

---

# KASYMOSA – Ka-Bandsysteme für die mobile Satellit- kommunikation

## -Schlussbericht-

### Partner im Konsortium:

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

Fraunhofer IIS Dresden (EAS),  
Fraunhofer IIS Erlangen (IIS),  
Fraunhofer IIS – Abteilung Drahtlose Verteilsysteme Ilmenau (IIS-DVT)

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

Technische Universität Ilmenau – Fachgebiet Integrierte Kommunikationssysteme (ICS)

Industrieanlagen – Betriebsgesellschaft mbH Ottobrunn (IABG)

### Koordination:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Giovanni Del Galdo  
Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS  
Helmholtzplatz 2  
D-98693 Ilmenau

Telefon: +49 – 3677-69-4280

Fax: +49 – 3677-69-4282

---

## Autoren:

### Fraunhofer IIS Erlangen:

Rainer Hildinger;  
Stefan Lipp;  
René Geißler

### Fraunhofer IIS – Projektgruppe Drahtlose Verteilsysteme Ilmenau:

Giovanni Del Galdo, Univ.-Prof. Dr.-Ing.;  
Florian Raschke;  
Volker Henze;  
Benjamin Jahn

### Fraunhofer IIS - EAS Dresden:

Olaf Enge-Rosenblatt, Dr.-Ing.;  
Tobias Zaiczek, Dr.-Ing.;

### DLR IKN Oberpfaffenhofen:

Hartmut Brandt;

### 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;  
Philipp Drieß

### Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH (IABG)

Manuel Probst

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 1319, 50 YB 1320, 50 YB 1321.

---

## 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	4
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn	6
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	17
<b>2</b>	<b>Eingehende Darstellung</b>	<b>21</b>
2.1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	21
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	93
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit	96
2.4	Voraussichtlicher Nutzen im Sinne des Verwertungsplanes	97
2.5	Während der Projektdurchführung bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen	98
2.6	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	99
<b>3</b>	<b>Anhang</b>	<b>101</b>
3.1	Abkürzungsverzeichnis	101
3.2	Abbildungsverzeichnis	103
3.3	Literaturverzeichnis	107

# 1 Kurzbeschreibung des Vorhabens

## 1.1 Aufgabenstellung

Die technische Zielsetzung dieses Projekts war die Erforschung, Entwicklung und Validierung von neuartigen Technologien und Algorithmen für die mobile Satellitenkommunikation im Ka-Band. Im Wesentlichen sollten drei Schwerpunkte bearbeitet werden:

### **Antennenkonzepte und Antennennachführung für mobile Übertragung im Ka-Band**

Dieser Schwerpunkt lag vor allem auf der Entwicklung von neuen innovativen Antennenkonzepten mit kleinen Aperturen und neuen verbesserten Verfahren zur mechanischen/elektronischen Strahlnachführung. Die Funktionalität der entwickelten Antennen- und Nachführsysteme sollte in einer Laborumgebung und in einem Feldtest mit einem realen Satelliten überprüft werden. Im Ergebnis sollten darauf aufbauend generische Modelle für Nachführverfahren und Antennen entstehen, welche Aufwandsabschätzungen in Richtung produktnahe Prototypen ermöglichen.

### **Algorithmen, Management- und Signalisierungs-Verfahren einschließlich Demonstratorentwicklung und Applikationen für mobile Übertragung im Ka-Band**

Im Rahmen dieses zweiten Schwerpunkts sollten neue Algorithmen sowie Management- und Signalisierungsverfahren zur Unterstützung komplexer System- und Satellitenarchitekturen entwickelt und analysiert werden. Die eingehende Validierung des Gesamtkommunikationssystems in einer Laborumgebung mit realistischen Bedingungen, Umgebungsszenarien und mit relevanten Applikationen sollte anhand eines Demonstrators in einem zweistufigen Ansatz mit zwei aufeinander aufbauenden Revisionen des Demonstrators erfolgen. In der ersten Revision sollte ein im Rahmen des Projektes MoSaKa entwickelter Prinzip-Demonstrator („proof of concept“) so erweitert und ergänzt werden, dass die Leistungsfähigkeit von MoSaKa-Technologien in einem Gesamtkommunikationssystem getestet werden kann. In einer zweiten Revision sollten die neu erforschten und entwickelten Konzepte bzw. Verfahren in den Demonstrator überführt und in Zusammenhang mit neuen Applikationen vergleichend validiert werden.

### **Testkonzepte und Verfahren**

Der dritte Schwerpunkt sollte begleitend zu den Revisionen des Demonstrators die Entwicklung von automatisierten Testverfahren sowohl für Subkomponenten als auch für das Gesamtkommunikationssystem beinhalten, um die Basis für vergleichende Untersuchungen bereit zu stellen. Darüber hinaus sollten Metriken erforscht werden, die eine Systembewertung (z.B. end-to-end Quality of Service) aus einer geschickten Zusammenführung einer Vielzahl von Kanal- und Systemparametern erlaubt (Netzwerkevaluator - NWE), um eine Grundlage für einerseits normierte und andererseits neue vergleichende Testverfahren zu schaffen.

## 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Bereits im Projekt MoSaKa wurde die Intention mobile Kommunikationsterminals unabhängig von terrestrischer Infrastruktur als Notfallinfrastruktur insbesondere für Krisenreaktionskräfte zu entwickeln verfolgt. Die Notwendigkeit eines solchen Kommunikationssystems hat sich in den letzten Jahren in keiner Weise verringert, wie sich immer wieder durch entsprechende Ereignisse auf der Welt zeigt, z.B. die Erbeben in Haiti und in der Türkei 2010, vor der japanischen Küste 2011 oder in Nepal 2015.

Doch nicht nur Naturkatastrophen sondern auch durch Krieg oder Terror ausgelöste Krisengebiete bieten oftmals nicht die geeignete terrestrische Infrastruktur um Mitarbeitern von Hilfsorganisationen ausreichend Kommunikationsmöglichkeiten zu ermöglichen.

Satellitenbasierte Kommunikationssysteme eignen sich auf Grund der weitreichenden weltweiten Verfügbarkeit und ihrer Unabhängigkeit gegenüber terrestrischen Ereignissen besonders als autarke Kommunikationswege. Darüber hinaus ermöglichen sie eine direkte Verbindung zu weit entfernten Einsatzzentralen, z.B. im Heimatland. Um diese Vorteile der Satellitenkommunikation weiter auszubauen ist der Bedarf an mobilen und schnell einsetzbaren Systemen, die eine robuste Kommunikation auch während der Bewegung ermöglichen, hoch. Insbesondere in der kritischen Anfangsphase (1-2 Tage) nach einem Krisenereignis, in der die Rettung von Menschenleben eine sehr schnelle Reaktion erfordert.

Da die Entwicklungen in Bereichen der Kommunikation und Führung von Krisenreaktionskräften immer weitere Möglichkeiten bieten (z.B. Live-Videoübertragungen, GPS-Positions-Daten, Bilder etc.) entsteht der Bedarf an Übertragungswegen mit hohen Datenraten. Die bisher verfügbaren Satellitenkommunikationssysteme sind allerdings zumeist entweder mobil oder können hohe Datenraten zur Verfügung stellen. Um eine effiziente Führung zu ermöglichen muss diese Lücke geschlossen werden.

Somit lässt sich zusammenfassen, dass für extreme Lagen bei entsprechenden Reaktionskräften ein Bedarf an schnell verfügbaren, mobilen Kommunikationswegen besteht, der durch ein angepasstes Satellitenkommunikationssystem im Ka-Band befriedigt werden könnte.

### 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 der Zeitplanung aus dem Projektantrag (Seite 53) wurden die Arbeiten in den Arbeitspaketen AP1100, AP2000 und AP3100 begonnen. Die genannten Arbeitspakete beinhalten hauptsächlich die Implementierung der Revision #1, jeweils für die in-door-unit und die out-door-unit. Parallel wurde aber bereits in AP 1200 das erweiterte Systemkonzept für die Revision #2 entwickelt. Im ersten Monat wurden vor allem konzeptionelle Tätigkeiten bzw. eine konkrete Planung der Vorgehensweise erarbeitet (siehe ZB bis zum 30.06.13). Im weiteren Fortschritt wurden dann konkrete Implementierungen vorgenommen sowie im AP3100 begonnen die Steuerungen für die Geräte der Testumgebung zu implementieren (siehe ZB bis zum 31.12.13).

Die Arbeiten an den AP1100, AP2000 und AP3100 wurden fortgeführt und die Ergebnisse zur Revision #1 sollten im zweiten Quartal 2014 im Rahmen einer Demonstration vorgeführt werden. Während der Tests in AP4100 und AP4200 kam es zu einem Hardwareschaden am Positionierer der High-Gain-Antenne, weshalb die Demonstration bis Oktober 2014 verschoben werden musste (siehe ZB bis zum 30.06.2014). Im Oktober konnten, dann aber die Ergebnisse aus den AP1100, AP 2000, AP3100, AP4100, AP4200 und erste Ergebnisse aus dem AP 1400 erfolgreich demonstriert werden (siehe ZB bis zum 31.12.2014).

