54
Abbildung 39:	Analoge Schaltung zur Auswertung des <i>Conical-Scan</i> Trackingverfahrens .....	56
Abbildung 40:	Zusammenhang zwischen elektrischer Stellgröße und Ablage der Hauptstrahlrichtung vom Satelliten in der Elevation.....	57
Abbildung 41:	Funktionsprinzip der <i>Conical-Scan</i> Nachführung .....	57

Abbildung 42:	Gemessene Richtdiagramme der <i>High-Gain</i> Antenne mit <i>Conical Scan</i> für den Empfangsbereich bei 20 GHz (blau) und den Sendebereich bei 30 GHz (orange gestrichelt).....	58
Abbildung 43:	Foto der speziell für MoSaKa entwickelten <i>High-Gain Outdoor-Unit</i> mit angedeutetem Radom (Ø 80 cm x 100 cm) .....	58
Abbildung 44:	Blockschaltbild des Nachführsystems mit Modenkoppler und Phasendiskriminator .....	59
Abbildung 45:	Foto des Phasendiskriminators bestehend aus Leistungsteilern (1), Filtern (2), Verstärkern (3), I/Q-Mischer (4), Differenzverstärkern (5) und Spannungsversorgungen (6).....	60
Abbildung 46:	Gemessene Fehlerspannungen in Volt für die beiden Ausgänge des L-Band Phasendiskriminators in der Azimut-Elevation Ebene relativ zur Richtung des Satelliten.....	60
Abbildung 47:	Funktionsprinzip der Multimode Monopuls Nachführung.....	61
Abbildung 48:	Modenkoppler für 20 GHz.....	61
Abbildung 49:	Monoband-Ausführung des TM <sub>01</sub> -Modenkopplers mit Hohlleiter-Speisenetzwerk.....	62
Abbildung 50:	Dualband-Koppler (Up- und Down-Link) für Multimode Monopuls Nachführung im Ka-Band .....	62
Abbildung 51:	Gemessene Richtdiagramme der HG-Antenne gespeist mit dem TE <sub>11</sub> Mode für Kommunikation (blau) und mit dem TM <sub>01</sub> Mode für die Nachführung (orange gestrichelt) bei 20 GHz.....	63
Abbildung 52:	Ku-Band Satellitenantennenkonzept der Firma <i>RaySat</i> mit mechanisch neigbaren Paneelen [34].....	64
Abbildung 53:	Funktionsprinzip eines gefalteten <i>Reflectarrays</i> [45] .....	65
Abbildung 54:	Realisierungsbeispiel einer <i>Low-Profile</i> Antenne mit vier unterschiedlich geneigten und fixierten Antennenpaneelen .....	67
Abbildung 55:	Prinzip eines Antennensystems mit rekonfigurierbarer Richtcharakteristik (links); Elektronische Antennennachführung mittels <i>Maximum Ratio Combining</i> (MRC); ODU: <i>Outdoor-Unit</i> ; IDU: <i>Indoor-Unit</i> ; LNB: <i>Low-Noise Block</i> ; BUC: <i>Block Up-Converter</i> ; RX: Empfänger; TX: Sender (rechts).....	67
Abbildung 56:	Lagenaufbau eines dualbandigen Leckwellen-Antennenpaneels (links); Elementarzellendesign der dual-bandigen PRS ( <i>Partially Reflective Surface</i> ); obere Lage (links) und untere Lage (rechts).....	68
Abbildung 57:	Leckwellen-Antennenpaneel inklusive der Dualband-PRS (links); 3D CAD-Modell der Metallgrundplatte mit integrierten Rechteckhohlleitern und zirkular polarisierten Schlitzstrahler als Primärquelle der Leckwellenantenne (rechts).....	69
Abbildung 58:	Zirkular polarisiertes Ka-Band Antennenpaneel mit einer Apertur von 60 mm×200 mm in der Antennenmesskammer der TU Ilmenau .....	69
Abbildung 59:	3D CAD-Modell der Metallgrundplatte mit integrierter Rechteckhohlleiter-Speisung und einer zirkular polarisierten Schlitzstrahlergruppe als Primärquelle der Leckwellenantenne bei 20 GHz.....	70