Durch die verzögerte Demonstration kam es zu einer kleinen Änderung in der Priorisierung der Arbeitspakete wodurch aber insgesamt keine Auswirkungen auf das Gesamtprojekt erfolgten. AP1200 und AP3200 konnten Anfang 2015 abgeschlossen werden so dass die Konzepte für die Rev#2 für das System und der Testumgebung weitestgehend vollständig waren. Parallel dazu wurde die Implementierung der IDU und ODU in AP2000 und AP1300 vorangetrieben, so dass

die Neuentwicklung des Feedhorns der HG-Antenne montiert werden konnte (siehe ZB bis zum 30.06.2015).

Im zweiten Halbjahr 2015 wurde im AP1300 die Integration der einzelnen Schichten auf eine gemeinsame Hardware vorangetrieben und die optische Schnittstelle implementiert. Im AP2100 konnte die HG Rev#2 aufgebaut und verifiziert werden und AP2200 das endgültige Konzept für das dual-bandige Paneel der LP Rev#2 festgelegt werden. Um die Nachführungsentwicklung zu vereinfachen und zu beschleunigen wurden im Rahmen des AP2300 Rapid-Prototyping-Plattformen beschafft und die Algorithmik darauf umgesetzt. Ebenso wurden Versuche mit dem digitalen Phasendiskriminator unternommen. Die Entwicklungen für die Applikation (AP1400) und des NWE Rev#2 (AP3300) wurden fortgesetzt. Da Ende 2015 absehbar war, dass die Lieferung der neuen Positionierer länger dauern würde wurde eine dreimonatige Verlängerung des Projekts bis 31.08.2016 beantragt.

Auf einem Projekttreffen Anfang 2016 wurde die Fertigstellung der einzelnen Arbeitspakete geplant. Die Ergebnisse der Arbeiten konnte am 31.08.2016 demonstriert werden. Durch weitere Verzögerungen in der Lieferung des Positionierers für die HG Rev#2 musste das Projekt allerdings erneut verlängert werden, so dass für den Projektpartner Fraunhofer IIS das Projektende auf den 31.10.2016 verschoben wurde.

## 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn

### 1.4.1 Antennentechnik und Nachführung

Als Basis für die Bearbeitung von KASYMOSA sind die Ergebnisse aus MoSaKa zu nennen. Hier wurden zwei mobile Ka-Band Antennendemonstratoren aufgebaut, welche unterschiedliche Ziele verfolgten. Zum einen wurde eine Hochgewinnantenne mit Cassegrain-Reflektorgeometrie und mechanischer Nachführung unter Verwendung eines Multimode-Monopuls-Nachführverfahrens entworfen, und zum anderen mehrere Ka-Band Antennenpaneele, welche sich für den Aufbau einer kompakten Satellitenantenne mit geringer Aufbauhöhe und einem hybriden Nachführverfahren eignen. Beide Antennenvarianten besaßen für Anwendungen in der mobilen Satellitenkommunikation vielversprechende Eigenschaften sowie ein hohes Potenzial für Erweiterungen und Optimierungen der mechanischen und elektrischen Eigenschaften, welches in Kapitel 2.1.5 eingehend dargestellt wird.

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

Der Markt für kommerziell verfügbare Antennensysteme im Ku-Band war sehr gut ausgebaut und bot eine Vielzahl von verschiedenen Modellen unterschiedlicher Hersteller mit zum Teil globaler Abdeckung durch geostationäre Ku-Band Satelliten. Hier wurden vorwiegend Empfangssysteme für mobilen Satelliten-TV-Empfang, zunehmend aber auch bidirektional verwendbare Antennen für mobiles Internet und Kommunikation angeboten, welche sich im Wesentlichen in zwei Kategorien aufteilen ließen: Es gab mechanisch nachführbare Parabolantennen meist für den maritim-mobilen Einsatz und es wurden Antennen mit geringer Aufbauhöhe angeboten, welche land-mobil verwendet werden konnten. Die kompakten Antennen wurden im Azimut meist mechanisch nachgeführt, in der Elevationsebene kamen teilweise mechanische oder elektronische Nachführverfahren zum Einsatz. Die Systeme wurden häufig mit Kompass und GPS ausgestattet und nutzten eigene Gyroskope oder das inertielle Messsystem der Schiffe, auf denen die Antennen montiert sind. Beispiele für solche Systeme waren:

- KVH [1]:
  - TrackVision A7, land-mobiles RX-System, Ku-Band, Abmessungen (DxH) 80 x 15 cm.
  - TrackVision M7, maritim-mobiles RX-System, Ku-Band, Reflektordurchmesser 60 cm, 46-47 dBW EIRP
  - TrackPhone V11, maritim-mobiles RX/TX-System, C/Ku-Band, Reflektordurchmesser 1,1 m, NMEA 0183 Schnittstelle zur Nutzung des schiffseigenen inertialen Messsystems.
- EPAK [2]:
  - SC60 und SC90, maritim mobile Ku-Band VSAT-Reflektorantenne mit Dreiaachsen-Nachführsystem, TX-fähig, Durchmesser 60...90 cm, 44-47 dBW EIRP, Azimut unbegrenzt, -10 bis 90 Grad Elevation, Radomhöhe 81..114 cm.
- Raysat [3]:
  - StealthRay5000, land-mobile Ku-Band Array-Antenne, RX/TX (40W Sendeleistung), Abmessungen (HxBxT) 19x115x90 cm, G/T ca. 7,5...8,5 dB/K.
- NDSatcom [4]:
  - SkyRAY: portable Ku-Band VSAT-Reflektorantenne mit Dreiaachsen-Nachführsystem (Befestigung auf Fahrzeugen), TX-fähig, Durchmesser 120...190 cm, 40-45 dBi Gewinn, ±190 Grad Azimut, 5 bis 90 Grad Elevation, Höhe 55 cm (zusammengeklappt im ausgeschalteten Zustand).

Im Ka-Band hat sich die Verfügbarkeit von Satellitenkapazitäten in den Jahren vor KASYMOSA stark gesteigert. Der Start der beiden Satelliten Eutelsat Ka-Sat 9A (12/2010) und ViaSat-1 (10/2011) haben die Ka-Band Ressourcen in Europa und Nordamerika drastisch verbessert, wodurch die Entwicklung für Satellitenkommunikationstechnik in diesem Frequenzband stärker forciert wurde. Bis zum Projektbeginn gab es vorwiegend stationäre oder nomadische Systeme, der Markt für mobile, selbstständig nachführbare Ka-Band Systeme befand sich weiterhin im F&E-Stadium.

Die Firma ViaSat [5] bot im Bereich von Satellitenkommunikation im Ka-Band die Produktpalette SurfBeam und SurfBeam 2 an. Diese Systeme basieren meist auf fest installierten Ka-Band Antennen für bidirektionale Kommunikation vorwiegend in Gebieten ohne terrestrische Breitband-Internetversorgung. Im Sortiment von SurfBeam 2 hat ViaSat das portable System „SurfBeam 2 pro portable“ vorgestellt, welches z.B. für die Satellitenberichterstattung (englisch: Satellite News Gathering, SNG) von Reportern weltweit genutzt werden kann. Die Antenne besteht aus einer 75 cm Cassegrain-Reflektorantenne mit einem Transceiver-Frontend, welches ein Umschalten zwischen beiden zirkularen Polarisationen ermöglicht und einem Stativ zum Aufstellen und manuellen Ausrichten der Antenne. Die Effektive Sendeleistung beträgt 48,7 dBW EIRP, das G/T beträgt 17,5 dB/K. Das zur Antenne gehörende Modem wird ebenfalls am Stativ befestigt, wodurch ein kompakter Aufbau entsteht. Zum Transport kann die Antenne zerlegt und in einen zugehörigen Koffer verpackt werden. Ein mobiler Einsatz dieser Antenne ist nicht möglich.

Das im Bereich nachführbarer Ka-Band Satellitenantennen maßgebende F&E-Vorhaben betraf das Projekt SANTANA (FKZ: 50YB0101, 50YB0311 und 50YB0710), 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.



Als weiteres Projekt aus dem Umfeld nachführbarer Ka-Band Antennen ist das Projekt KASANOVA (FKZ: 50YB1024) zu nennen. Hierbei stand die Entwicklung eines nomadischen Antennen-Terminals im Vordergrund, bei dem eine planare Antennenstruktur verwendet wurde. Die Antenne wurde mechanisch auf eine Genauigkeit von  $\pm 1^\circ$  ausgerichtet, die exakte Ausrichtung erfolgte anschließend mittels elektronischer Strahlschwenkung. Das Konzept von KASYMOSA ist hierzu komplementär ausgerichtet, da in diesem Projekt vollständig mobile Antennenterminals untersucht wurden. Die im Rahmen von KASANOVA entwickelte Antenne verwendet zwei separate Aperturen für den Sende- und den Empfangsbereich – das Konzept in KASYMOSA basiert komplementär dazu auf Antennenstrukturen, die beide Frequenzbereiche mit einer gemeinsamen Apertur bedienen können.

Im kommerziellen Bereich für nachführbare Ka-Band Antennen hat die Firma BAE Systems [6] ein „Satcom on the Move“ Antennensystem vorwiegend für den militärischen Einsatz entwickelt, welches sich im Prototypen-Stadium befand. Als Antenne kommt hier eine 48 cm Parabolantenne zum Einsatz mit einer effektiven Sendeleistung von 46 dBW EIRP und einem G/T von 12dB/K. Die Firma em Solutions [7] plante eine Einführung dieses Systems auch im kommerziellen Sektor, ob die Antenne in Europa einsetzbar sein wird, war zu Beginn des Projekts nicht bekannt.

Nachführsysteme zur Stabilisierung der rotatorischen Lage einer Plattform in zwei orthogonalen Achsen (LOS-Stabilisierung) wurden sowohl im Bereich mobiler Antennenterminals als auch für optische und militärische Zielverfahren entwickelt. Es existieren zwei prinzipielle Ansätze zur Stabilisierung der Plattformbewegung, die sich in der Anbringung der inertialen Messsensorik (IMS) unterscheiden [8]. Beim direkten Messverfahren wird die IMS direkt auf der Plattform angebracht, beim indirekten Verfahren am Einleitungspunkt der Störbewegung, dem sog. Fußpunkt. In beiden Fällen muss die zur Verfügung stehende Aktorik mechanisch die eingeleitete Störbewegung am Fußpunkt so ausgleichen, dass die Plattform in den zwei relevanten Raumrichtungen gegenüber dem Bezugssystem möglichst in Ruhe verharrt. Im Bereich der Antennentechnik existieren nur wenige solche Systeme (siehe oben / bspw. [9], [10]), die für große und hochdynamische Störbewegungen, ähnlich den Fahrzeugbewegungen während einer Geländefahrt, ausgelegt sind. Einige dieser Anwendungen stehen zudem im militärischen Einsatz, sodass es sehr schwierig ist, Informationen über die genaue Regelungsstrategie und die Leistungseigenschaften der Regelung zu erhalten. Die einzig zur Verfügung stehenden Daten sind [10] und [11] entnommen. Bei diesem System existieren drei Betriebsmodi, für Suchbetrieb sowie Nachführung mit offenen und geschlossenen Regelschleifen. Die genaue Regelungsstruktur ist jedoch nicht beschrieben. In Anwendungen, die mit der Satelliten-Nachführung vergleichbar sind, findet der Ausgleich der Störbewegung direkt über die Positions- und Geschwindigkeitsregelungen der Achsantriebe statt. Unter Berücksichtigung von Reibeffekten in den Lagern und Antrieben kommen auch fortgeschrittene Regelungsmethoden zum Einsatz, wie beispielsweise nichtlineare, adaptive oder passivitätsbasierte Regelungsansätze ([12], [13], [14], [15]). Demgegenüber ist bei der Antennennachführung von nur unvollständig bekannten Parametersätzen auszugehen. Im Bereich der Antennennachführung gibt es zudem die Möglichkeit, einzelne Achsen elektronisch nachzuführen. Im Fall der LP-Antenne wird die Elevationsrichtung ausschließlich elektronisch geregelt, während die Azimut-Richtung rein mechanisch nachgeführt werden muss. Es handelt sich somit um eine Mehrgrößenregelung mit sich stark voneinander unterscheidenden Zeitkonstanten. In bisherigen Anwendungen wird daher die Regelung der Elevationsrichtung als statisches Problem angesehen, das auf der Grundlage der Verteilung der Empfangssignalstärke die Sendesignalstärke der einzelnen Paneele einstellt. Ein eingesetztes Verfahren ist bspw. das Maximum-Ratio-Combining [16]. Für die mechanische Regelung in Azimut-Richtung, basieren



bestehende Systeme teilweise auf nur zwei Betriebsmodi (closed-loop-Betrieb und Suchmodus) [17] oder einer einfachen Drehraten-Kompensation der Störbewegung in Gierrichtung im open-loop-Modus [18]. Dieser Ansatz ist jedoch für große Nick- und Rollbewegungen ungeeignet. Die Ermittlung des Zielvektors (tracking vector) erfolgt durch mechanisches Schwenken der gesamten Antenne in Azimut-Richtung (mechanical dithering), was die erreichbare Geschwindigkeit der Nachführung deutlich einschränkt.

Eine Verbesserung der Stabilisierung im open-loop-Betrieb lässt sich mit einer teilweise oder vollständigen rotatorischen Lageschätzung der Plattform realisieren. Auf der Basis inertialsensorischer Messungen existieren hier verschiedene Ansätze, die die rotatorische Lage mit Hilfe unterschiedlicher Integrationsmethoden schätzen (vergleiche [19], [20]). Heutige Systeme bestehen meist aus hochgenauer aber sehr preisintensiver Inertialmesssensorik (wie faseroptischen oder Ringlaser-Gyroskopen). Zur externen Lageschätzung gibt es direkte aber auch statistische Verfahren, die auf der Richtungsmessung zweier inertial bekannter, nichtparalleler Vektoren beruhen (siehe [21]). Oftmals werden jedoch die Daten der Inertialmesssensorik für die Schätzung der Lage mit einbezogen (Sensorfusion), um die Schätzergebnisse beider Verfahren zu verbessern (Ausgleich von Rauschen, Messungenauigkeiten und Sensordrift). Neben der direkten Korrektur kommen hier lineare und nichtlineare, z.T. statistisch optimale und adaptive Filtermethoden zum Einsatz (wie bspw. das adaptive, erweiterte Kalman-Filter). Diese Methoden wurden im Projekt auf ihre Eignung für die vorgesehenen Antennentypen untersucht.

#### 1.4.2 Kommunikationsterminal

Bei der Satellitenkommunikation werden unterschiedliche Terminalarten unterschieden:

- Terminals mit Antennen, die keine oder nur eine sehr grobe Ausrichtung brauchen. Typisch sind hier Systeme wie Iridium oder Inmarsat. Die begrenzte Übertragungskapazität dieser Systeme ist einer der Hauptgründe mobile Satellitenkommunikation auch in anderen Frequenzbereichen wie z.B. Ka-Band anzubieten. Für ausgewählte Anwendungen können diese Systeme aber als Vergleichsmaßstab dienen um z.B. die Kosten zu vergleichen. Ansonsten spielen diese Systeme im Kontext von KASYMOSA keine Rolle.
- Ortsfeste Terminals mit großen (z.B. >2m) Antennendurchmessern mit Punkt-zu-Punkt Verbindungen. Hier wird eine Vielzahl von Lösungen angeboten. Aktuelle Lösungen bauen häufig auf Technologien auf, wie sie bei DVB-S2 standardisiert sind.
- Für KASYMOSA sind Technologien relevant, die auch bei kleinen (z.B. 40cm) und sehr kleinen Antennenaperturen einsetzbar sind. Der Stand der Technik für diese Technologien wird im Folgenden näher beschrieben.

Im Bereich der Satellitenkommunikation über **ortsfeste** Systeme mit kleinen und mittleren Antennen werden folgende Systemarchitekturen unterschieden:

- Hubstation/Gateway basierte Systeme:  
In der Regel dienen die Gateways zur Anbindung von nomadischen Satelliten-Terminals an eine terrestrische Infrastruktur („Internet“). Eine direkte Kommunikation zwischen Satellitenterminals ist nicht vorgesehen. Für eine Kommunikation zwischen Satellitenterminals sind dann zwei Verbindungen nötig und entsprechend doppelter Laufzeit. Typisch nutzen diese Systeme DVB-S2 im Forward Link und DVB-RCS(2) im Return Link oder ähnliche Konzepte.
- Wenn eine direkte Verbindung zwischen zwei Terminals realisiert werden soll, werden entweder große Antennen benötigt (siehe oben) oder wegen der geringen EIRP der kleinen Terminalantenne ist eine geringere Bandbreite ausreichend. Entsprechend können über die Bandbreite eines Transponders mehrere Verbindungen gleichzeitig realisiert werden (MCPC

= Multiple Channel Per Carrier)

Die Satellitenressource (Bandbreite, verfügbare EIRP) wird dabei statisch eingestellt und manuell verwaltet. Wenn eine Verbindung nur Teile eines Transponders benötigt, wird in der Regel im Frequenzmultiplex die Bandbreite statisch aufgeteilt. Eine dynamische Ressourcenverwaltung wird nicht oder nur sehr eingeschränkt - z.B. im Sinne von Linkadaptation - eingesetzt.