Abbildung 60:	Metallgrundplatte für 30 GHz mit integrierter rechtshändig-zirkular polarisierter Primärquelle mit 2×7 Schlitzstrahlern.....	71
Abbildung 61:	Messung der LHCP Richtcharakteristik der Azimut- und Elevationsebene bei 20,1 GHz ( <i>Downlink</i> ).....	71

Abbildung 62:	Messung der RHCP Richtcharakteristik der Azimut- und Elevationsebene bei 30,4 GHz ( <i>Uplink</i> ) .....	72
Abbildung 63:	Messung des realisierten Gewinns für beide Drehrichtungen der zirkularen Polarisation im <i>Downlink</i> -Band .....	72
Abbildung 64:	Messung des realisierten Gewinns für beide Drehrichtungen der zirkularen Polarisation im <i>Uplink</i> -Band.....	73
Abbildung 65:	Messung der Summen- und Differenzrichtcharakteristik, welche durch die beiden Rechteckhohlleiteranschlüsse auf der Rückseite des Ka-Band Antennenpanels in der Azimutebene bei 20,1 GHz bereitgestellt werden .....	73
Abbildung 66:	Ka-Band Low-Profile Antennendemonstrator bzw. Außeneinheit des mobilen MoSaKa-Terminals .....	74
Abbildung 67:	ITU-Norm für Ka-Band-Antennen .....	75
Abbildung 68:	Stribeck-Kurve, stellt den Zusammenhang von Reibmoment und Drehgeschwindigkeit dar .....	76
Abbildung 69:	Fahrzeuge für die Messfahrten beim THW .....	77
Abbildung 70:	Modell des Gyroskops für eine Achsrichtung .....	79
Abbildung 71:	Schematische Darstellung der Regelkreisstruktur .....	82
Abbildung 72:	Low-Profile-Antenne mit Antennenkoordinatensystem .....	82
Abbildung 73:	Positionsabweichung mit Zu- und Abschaltung der Positionsregelung nach dem Conical-Scan-Verfahren .....	83
Abbildung 74:	High-Gain-Antenne mit Antennen- (blau) und Fahrzeugkoordinatensystem (schwarz) .....	84
Abbildung 75:	Fehler der Geschwindigkeitsregelung bei der LP- Antenne während der Fahrt mit dem Geländewagen auf der Autobahn .....	85
Abbildung 76:	Fehler der Geschwindigkeitsregelung in Azimut und Elevation bei der HG-Antenne während der Fahrt mit dem Geländewagen im schweren Gelände .....	85
Abbildung 77:	Luftbild der Testanlage .....	86
Abbildung 78:	Detailansicht Detektorkreuz .....	87
Abbildung 79:	Aufbau des Demonstrationssetups .....	89
Abbildung 80:	GUI des GeoData Viewers.....	90
Abbildung 81:	Screenshot von ArcGIS .....	91
Abbildung 82:	GUI des WMS.....	91
Abbildung 83:	Aufbau eines verteilten Enterprise Service Buses .....	92
Abbildung 84:	3-Achs-Motion-Emulator der Firma Acutronic.....	94



---

### 3.3 Literaturverzeichnis

- [1] A. Heuberger, „MoSaKa- Mobile Satellitenkommunikation im Ka-Band - Vorhabensbeschreibung,“ 2009.
- [2] ESA, „Mobile Ku Band Receiver Demonstrator,“ 2012. [Online]. Available: <http://telecom.esa.int/telecom/www/object/index.cfm?fobjectid=13103>.
- [3] ETSI TS 102 550 V1.3.1, „*Satellite Earth Stations and Systems (SES); Satellite Digital Radio (SDR) Systems; Outer Physical Layer of the Radio Interface*“, 2008-01.
- [4] ETSI TS 102 551-1 V1.1.1, „*Satellite Earth Stations and Systems (SES); Satellite Digital Radio (SDR) Systems; Inner Physical Layer of the Radio Interface; Part 1: Single carrier transmission*“, 2006-12.
- [5] ETSI TS 102 551-2 V2.1.1, „*Satellite Earth Stations and Systems (SES); Satellite Digital Radio (SDR) Systems; Inner Physical Layer of the Radio Interface; Part 2: Multiple carrier transmission*“, 2007-08.
- [6] ETSI TS 102 585 V1.1.2, „*Digital Video Broadcasting (DVB); System Specifications for Satellite services to Handheld devices (SH) below 3 GHz*“, 2008-04.
- [7] ETSI EN 302 583 V1.1.1, „*Digital Video Broadcasting (DVB); Framing Structure, channel coding and modulation for Satellite Services to Handheld devices (SH) below 3 GHz*“, 2008-03.
- [8] RaySat, 2009. [Online]. Available: <http://www.raysat.com/Shopping/CategoryInfo.aspx?CategoryID=187>.
- [9] NDSatCom, 2009. [Online]. Available: <http://www.ndsatcom.com/en/products/skyray/index.php>.
- [10] KVH Industries, 2009. [Online]. Available: <http://www.kvh.com/products/Product.asp?id=92>.
- [11] ESA, „NATALIA: New Automotive Tracking Antenna for Low-cost Innovative Applications,“ 2012. [Online]. Available: <http://telecom.esa.int/telecom/www/object/index.cfm?fobjectid=27952>.
- [12] ESA, „Hi-Sat - Ku-Band Antennas for Mobile In-Vehicle Entertainment,“ 2012. [Online]. Available: <http://telecom.esa.int/telecom/www/object/index.cfm?fobjectid=27991>.
- [13] ERA Technologies, 2012. [Online]. Available: <http://www.era.co.uk/news/pr0605.asp>.
- [14] DLR, „SANTANA,“ 2012. [Online]. Available: [http://www.dlr.de/rd/DesktopDefault.aspx/tabid-4161/3338\\_read-5022/](http://www.dlr.de/rd/DesktopDefault.aspx/tabid-4161/3338_read-5022/).
- [15] ETSI TS 136.211, „*LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Long Term Evolution (LTE) physical layer - Physical channels and modulation*“.
- [16] J. Postel, „*Internet Protocol*,“ RFC 760, USC/Information Sciences Institute, 1980.
- [17] J. Postel, „*Transmission Control Protocol*,“ RFC 761, USC/Information Sciences Institute, 1980.
- [18] K. Nichols, S. Blake, F. Baker und D. Black, „*Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers*,“ RFC 2474, 1998.
- [19] J. Wroclawski, „*The Use of RSVP with IETF Integrated Services*“, RFC 2210, 1997.
- [20] R. Braden, L. Zhang, S. Berson, S. Herzog und S. Jamin, „*Resource ReSerVation Protocol (RSVP)*“ RFC 2205, 1997.
- [21] R. Hancock, G. Karagiannis, J. Loughney und S. V. den Bosch, „*Next Steps in Signaling*“

- (NSIS): Framework," RFC 4080, 2005.
- [22] J. Manner, G. Karagiannis und A. McDonald, "NSIS Signaling Layer Protocol (NSLP) for Quality-of-Service Signaling," RFC 5974, 2010.
- [23] H. Schulzrinne und R. Hancock, "GIST: General Internet Signalling Transport", RFC 5971, 2010.
- [24] J. Postel, "User Datagram Protocol," RFC 768, USC/Information Sciences Institute, 1980.
- [25] F. Bellard, "QEMU, a fast and portable dynamic translator," in *Proceedings of the annual conference on USENIX Annual Technical Conference, ser. ATEC '05*. Berkeley, CA, USA: USENIX Association, pp. 41–41., 2005.
- [26] T. Kitsuregawa, "Advanced Technology in Satellite Communication Antennas, Electrical and Mechanical Design," Norwood MA, Artech House, Inc., 1990.
- [27] tooway, 2012. [Online]. Available: <http://www.tooway.com>.
- [28] T. Weber, „Nahfeldmessungen zur Charakterisierung der Strahlungseigenschaften von Hochgewinnantennen bei Arbeitsfrequenzen bis 30 GHz“, TU Ilmenau - Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Diplomarbeit, 2009.
- [29] H. Bayer, C. Volmer, A. Krauß, R. Stephan und M. A. Hein, „Tracking Antenna for Mobile Bi-directional Satellite Communication in Ka-Band“, *IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems, Honolulu, Hawaii*, 2010.
- [30] J. S. Cook und R. Lowell, "The Autotrack System," *Bell Syst. Tech. J.*, pp. 1283–1307, 1963.