Bei **mobilen** Anwendungen kann unterschieden werden zwischen:

- Der Fokus liegt lediglich auf einer einfachen Installation/Inbetriebnahme des Terminals. Die Kommunikation ist nur aktiv, wenn das Terminal ortsfest ist.
- Der Schwerpunkt liegt auf Rundfunkanwendungen oder Datenverteilungsdiensten. Für solche Anwendungen werden insbesondere Technologien zur Überbrückung von temporären Unterbrechungen benötigt. Zeitinterleaving in Kombination mit Fehlerschutz sind hier gut erforschte Methoden. Kommerzielle Systeme für Schiffe, Züge und teilweise auch Busse sind verfügbar. Für kleine (z.B. Durchmesser 15cm) Antennen wurden auch schon verschiedene Prototypen (z.B. ESA Projekt „Ku-Mobil“) entwickelt und die Machbarkeit mehrfach demonstriert. Fraunhofer und IKV waren hier teilweise an den Projekten beteiligt. Sofern relevant kann KASYMOSA darauf aufbauen.  
Für den Anwendungsfall „Receive Only“ sind die Anforderungen an die Antennennachführung wesentlich geringer, da vom mobilen Terminal keine Störungen ausgehen können. Eine temporäre Fehlausrichtung ist letztlich gleichbedeutend zu einer kurzen Unterbrechung wie durch Abschattungen und führt lediglich zu einer geringfügigen Verschlechterung der Empfangssignalqualität und kann bei der Link-Margin berücksichtigt werden.
- Satellitensysteme für mobile Kommunikation sind bisher nur sehr eingeschränkt verfügbar. Teilweise wurden Standards wie z.B. DVB-S2/RCS für den mobilen Einsatz erweitert.

Teilweise sind auch Systeme verfügbar die auf Anwendungen wie Disaster-Management ausgelegt sind. Als Beispiel kann die Lösung SkyWAN der Firma ND-SatCom aufgeführt werden.

Stand der Technik für Satellitenkommunikationssysteme ist die Benutzung von zentralisierten Systemen mit dedizierten Resourcecontrollern und Hubstationen. Ein typisches Beispiel sind DVB-RCS Systeme. Bei diesen Systemen übernimmt ein zentraler Hub das gesamte Management des Netzes. Die Terminals senden Anforderungen an den Hub, dieser berechnet aus den Anforderungen die Ressourcenverteilung für die nächste Periode und verteilt diese über den Vorwärtskanal wieder an die Terminals. In der Standardkonfiguration von DVB-RCS fließen auch die gesamten Daten über den Hub. Als Option ist es möglich in DVB-RCS2 ein Meshoverlay zu implementieren, wobei das Management der Ressourcen immer noch vom zentralen Hub übernommen wird, Daten die direkt zwischen zwei Terminals ausgetauscht werden, aber direkt zwischen diesen gesendet werden. Diese zentralisierten Systeme haben eine Reihe von Nachteilen:

- Geringe Ausfallsicherheit durch einen Single Point of Failure.
- Erhöhte Verzögerung sowohl bei der Anforderung von Ressourcen, als auch bei der Datenübertragung (nicht so im Meshoverlay).
- Hohe Anforderungen an die Hubstation (Durchsatz, Abmessungen, Stromverbrauch).

Im Projekt MoSaKa wurde ein Verfahren zum dezentralen Ressourcenmanagement entwickelt in dem es keine zentralen Elemente gibt und dass sich prinzipiell durch höhere Verfügbarkeit, geringere Übertragungsverzögerungen und schnelleren Verbindungsaufbau auszeichnet.

Um den Stand der Wissenschaft und Technik bezüglich des reservierungsbasierten Dienstgütesystems des vorliegenden Projektvorhabens zu bewerten, lohnt sich ein Blick auf zwei Fragen:

Erstens, welche Forschergruppen haben bereits derartige Ressourcenverwaltungssysteme vorgestellt, und zweitens, welche Anbieter satellitengestützter Internetzugangssysteme sind bereits mit welchen Leistungsangeboten am Markt vertreten?

Bezüglich der Mechanismen zur Erbringung von Dienstgüte hatte sich bereits bei MoSaKa gezeigt, dass lediglich die Klasse der reservierungsbasierten Dienstgütesysteme in der Lage ist, „harte Garantien“ bezüglich einzelner Übertragungsparameter zuzusichern und durchzusetzen. Nur bei Vorhandensein eines Reservierungsprozesses kann es im Falle knapper Ressourcen zu einer Ablehnung weiterer Datenströme kommen, wodurch das Netzwerk vor Überlast geschützt wird und somit bereits bestehende Zusagen weiterhin zugesichert werden können. Bisherige Systeme dieser Art, wie beispielsweise die Architektur „Integrated Services“ (IntServ), weisen jedoch zwei gravierende Probleme auf: erstens skalieren derartige Systeme nicht aufgrund der Menge an Statusinformationen, welche in jeden Zwischensystem anfallen, und können somit nur in kleinen Netzen (als „Insellösungen“) eingesetzt werden. Zweitens wurden derartige Reservierungstechniken bislang nur für Netze mit zeitlich unveränderlichen Übertragungstrecken entwickelt, wobei für jede Teilstrecke die angebotenen Kommunikationsressourcen bekannt sind und konstant bleiben müssen. Für letztere Problematik wurde im Rahmen des MoSaKa-Projektes eine innovative Lösung geschaffen, welche das Konzept eines reservierungsbasierten Ressourcenverwaltungssystems mit einem so genannten „Feedbackmechanismus“ kombiniert, und somit dem Netzwerk erlaubt, im Falle knapper Kommunikationsressourcen, einzelne Reservierungen zeitweise zu suspendieren ohne sie zu kündigen. Diese Zustandsänderung wird den Applikationen als „Feedback“ mitgeteilt, sodass sie auf den Engpass entsprechend reagieren können. Dieses Konzept ist neuartig, und den Antragsstellern ist nach wie vor kein vergleichbares System bekannt.

Für einen Einsatz in Katastrophenszenarien bietet sich der Einsatz von satellitengestützten Systemen an, jedoch ist aufgrund der Vielfalt der Natur der anfallenden Daten ein paketvermitteltes System zu bevorzugen. Diese weisen aber das Problem auf, dass die in leitungsvermittelten Systemen implizit enthaltene Zusicherung von Kommunikationsressourcen nicht mehr existiert. Möchte man allerdings Sprach- und Videokommunikation durchführen, ohne dass deren Datenpakete durch konkurrierende Datenströme beeinflusst oder gar verdrängt werden, ist der Einsatz eines reservierungsbasierten Dienstgütesystems erforderlich. Dieses muss sämtliche Zwischen- und Endsysteme mit einschließen, wenigstens aber alle an der Satellitenübertragung beteiligten Terminals, damit es nicht zu unerwünschten Verdrängungseffekten kommen kann. Diese Anforderung ist allgemeingültig, und eignet sich damit zur Bewertung der bereits am Markt verfügbaren Kommunikationssysteme:

- ToowayDirect [22]

Dem Kunden wird ein Internetzugang über ein Ka-Band-basiertes Satellitensystem mit einer Datenrate „bis zu“ 18 Mbps und 6 Mbps für „Standarddienste“ im Down- bzw. Uplink angeboten. Dieses Angebot beinhaltet keine Garantie, dass man diese Datenraten in der Praxis auch erhalten wird. Stattdessen wird sich die insgesamt verfügbare Übertragungskapazität auf eine steigende Anzahl an Nutzern verteilen, ohne dass sich durch dynamische Signalisierungsvorgänge „bei Bedarf“ Übertragungsressourcen zuweisen lassen. Dies wird durch die Tatsache unterstrichen, dass der Kunde als Terminal ein Gerät erhält, welches den erwünschten Internetzugang wie ein Router bereitstellt. Aus Sicht des Kunden sind somit keine Reservierungs- und Feedbackmechanismen möglich. Auf seiner Webseite weist der Anbieter darauf hin, dass er sich im Überlastfall das Recht zur Priorisierung bestimmter Datenströme herausnimmt. Damit wird das Ziel, ein System mit harten Übertragungsgarantien zu schaffen, verwehrt.

- emergency.lu [23]

Dieser Anbieter richtet sich speziell an Rettungskräfte, welche innerhalb von 12 bis 20 Stunden an beinahe jedem Punkt der Erde (die Pol-nahen Regionen sind ausgenommen) mittels eines Satellitenkommunikationssystems versorgt werden sollen. Der angebotene Dienst umfasst jedoch keinen Internetzugang, sondern ist als Komplettpaket aus gemieteter Satellitenkapazität inklusive diversen auf Katastrophenszenarien zugeschnittenen Diensten zu verstehen. Diese Dienste werden als „Multi-layer Platform“ realisiert und bestehen aus einer Vielzahl mitgelieferter Applikationen für unterschiedliche Zwecke. Ob ein Zugriff auf das Internet möglich ist, und ob bezüglich der Datenströme aus „eigenen Applikationen“ Dienstgüteanforderungen beachtet werden können, wird nicht beantwortet.