- [31] G. Hawkins, D. Edwards und J. McGeehan, "Tracking systems for satellite communications," *Radar and Signal Processing, IEE Proceedings*, vol. 135, pp. 393–407, 1988.
- [32] H. Bayer, A. Krauss, R. Stephan und M. A. Hein, „Multimode monopulse tracking feed with dual-band potential for land-mobile satellite communications in Ka-band“, *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Rome*, 2011.
- [33] H. Bayer, A. Krauss, R. Stephan und M. A. Hein, "A Dual-Band Multimode Monopulse Tracking Antenna for Land-Mobile Satellite Communications in Ka-Band", *EuCAP'2012, Prague, Czech Republic*, 2012.
- [34] RaySat, 2012. [Online]. Available: <http://www.raysat.com>.
- [35] M. Zhang, J. Hirokawa und M. Ando, "Design and Fabrication of a Waveguide Two-Dimensional Slot Array with Low Sidelobe Level of -35 dB", *3rd European Conference on Antennas and Propagation EuCAP, Berlin*, 2009.
- [36] T. Zhao, D. R. Jackson, J. T. Williams und et al., "2-D Periodic Leaky-Wave Antennas-Part I: Metal Patch Design", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 11, pp. 3505-3514, 2005.
- [37] D. J. J. W. e. a. Tianxia Zhao, "2-D Periodic Leaky-Wave Antennas-Part II: Slot Design", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 11, pp. 3515-3524, 2005.
- [38] R. S. H. L. M.S. Anwar, „A new configuration for small-size Fabry-Perot cavity antennas with large bandwidth for space applications“, *31st ESA Antenna Workshop, ESTEC Noordwijk, The Netherlands*, pp. 335-339, 2009.
- [39] A. Dreher, D. Heberling, S. Holzwarth und et al., „„Ka-band DBF terminal concepts for broadband satellite communications“,“ in , *25th ESA Antenna Workshop on Satellite Antenna Technology*, , pp. 95-102, ESTEC Noordwijk, The Netherlands, 2002.
- [40] L. C. Stange, H. Pawlak, A. Dreher und et al., „Components of a Highly Integrated DBF Terminal Antenna for Mobile Ka-Band Satellite Communications“, *IEEE MTT-S, Microwave Symposium Digest, Philadelphia, USA*, vol. 1, pp. 583-586, 2003.

- 
- [41] L. S. A. M. e. a. H. Pawlak, „*Miniaturized 30 GHz DBF Transmitter Module for Broadband Mobile Satellite Communications*“, *34th European Microwave Conference, Amsterdam, The Netherlands*, 2004.
- [42] R. Braggen und D. L. d. R. Vaccaro, „*Design Considerations for Compact Mobile Ku-Band Satellite Terminals*“, *2nd European Conference on Antennas and Propagation EuCAP 2007*, pp. 1-5, 2007.
- [43] J. Huang und J. A. Encinar, „*Reflectarray Antennas*“, Wiley-IEEE, 2007.
- [44] D. Pilz und W. Menzel, „*Folded Reflectarray Antenna*“, *Electronics Letters*, vol. 34, no. 9, pp. 832-833, 1998.
- [45] W. Menzel und D. Kessler, „*A Folded Reflectarray Antenna for 2D Scanning*“, *GeMiC 2009, München*, 2009.
- [46] L. C. Kretly, A. S. A Tavora und S. E. Barbin, „*Beam Steering Technique Through Multiple Vee-antenna Switching: Additional Reflector Element and Radiation Pattern Characterization*“, *Proceedings of the 2003 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference IMOC 2003*, vol. 1, 2003, pp. pp. 397-399.
- [47] P. Deo, A. Metha, D. Mirshekar-Syahkal und et al., „*An HIS\_Based Spiral Antenna for Pattern Reconfigurable Applications*“, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 196-199, 2009.
- [48] A. Petosa, S. Thirakoune und A. Ittipiboon, „*Reconfigurable Fresnel-Zone-Plate-Shutter Antenna with Beam-Steering Capability*“, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 49, no. 5, pp. 42-51, 2007.
- [49] J. Huang und J. A. Encinar, „*Reflectarray Antennas*“, Wiley-IEEE, pp. 20-22, 2007.
- [50] A. Krauss, H. Bayer, C. Volmer und et al., „*Low-Profile Antenna for Mobile Ka-Band Satellite Communications*“, in *Proc. 32nd ESA Antenna Workshop*, Noordwijk, The Netherlands, 2010.
- [51] M. Hein, A. Krauss, R. Stephan, A. Heuberger, E. Eberlein, C. Keip, M. Mehnert, A. Mitschele-Thiel, P. Drieß und T. Volkert, *Perspectives for Mobile Satellite Communications in Ka-Band (MoSaKa)*, *EuCAP'2010: The 4th European Conference on Antennas and Propagation*, Barcelona, Spain, 2010.
- [52] S. R. Saunders und A. Aragon-Zavala, „*Antennas and propagation for wireless communication systems*“, John Wiley and Sons, vol. 2, pp. 407-408, 2007.
- [53] A. A. Oliner und D. R. Jackson, „*Leaky-wave, antennas*“, *Antenna Engineering Handbook*, 4th ed., McGraw-Hill, ch. 11, 2007.
- [54] A. Krauss, H. Bayer, R. Stephan und M. A. Hein, „*A Dual-Band Leaky-Wave Antenna for Mobile Ka-Band Satellite Communications*“, in *Proc. IEEE APWC'2011*, Torino, Italy, 2011.
- [55] A. Krauss, H. Bayer, R. Stephan und M. A. Hein, „*Low-Profile Ka-Band Satellite Terminal Antenna Based on a Dual-Band Partially Reflective Surface*“, *Proc. EuCAP'2012*, Prague, Czech Republic, 2012.
- [56] A. Krauss, H. Bayer, R. Stephan und M. A. Hein, „*A Low-Profile User Terminal Antenna for Mobile Bi-Directional Ka-Band Satellite Communications*“, *Proc. 34th ESA Antenna Workshop*, Noordwijk, The Netherlands, 2012.
- [57] ITU, *ITU Norm ITU-R*, p. 524.
- [58] ETSI, *ETSI Norm EN 301459: Harmonized EN for Satellite Interactive Terminals transmitting towards satellites in geostationary orbits in the 29.5 to 30 GHz Frequency band*.
- [59] J. Wendel, *Integrierte Navigationssysteme*, München: Oldenburg Verlag, 2011.
-

- 
- [60] G. Siegert, „Anforderungen an die Dynamik eines mobilen Satellitenkommunikationssystems“, Diplomarbeit TU Ilmenau, 2010.
- [61] M. Lorenz, M. Mehnert und A. Heuberger, „Measurements of Mechanical Disturbances of Vehicle Mounted, Mobile Very Small Aperture Terminals,“ in *Workshop Digital Broadcasting*, Erlangen, 2010.
- [62] Analog Devices, *ADIS 16400/ADIS16405 Triaxial Inertial Sensor with Magnetometer Datasheet, Rev B*, Norwood, MA, 2009.
- [63] E. A. Marsh, „Inertially Stabilized Platforms for SATCOM-On-The-Move Applications: A Hybrid Open/Closed-Loop Antenna Pointing Strategy,“ Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- [64] Kollmorgen, *Kollmorgen Frameless Motor Selection Guide*, 2010.
- [65] Elmo Motion Control Ltd., *SimpliQ Software Manual*, 2004.
- [66] M. Alazab, „De-pointing Estimation for Satellite Communication-On-The-Move(SOTM) Earth-Terminals Based on the Fraunhofer Test Facility. (Masterarbeit TU Ilmenau),“ 2012.
- [67] M. Alazab, W. Felber, G. Del Galdo, A. Heuberger, M. Lorenz, M. Mehnert, F. Raschke, G. Siegert und M. Landmann, „Pointing Accuracy Evaluation of SOTM Terminals Under Realistic Conditions,“ in *Proc. 34th ESA Antenna Workshop*, Noordwijk, The Netherlands, 2012.
- [68] P. Woodhead, „Field Trials of Mounted Battle Command Ka-band Satcom "On-The-Move",“ *MILSATMagazine*, Nr. 01/2011 ([http://www.milsatmagazine.com/cgi-bin/display\\_article.cgi?number=1918837735](http://www.milsatmagazine.com/cgi-bin/display_article.cgi?number=1918837735)), 2011.
- [69] „emergency.lu,“ [Online]. Available: <http://www.emergency.lu>.