Internetprovider werben mit einem IP-basierten Netzzugang für ein geringes Nutzungsentgelt, und bieten sich damit idealerweise für einen Internetzugang „von unterwegs“ an. In Anbetracht des der dargelegten Anforderungen wird aber klar, dass ausnahmslos alle marktüblichen Systeme, welche dem Kunden lediglich einen Internetzugang versprechen, für den Einsatzzweck des vorliegenden Projektes ungeeignet sind. Bei einem typischen Zugang zum Internet können keine reservierungsbasierten Dienstgüteschemata eingesetzt werden, da derartige Systeme mangels Fähigkeit zu skalieren nicht in einem Netz der Größe des Internet eingesetzt werden können. Zudem sprechen die Zwischensysteme des Providers und dessen Satellitenterminals kein Signalisierungsprotokoll, sodass Applikationen keine Reservierungen durchführen können und dem Netzwerk die Fähigkeit fehlt, diese auch durchzusetzen. Die Übertragungsressourcen werden systemintern ausgehandelt, und müssen über eine unbekannt große Anzahl an Terminals verteilt werden. So erhält man auch im Falle einer ungestörten Übertragung über die Luftschnittstelle noch lange keine Zusicherung bezüglich einer Mindestdatenrate oder einer maximalen Übertragungsverzögerung. Als Kunde erfährt man lediglich, welche Datenrate man theoretisch im Idealfall bekommen könnte, wenn man der alleinige Nutzer des Systems wäre. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass keines der am Markt verfügbaren paketorientierten Satellitenkommunikationssysteme geeignet ist, um Rettungskräfte in Krisengebieten gemäß ihrer Anforderungen an die Dienstgüte paketorientiert anzubinden. Nur durch den Einsatz von Inselösungen, welche eine überschaubare Anzahl an Systemen mit jeweils dienstgütefähiger Vermittlungsfunktion aufweisen, können Datenströme dienstgütebehaftet auch mit harten Garantien übertragen werden. Das MoSaKa-QoS-System stellt ein solches System dar und gute Ausgangsbasis für die Implementierung der aufgeführten Ziele.

#### 1.4.2.1 KASYMOSA L3-QoS

Wie jedes komplexe System bezieht KASYMOSA L3-QoS einen Teil seiner Ideen aus seinen Vorgängern. Hauptsächlich relevant sind hierbei vier bestehende Ansätze: *Integrated Services (IntServ)*, *Next Steps in Signaling (NSIS)*, die *Component Quality Modeling Language (CQML)* und *MoSaKa QoS* als direktes Vorgängersystem.

#### 1.4.2.2 Integrated Services (IntServ)

Bereits 1994 in RFC 1633 [24] [25] beschrieben ist die Integrated Services Architektur eine Blaupause für alle reservierungsbasierten QoS-Systeme. In seiner allgemeinsten Ausprägung ist IntServ weniger ein bestehendes System, als vielmehr eine Ideensammlung für QoS-Systeme auf Basis von Microflows (d.h. individuellen Datenflüssen zwischen einer Quelle und einem Ziel, typischerweise identifiziert durch IP-Adressen, Transportprotokoll und ggf. dazugehörigen Ports). Das RFC beschreibt eine (begrenzte) Umsetzung der Ideen in Form des *Resource Reservation Protocol (RSVP)*.

Grundidee der IntServ-Architektur ist die Signalisierung der gewünschten Dienstgüte für einen

bestimmten Datenfluss durch das Endsystem und daraufhin dauerhafte Reservierung der benötigten Ressourcen in jedem Router entlang des betreffenden Netzwerkpfades in Form des Resource Reservation Protocols (RSVP). Eine aktive Admission Control verhindert eine Überlastung der vorhandenen Ressourcen durch Ablehnen nicht bedienbarer Anfragen. IntServ beschreibt Ideen zur aktiven Anpassung von Reservierungen zur Reaktion auf veränderliche Umgebungsbedingungen. In RSVP ist dies als Möglichkeit zur Löschung einer aktiven Reservierung seitens des Netzes umgesetzt. Weitergehende Möglichkeiten wie eine temporäre Deaktivierung einzelner Pfade sind nicht vorgesehen.

RSVP führt die auch in KASYMOSA verwendete Trennung in Filter- und Parameterobjekte in der Signalisierung ein. Das Filterobjekt (in RSVP: FLOWSPEC) beschreibt die Parameter anhand derer Pakete einem bestimmten Datenstrom zugeordnet werden können (bspw. Quell- und Zieladressen und Ports). Im Parameterobjekt (in RSVP: TSPEC) wird die gewünschte Dienstgüte hinterlegt. Der genaue Aufbau des Objektes ist hierbei abhängig vom gewünschten QoS-Modell. Das ursprünglich spezifizierte Token-Bucket-Modell hinterlegt hier bspw. Informationen wie Tokenraten und Bucket-Größe. Andere Parametersätze sind möglich.

RSVP beschreibt einen grundlegenden Signalisierungsvorgang, der vergleichbar zu KASYMOSA mit einem einzigen Umlauf für eine Reservierung auskommt. Das Protokoll setzt hierbei auf eine strikte Rollenverteilung: der Sender eines reservierten Datenstroms initiiert die Signalisierung durch ein Paket zur Topologieerkennung, der Empfänger führt die eigentliche Reservierung durch. Hierdurch ist RSVP besser für bestimmte Netzwerktopologien geeignet, die beispielsweise durch seinen Nachfolger NSIS und auch KASYMOSA nicht abgedeckt werden können. Die strikte Rollenverteilung verhindert allerdings ein effizientes Aggregieren mehrerer Signalisierungsvorgänge in einen Nachrichtenaustausch, eine der Anforderungen im Anwendungskontext von KASYMOSA.

#### 1.4.2.3 Next Steps in Signaling (NSIS)

Ziel der Next Steps in Signaling (NSIS) [26] ist die Entwicklung einer generischen Infrastruktur für sämtliche Signalisierungsbelange im Internet. QoS-Signalisierung ist nur eine mögliche Anwendung einer derartigen Infrastruktur. NSIS ist daher weniger ein Protokoll, als eine Sammlung von Vorschlägen für eine Signalisierungsinfrastruktur.

Innerhalb des Rahmens von NSIS gibt es Spezifikationen für einzelne Systemteile, die tatsächlich als Protokolle implementierbar sind und damit als Ideengeber für KASYMOSA zur Verfügung stehen. Konkret zu nennen sind hier der Generic Internet Signaling Transport (GIST) [27] als Transportschicht, sowie NSIS QoS-NSLP [28] als QoS-spezifisches Anwendungsprotokoll innerhalb des NSIS-Frameworks.

GIST stellt eine Protokollsammlung zum effizienten Transport von Signalisierungen im Internet zur Verfügung. Es bildet zu diesem Zweck ein Overlay-Netz zwischen GIST-tauglichen Knoten, innerhalb dessen Signalisierungsnachrichten weitergeleitet werden. Als Transportprotokolle kommen UDP, TCP und SCTP zum Einsatz. GIST stellt hierbei eine Topologieerkennung, eine Überbrückung von nicht NSIS-tauglichen Netzen und Übertragungsgarantien zur Verfügung.

QoS-NSLP bietet einen Rahmen zur Spezifikation von QoS-Signalisierungsprotokollen. Es schreibt selbst kein bestimmtes QoS-Modell vor, sondern bietet lediglich die abstrakten notwendigen Datenstrukturen zur Spezifikation konkreter Modelle. Bisher stehen keine fertigen Spezifikationen für existierende Systeme die IntServ im Kontext von NSIS zur Verfügung.



QoS-NSLP spezifiziert eine Art von Abhängigkeiten zwischen signalisierten Sitzungen. Anhand einer BOUND-SESSION-ID und eines Binding Codes kann eine Sitzung sich in Beziehung (bspw. Abhängigkeit) zu einer anderen setzen. Die genaue Interpretation des Session Binding ist abhängig vom konkreten QoS-Modell. Eine Erweiterung der vorgegebenen Beziehungstypen ist durch die Einführung neuer Binding Codes möglich. Eine generische Darstellung der Session-Beziehung über vorher vereinbarte Bindings hinausgehend ist nicht möglich.

#### 1.4.2.4 Component Quality Modeling Language (CQML)

Die Component Quality Modeling Language [29] ist kein klassische Netzwerk-QoS-System, sondern eine Sprache zur Modellierung von QoS-Anforderungen im Softwareentwicklungsprozess.

Als Inspiration für KASYMOSA dient CQML insofern, als dass es ein Konzept zur Komposition komplexer QoS-Anforderungen aus einfachen Parametern spezifiziert. Parameter können mit logischen Ausdrücken auf gültige Werte eingeschränkt werden und zu umfassenderen Anforderungen zusammengesetzt werden (z.B. „Latenz < 100ms UND Datenrate > 2 Mbit/s“).

#### 1.4.2.5 HTTP/2

Die kommende Inkarnation des Hypertext Transfer Protocols unterstützt einfache Abhängigkeiten zwischen Datenströmen einer Übertragung [30]. So können einzelne Ressourcen von anderen abhängen (bspw. kann eine CSS-Ressource von einem Bild oder einer Schriftdatei abhängen). Diese Abhängigkeiten erlauben dem Transportprotokoll eine Priorisierung der Elemente bei der Übertragung an den Client, um eine möglichst schnelle Darstellung zu erlauben.

### 1.4.3 Testsysteme und -verfahren

Stand der Technik für den Test von „SatCom on the move“ Systemen war zu Projektbeginn weitestgehend die Durchführung von Feldtests (z.B. [11], [10]). Diese Vorgehensweise setzt voraus, dass ein oder mehrere operationelle Satelliten zur Verfügung stehen. Der Fokus liegt maßgeblich auf der Bestimmung der Übertragungsgüte der Funkübertragung und weniger auf der genauen Bestimmung des Störverhaltens zu räumlich benachbarten Satelliten. Das Interferenzverhalten solcher Systeme, schematisch dargestellt in Abbildung 1, ist jedoch entscheidend für die Funktion und Leistungsfähigkeit des gesamten Satellitenkommunikationsnetzes.

Des Weiteren ist die Wiederholgenauigkeit von Feldtests unzureichend, kostenintensiv und die Testergebnisse sind oft nicht nachvollziehbar. Mehrere Effekte die auf die Übertragungsgüte einen wesentlichen Einfluss haben, wie Abschattung, Erschütterung und Fading (aufgrund von Regen), treten in unbekannter und meistens nicht wiederholbarer Kombination auf. Eine spezielle Form dieses Testverfahrens wird vom Global VSAT Forum (GVF) vorgeschlagen [31]. Hierbei werden zur Bestimmung der Fehlausrichtung zwei operationelle Satelliten und zwei feste Bodenterminals verwendet. Jedes Bodenterminal wird mit sehr hoher Genauigkeit auf einen der beiden Satelliten ausgerichtet. Das zu testende Nachführsystem (auf dem Fahrzeug montiert inklusive des Terminals) sendet nur in die Richtung des ersten Satelliten. Die Fehlausrichtung des Systems wird mittels eines Spektrum Analysators aus dem Leistungsunterschied zwischen den beiden Empfangssignalen der beiden festen Bodenterminals bestimmt (siehe Abbildung 2).

Dieses Verfahren hat wie bereits erwähnt den Nachteil der unzureichenden Wiederholgenauigkeit. Weiterhin wird vorausgesetzt, dass die beiden Empfangszweige der Bodenterminals identisch aufgebaut sind (sowohl die Ausrichtung als auch die Antennenpattern der beiden Satelliten und die der beiden Bodenterminals müssen identisch sein). Da diese Annahmen in der Praxis oftmals nicht gegeben sind, führt dieses zu Messungenauigkeiten. Des Weiteren kann mit dieser Methode die Fehlausrichtung in Elevation nicht bestimmt werden was indirekt zu einem ungenaueren Ergebnis in der Azimut Richtung führt.

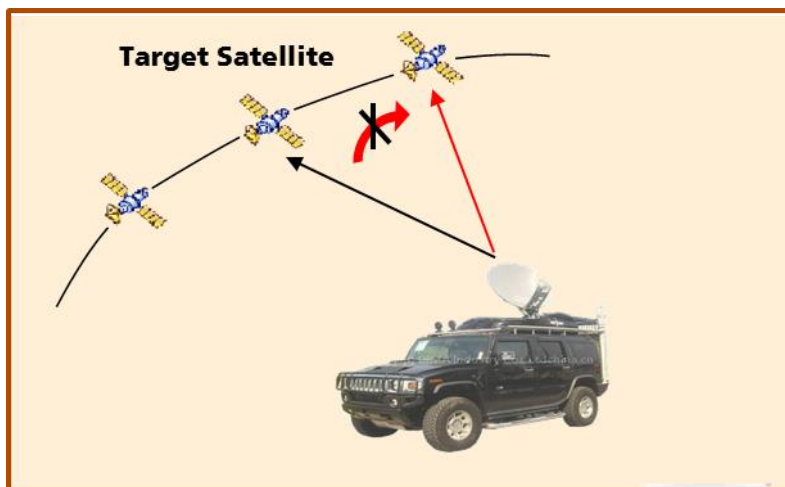


Abbildung 1: Darstellung der Interferenzproblematik zu Nachbarsatelliten für „SatCom on the move“ Systeme

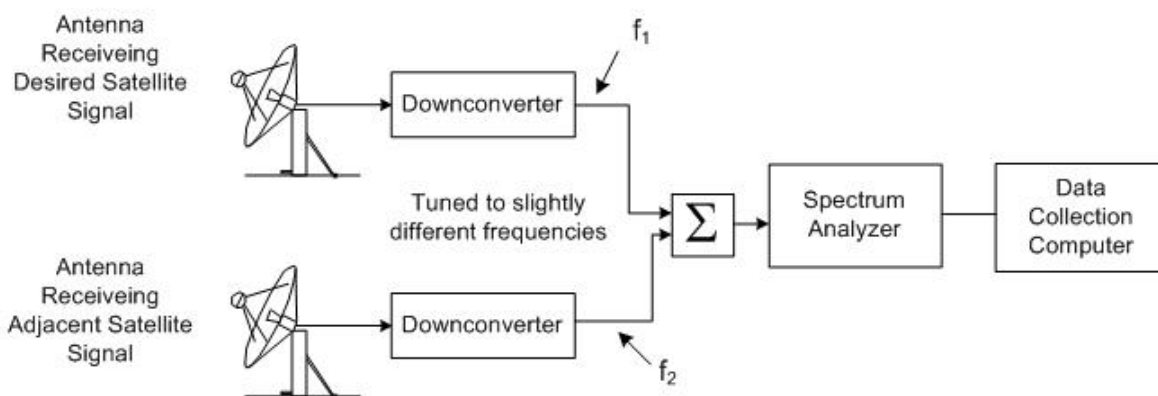


Abbildung 2: Vorgeschlagenes Testverfahren GVF-105 vom Global VSAT Forum [31].

Eine zur Fraunhofer IIS FORTE verwandte Anlage ist eine beim amerikanischen Militär in Aufbau befindliche Testanlage (Abbildung 3). Die vom United States Army Communications-Electronics Research, Development and Engineering Center (CerdeC) betriebene Anlage fokussiert jedoch maßgeblich auf die Bestimmung des Nachführverhaltens der Antenne im Empfangsfall. Es wird weniger Wert auf die Evaluierung des Gesamtsystems in Abhängigkeit synchronisierter und definierter Abschattungs-, Doppler- und Bewegungsprofile gelegt. Ein Closed-Loop Test in Hinsicht der Gesamtpformance des Systems unter Beobachtung und Messung aller relevanten Parameter ist nicht angestrebt. Ein Nachteil dieser Anlage ist die Durchführung der Tests im Nahfeld der Antenne. Einen jedoch offensichtlichen Vorteil bietet die Möglichkeit „beliebige“ Elevationswinkel für den zu emulierenden Satelliten vorzugeben.

Weitere bekannte Testverfahren beschränken sich vorwiegend auf Teilaspekte oder eine reine Softwaresimulation.



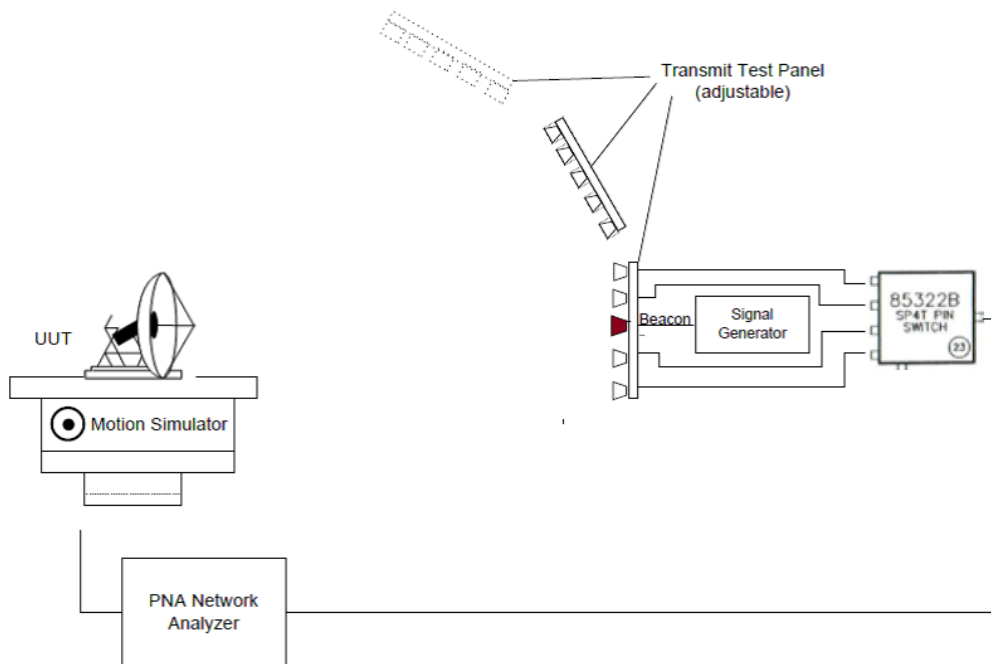


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Testsystems der United States Army Communications-Electronics Research, Development and Engineering Center (Cerdec) [32].