- [70] „emergency.lu Press Release,“ [Online]. Available: [http://www.emergency.lu/images/press-releases/nscf-00\\_ger\\_press\\_release-20110428.pdf](http://www.emergency.lu/images/press-releases/nscf-00_ger_press_release-20110428.pdf). [Zugriff am 23 10 2012].
- [71] O. J. Woodman, „Technical Report 696 - An introduction to inertial Navigation,“ University of Cambridge, <http://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-696.pdf>, 2007.
- [72] GENESYS GmbH, *ADMA Technische Dokumentation Version 22.6.1.1*, 2008.
- [73] R. Davoli, „VDE: Virtual Distributed Ethernet,“ in *Proceedings of the First International Conference on Testbeds and Research Infrastructures First International Conference on Testbeds and Research Infrastructures USA: IEEE Computer Society*, pp 213-220, 2005.
- [74] P. Drieß, F. Evers und M. Brückner, *Demonstrating MoSaKa – A QoS System for for Unstable Links With High Delay, 12th Würzburg Workshop on IP: ITG Workshop "Visions of Future Generation Networks"*, EuroView2012, 2012.
- [75] P. Drieß, F. Evers und M. Brückner, *A Resource Management Architecture for Mobile Satellite-based Communication Systems, The Eighth Advanced International Conference on Telecommunications, AICT 2012, Stuttgart*, 2012.
- [76] M. A. Hein, H. Bayer, A. Krauss und et al., „Perspectives for Mobile Satellite Communications in Ka-Band (MoSaKa),“ *Proc. EuCAP'2010, Barcelona, Spain*, 2010.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht
3. Titel MoSaKa –Mobile Satellitenkommunikation im Ka-Band	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Heuberger, Albert; Hein, Matthias; Mitschele-Thiel, Andreas; Baumann, Stefan; <i>et al.</i>	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.07.2012
	6. Veröffentlichungsdatum 01.11.2012
	7. Form der Publikation Gedruckt und elektronisch
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Technische Universität Ilmenau, Postfach 100 565, 98684 Ilmenau; Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS Am Wolfsmantel 33, 91058 Erlangen; Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft (IABG) mbH Einsteinstraße 22, 85521 Ottobrunn	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 50 YB 0913, 50 YB 0914, 50 YB 0915
	11. Seitenzahl 98 + Anhang
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Raumfahrt-Agentur des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. Königswinterer Str. 522-524 53227 Bonn	13. Literaturangaben 76
	14. Tabellen
	15. Abbildungen 84
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)  Die Ergebnisse des Vorhabens wurden in zahlreichen Fachzeitschriften und auf nationalen und internationalen Konferenzen veröffentlicht. Genaue Angaben sind im Abschlussbericht dargestellt.	
18. Kurzfassung Im Rahmen des Projektes MoSaKa wurden Systemgrundlagen für die mobile Satellitenkommunikation im Ka-Band untersucht. Mit Blick auf Anforderungen für weltweite Kriseneinsätze wurden Technologiekomponenten für ein Satellitenkommunikationssystem entwickelt. Die Anforderungen verschiedener Nutzer wurden untersucht und als Grundlage für die Systemarchitektur verwendet. Verbesserte robuste Verfahren für die Übertragung sowie den Zugriff auf Satelliten im mobilen Kanal ermöglichen optimalen Durchsatz auch in hybriden Netzwerkarchitekturen.  Das entwickelte Kommunikationssystem garantiert QoS der einzelnen Dienste mit Hilfe eines modularen, agentenbasierten Ressourcenverwaltungssystem auch bei hohen Signallaufzeiten und wechselnden Linkeigenschaften. Kommunikationsverbindungen sind voll vernetzt auch ohne zentralen Hub möglich, was die Ausfallsicherheit erhöht und die Netzwerklatenz senkt. Das Ressourcenmanagement aller Schichten ist dezentral ausgeführt und ermöglicht die schnelle, dynamische Anpassung der Datenübertragung auf die geforderten Datenraten sowie den momentanen Kanal. Durch den Einsatz von SC-FDMA als Physical-Layer-Wellenform lassen sich die Parameter der einzelnen Datenpfade sehr gut anpassen.  Mehrere Bauformen für eine nachführbare Antenne wurden untersucht. Dabei wurden sowohl eine High-Gain-Antenne mit Mode-Monopuls zur Antennennachführung, sowie eine Low-Profile-Antenne auf Basis einer Leaky-Wave-Antenne realisiert.  Desweiteren wurde eine Testanlage für den End-To-End-Systemtest von Satellitenkommunikationsanlagen unter realitätsnahen Bedingungen geschaffen. Das zu testende Terminal wird mit Hilfe eines Bewegungs-Emulators mechanischen Störungen ausgesetzt. Ein 50m hoher Antennenturm in ca. 100m Entfernung trägt die Nachbildung eines Satelliten sowie eine Depointing-Messeinrichtung. Der Satellitenkanal sowie weitere messbare Umgebungseinflüsse (wie z.B. das GPS-Signal) werden mittels entsprechenden Simulatoren nachgebildet.  Die Ergebnisse des Vorhabens MoSaKa tragen dazu bei, bessere mobile Terminals und mobile Satellitenkommunikation im Ka-Band zu ermöglichen und dabei speziell die Bedürfnisse von Hilfsorganisationen im Krisenfall zu berücksichtigen.	