Generell lassen sich die Testverfahren entsprechend der Zielsetzung in vier Kategorien unterteilen:

- Fokus ist auf die Genauigkeit der Nachführung beim **Empfang**. Hier ist neben der Bestimmung des Pointing-Fehlers (z.B. Abweichung von der idealen Ausrichtung) die Bewertung des Fehlers von Interesse. Hierzu ist wichtig die resultierende Degradation des Empfangssignals im Systemverbund zu bewerten. Da moderne Systeme eine Vielzahl von Konfigurationsparametern anbieten erfordert ein Vergleich entweder reproduzierbare Bedingungen oder einen Zugriff auf Rohdaten. Dies erfordert spezielle Messempfänger, die Zugriff auf diverse Messpunkte erlauben und die Entwicklung von umfangreicher Auswertesoftware.  
Der Test mit Anlagen wie FORTE stellt hier eine attraktive Alternative dar. Es können auch normale Produkte für einen Test verwendet werden und die Einflüsse von verschiedenen Konfigurationsparametern reproduzierbar verifiziert werden.
- Größere Anforderungen stellt die Verifikation der Nachführung beim **Senden** dar. Hier muss neben der Charakterisierung des Nachführfehlers insbesondere auch eine Analyse für kritische Szenarien durchgeführt werden. Hierzu muss z.B. die Wahrscheinlichkeit bestimmt werden, mit der ein Fehler auftritt bestimmt werden. Die Bestimmung des mittleren Fehlers ist hier oft nicht ausreichend. Typisch wird dabei für repräsentative Nutzungsszenarien eine statistische Analyse durchgeführt. Um eine Vergleichbarkeit der Nutzungsszenarien sicherzustellen werden häufig unterschiedliche Systeme für Referenzrouten verglichen. Da Effekte wie größer der Bäume, Witterung etc. einen Einfluss haben, ist offensichtlich, dass Referenzszenarien schwer im Feld reproduzierbar nachstellbar sind. Diesem Problem entgegnet man bei Feldversuchen durch eine Wiederholung der Messung oder sehr lange Feldtest. Reproduzierbare Tests leisten daher auch einen Beitrag zur Verkürzung der Testzeiten.

- Gesamtsystemverhalten bei adaptiven Systemen:  
Insbesondere bei adaptiven Systemen ist eine Reproduzierbarkeit der Testszenarien wichtig. Bei Systemen mit Mehrfachzugriff muss hier das Verhalten der anderen Teilnehmer mit emuliert werden. Bei Feldtests würde das erfordern, dass viele Terminals gleichzeitig zum Einsatz kommen. Bei Testanlagen kann dies in der Regel vereinfacht werden. So können z.B. andere Teilnehmer durch Signalgeneratoren emuliert werden.

Optimierung von Parameters unter reproduzierbaren Bedingungen:

Hierfür sind insbesondere die Wechselwirkungen der Parameter wichtig. Ein reproduzierbarer Test mit entsprechend kurzen Testzeiten lässt hier zu, dass viele Konfigurationen miteinander verglichen werden können.

#### 1.4.4 Applikationen für zielgerichtete Anwendungen

Der Einsatz von Service orientierten Architekturen hat in der freien Wirtschaft mittlerweile den Status „State of the Art“ erlangt. Auch im Kontext des Katastrophenschutzes kommt dieser Ansatz immer häufiger zum Einsatz. Die beiden folgenden Punkte stellen dabei ideale Beispiele sowohl national als auch international dar.

- SoKNOS (Service-orientierte Architekturen zur Unterstützung von Netzwerken im Rahmen öffentlicher Sicherheit)
- INCOIS (Indian National Centre for Ocean Information Services)

Diese wachsende Beliebtheit von Web-Services macht die Selektion eines Dienstes zu einer der Schlüsselfunktionen für den Erfolg dieser Technologie. Klassischer Weise arbeitet eine Service orientierte Architektur nach dem Paradigma „find-bind-execute“ in welcher sich Service Provider ihren Dienst in öffentlichen Registraturen registrieren, welche von den Konsumenten verwendet werden um Dienste zu lokalisieren. Diese Registratur behandelt allerdings nur die funktionale Beschreibung des Dienstes und behandelt somit beispielsweise nicht die Zeit bis zur Antwort eines Services. Genau für solche Anforderungen müssen vorher vereinbarte Qualitätsparameter ausgehandelt werden.

Es gibt derzeit zwei Technologien zur Unterscheidung verschiedener QoS Parameter. Beide Technologien sind auf der Transportebene (DiffServ, IPQoS, classes of services in UMTS und ATM, ...) und Serverseitig (load balancing, transaction differentiation, http request differentiation, ...) angesiedelt. Für die Umsetzung der gewünschten QoS Anforderungen auf Applikationsebene hat sich noch keine Technologie durchsetzen oder Standard entwickeln können. Um diese Lücke zwischen der Web Service Ebene und den darunter befindlichen QoS bewussten Transport Technologien zu schließen, wurden unterschiedlichste Ansätze zur Entwicklung WS-QoS Frameworks verfolgt. Weiterentwicklungen insbesondere im Segment der Service Registries ermöglichen hierbei unter Verwendung von WS-Policies neue Betrachtungen zur Beschreibung von QoS-Anforderungen, welche beim Einsatz von UDDI gestützten Registraturen nicht unterstützt wurden.

#### 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

In das Projekt KASYMOSA 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 Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS in Erlangen ist eine weltweit führende anwendungsorientierte Forschungseinrichtung für mikroelektronische und informationstechnische Systemlösungen und Dienstleistungen. Es ist heute das größte Institut der Fraunhofer-Gesellschaft. Unter anderem mit der maßgeblichen Beteiligung an der Entwicklung der Audiocodierverfahren mp3 und MPEG AAC ist das Fraunhofer IIS weltweit bekannt geworden. In enger Kooperation mit den Auftraggebern betreiben die Wissenschaftler internationale Spitzenforschung in den Forschungsfeldern Audio & Multimedia, Bildsysteme, Energiemanagement, IC-Design und Entwurfsautomatisierung, Kommunikationssysteme, Lokalisierung, Medizintechnik, Sensorsysteme, Sicherheitstechnik, Versorgungsketten sowie Zerstörungsfreie Prüfung. Rund 950 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter arbeiten in der Vertragsforschung für die Industrie, für Dienstleistungsunternehmen und öffentliche Einrichtungen. Das 1985 gegründete Institut hat 13 Standorte in 10 Städten: in Erlangen (Hauptsitz), Nürnberg, Fürth und Dresden sowie in Bamberg, Waischenfeld, Coburg, Würzburg, Ilmenau und Deggendorf. Das Budget von 130 Millionen Euro pro Jahr wird bis auf eine Grundfinanzierung in Höhe von 22 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*, *iKersaTec*, *OKTech*, *FlexInet Phase 2* u.a. ermöglicht. Die Forschungsgruppe ist mit kabelgebundener und on-wafer Frequenzbereichs- und Zeitbereichs-Messtechnik umfangreich ausgestattet.

Darüber hinaus stehen drei interdisziplinäre Forschungslabore zur Verfügung, zu denen neben dem Labor für Mobilkommunikation insbesondere ein Antennen-Messlabor mit Präzisions-Positionierer sowie die Messeinrichtung „Virtuelle Straße Simulations- und Testanlage VISTA“ im Thüringer Innovationszentrum Mobilität 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 KASYMOSA-Konsortiums (Fraunhofer IIS, TU Ilmenau – IKS). 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 Netzwerkarchitekturen (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. Konkrete Forschungen im Umfeld des 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 Simulationswerkzeuge 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. Beispielhaft sind dies die Projekte WISECOM (Wireless Infrastructure over Satellite for Emergency Communication), Alert4All (Pan-European Cooperative Alert System.), 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-RCS2, Ku-Mobile, und DVB-SH.

---

## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Im Folgenden werden die detaillierten Ergebnisse innerhalb des Projektverlaufs dargestellt. Wo bei bei stark gegliederten Arbeitspaketen die Untergliederung in Unter-Arbeitspakete erfolgt.