19. Schlagwörter SatCom, SatCom-on-the-Move, Ka-Band, Mobil, Wellenform, Terminals, Antennen geringer Bauhöhe, Quality-of-Service, Ressourcenmanagement, SC-FDMA	
20. Verlag	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title MoSaKa – Mobile Satellitenkommunikation im Ka-Band	
4. author(s) (family name, first name(s)) Heuberger, Albert; Hein, Matthias; Mitschele-Thiel, Andreas; Baumann, Stefan; <i>et al.</i>	5. end of project 31.07.2012
	6. publication date 01.11.2012
	7. form of publication Printed and electronic
8. performing organization(s) (name, address) Ilmenau University of Technolo P. O. Box 100 565, 98684 Ilmenau, Germany Fraunhofer Institute for Integrated Circuits IIS Am Wolfsmantel 33, 91058 Erlangen, Germany Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft (IABG) mbH Einsteinstraße 22, 85521 Ottobrunn	9. originator's report no.
	10. reference no. 50 YB 0913, 50 YB 0914, 50 YB 0915
	11. no. of pages 98 + annex
12. sponsoring agency (name, address)  Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Königswinterer Str. 522-524 53227 Bonn	13. no. of references 76
	14. no. of tables none
	15. no. of figures 84
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)  The results of the research project have been published in several journals and at national as well as international conferences. Please see the final report for further details.	
18. abstract  Within the MoSaKa project, basic system elements for mobile satellite communication in Ka band have been investigated. With a focus on the requirements for worldwide disaster recovery scenarios, technology components for a satellite communications system have been developed. The requirements of various users have been studied and form the basis for the system architecture. Improved robust methods for transmission as well as satellite access in the mobile channel enable optimum throughput also in hybrid network architectures.  Using a modular, agent based resource management system, the developed communications system guarantees QoS of the various services also with high signal round trip times and changing link conditions.  Fully meshed communication links are possible without a central hub, which increases reliability while decreasing network latency. The resource management of all layers is distributed and allows for fast, dynamic adaption of the data transmission on the demanded data rates and the current channel. Using SC-FDMA as physical layer wave form allows for very good adaption of the parameters for the respective paths.  Several antenna forms for tracking antennas have been studied. Both a high gain antenna using mode-monopulse for tracking, and a low profile antenna based on a leaky wave antenna design have been implemented.  Furthermore, a test facility for the end-to-end system test of satellite communication systems has been established. Mechanical disturbances will be applied to the terminal under test using a motion emulator. A 50m high antenna tower in a distance of 100m carries a satellite equivalent as well as a depointing measurement facility. The satellite channel, as well as other measurable environmental features (like the GPS signal), are reproduced by respective simulators.  The results of the MoSaKa project contribute to the future availability of improved mobile terminals and satellite communication in the Ka band, focusing on the requirements of disaster response organizations in case of emergencies.	
19. keywords SatCom, SatCom-on-the-Move, SOTM, Ka-Band, Mobile, wave form, terminals, low profile antenna, high gain antenna, tracking, Quality-of-Service, resource management, SC-FDMA	
20. publisher	21. price