#### 2.1.1 AP1100 - Implementierung IDU Rev #1 – KASYMOSA-Basissystem

##### 2.1.1.1 AP 1110: Implementierung PHY-Rev #1

In diesem Projekt wurde aufgrund der Erfahrungen aus dem Vorgängerprojekt MoSaKa ein Re-design von Teilen der Physical Layer Software durchgeführt. Im Transmitterpfad des Physical Layer musste die hohe Sendelatenz reduziert werden. Dazu wurde die komplette Sendekette analysiert und die verteilten Puffer auf einen deutlich kleineren pro QoS-Pfad reduziert. In diesem Zug wurde auch die Architektur stärker modularisiert und so die Kopplung zwischen den CG-Frames so weit wie möglich reduziert. Bei dieser Neustrukturierung wurde auch der Kanal-Encoder (Turbo Encoder) in ein separates Modul ausgelagert. Diese Änderung ermöglicht, z.B. bei Last-Problemen, den Encoder in einen eigenen Prozess oder auf eine Beschleuniger-Hardware auszulagern.

Zur Puffer-Reduktion (und damit Latenzreduktion) wurde das Protokoll zur Datenweitergabe zwischen dem Mac-Layer und dem Phy-Layer ersetzt. Es wurde für die Schnittstelle ein Flow Control Protokoll entworfen und implementiert. Das war notwendig, da die Verarbeitungsgeschwindigkeit des PHY und des L2 notwendigerweise voneinander abweichen, da beide variabel sind. Im Interesse eines bestmöglichen QoS muss das Scheduling im L2 so spät wie möglich erfolgen (weil immer noch höher priorisierte Pakete eintreffen können). Aus diesen Gründen wird an der Schnittstelle ein Token benutzt, das zwischen L2 und PHY hin- und hergereicht wird. Befindet sich das Token auf PHY Seite, ist der PHY damit beschäftigt, Daten, die er bereits bekommen hat, zu senden. Gehen diese Daten zur Neige, übergibt der PHY das Token an den L2 zusammen mit einer Information, wieviel Daten er maximal erwartet und der Maximalzeit, die der L2 warten kann, bevor die Sendepipeline des PHY leerläuft. Befindet sich das Token auf der L2-Seite, so kann der L2 zu einem beliebigen Zeitpunkt (gesteuert vom Füllstand der Mac-Queues und der Tokenparameter) eine Reihe von Frames erzeugen und diese zusammen mit dem Token an den PHY übergeben. Somit kann der Phy-Layer aktiv steuern, dass nur die Daten für den nächsten Verarbeitungszeitschlitz übergeben werden, was eine erhebliche Reduktion der Schedulinglatenz mit sich bringt. Hält sich der Mac-Layer an die Zeit- und Datenmengen - Vorgaben des Phy, ist es auch unter Volllast möglich, die Sendepipeline voll zu halten, ohne dass der Phy-Layer Padding eintasten muss. Zusammenfassend werden die benötigten Daten nun aktiv vom Phy-Layer zu einer definierten Zeit in einer passenden Menge angefragt. In Mosaka füllte der Mac-Layer einen Fifo im Phy-Layer bis zu einem max. Füllstand und behielt diesen bei ohne einen Zeitbezug zum Sendeframe.

Der Empfangspfad wurde in der Rev #1 komplett neu konzeptioniert. Der Multithreading – Ansatz aus Mosaka wurde aufgrund seiner Instabilität in einen Single-Threaded Ansatz überführt. Jeder CG-Frame hat nun seinen eigenen Decapsulator-Pfad, so dass das System skalierbar ist, je nachdem wieviel CG-Frames (User) maximal dekodiert werden sollen.

Da die Sende- und Empfangsbandbreite durch den neuen Tuner in Rev#2 deutlich gesteigert werden kann, wurde ein Konzept für den Anschluss eines Turbo-Decoder Beschleunigers (z.B. Hardware-Beschleuniger) entwickelt und auch schon in weiten Teilen umgesetzt. Das Konzept sieht eine transparente Schnittstelle vor, so dass der eingesetzte Software Decoder gegen den Hardware Decoder ausgetauscht werden kann, ohne dass Anpassungen in der weiteren Software nötig sind. Kern des Konzepts ist, dass alle Daten Codewörter in einem Decoder dekodiert werden und dass jedes Codewort in einem Header die Art der Dekodierung (Länge, Coderate)



sowie seine Zuordnung zu einem bestimmten CG-Frame mitführt. Das Konzept wurde durch die Auslagerung des Turbo Decoders in einen separaten, über Puffer abgesetzten Prozess evaluiert und wird so in Rev#1 und Rev#2 betrieben.

Durch die enge Verzahnung der Integration und Evaluierung des Revision#1-Terminal (AP4100) und dessen Implementierung wurden während der Laufzeit dieses Arbeitspakets (AP1100/AP1110) noch weitere Fortschritte gemacht. Es wurden während der Tests gefundene Implementierungsfehler behoben und so ein stabiles und testfähiges System hergestellt. Weiterhin wurden Erweiterungen an den Terminals vorgenommen, um ein Testen mit den anderen Komponenten zu ermöglichen und die Integration mit den höheren Layer sowie mit den Antennen zu vereinfachen. Dazu wurde ein Synchronisationsmodul im PHY implementiert um Frequenzablagen, die unweigerlich durch die FORTE-Anlage und die Verwendung der Antennen auftreten, zu erkennen und anschließend korrigieren zu können. Zudem wurde die Hardware soweit erweitert, dass sie einerseits allein nur mit einer Kabelverbindung zwischen den Aus- und Eingängen betrieben werden kann (für die Tests der höheren Layer) als auch über die Antennen, die eine Frequenzumsetzung benötigen. Weiterhin wurden für den Test der digitalen Antennennachführung zusätzliche Antenneneingänge integriert, die für die Berechnung des digitalen Messsignals (Phasendiskriminator) nötig sind.

#### 2.1.1.2 AP 1120: Implementierung MAC-Rev #1

Der MAC-Layer des Kasymosa Systems erfüllt eine Reihe von Aufgaben, die sehr verschieden sind, aber trotzdem mehr oder weniger gekoppelt implementiert werden müssen.

Im Datenpfad passt der MAC-Layer die unterschiedlichen Datenformate des darüber liegenden IP-Layers und des PHY Layers aneinander an. Der IP-Layer produziert und konsumiert Datagramme die inhärent variable Größe haben und zu wenig vorhersagbaren Zeitpunkten anfallen. Auf der anderen Seite stellt der PHY-Layer Pakete zur Verfügung deren Größe starr und an die Kanaleigenschaften und Übertragungskapazität gekoppelt ist. Diese Pakete müssen zu Zeitpunkten geliefert werden, die durch das Ressourcenmanagement definiert werden. Aus diesem Grund wurde das von DVB-RCS2 bekannte RLE Protokoll verwendet, das eine sehr flexible und dynamische Fragmentierung erlaubt. Zusammen mit einem Scheduler im Sendepfad, der von der Flusskontrolle zum PHY angetrieben wird, erlaubt das Protokoll eine hochdynamische Kopplung der Anforderungen von L3 und PHY.

Mittelbar mit dem Datenpfad verbunden ist das Management der Ressourcen im System. Dieses Management ist über alle drei Schichten verteilt, wobei der L2 ein Art Koordinationspunkt darstellt. Zum einen erhält die MAC Schicht Anfragen aus dem L3 für Ressourcen. Zusätzlich kann der MAC-Layer eine Raten- und Volumenabschätzung vornehmen um eine Legacyinterface zu implementieren. Das Ergebnis dieser Berechnungen wird mit Hilfe eines speziell entwickelten Signalisierungsprotokolls periodisch an alle Terminals gesendet. Aus den empfangenen Signalisierungsnachrichten schätzt der MAC-Layer den Abschattungszustand der Terminals ab und übergibt die Anforderungen aller Terminals (bei abgeschatteten Terminals auch die Anforderungen aus früheren Signalisierungsnachrichten) an die PHY-Schicht. Die Ergebnisse der Berechnungen im PHY werden dann an den L3 signalisiert und auch im L2 verwendet.

Zusätzlich spielt der MAC-Layer eine koordinierende Rolle bei der Implementierung der adaptiven Kodierung und Modulation. Die von PHY gelieferten Signal- zu Rauschmessungen werden an die jeweiligen anderen Terminals gesendet (auf demselben Signalisierungskanal wie die Ressourcenanforderungen). Dort werden sie verwendet um zusammen mit den Qualitätsanforderungen aus dem L3 die bestmöglichen Übertragungsverfahren auszuwählen.



Im MAC-Layer sind auch einige kleinere Funktionen angesiedelt, wie Zugriff auf Managementinformationen und Synchronisation der Systemzeit mittels GPS.

### 2.1.1.3 AP 1130: Implementierung LLC-Rev #1

Das aus dem MoSaKa-Projekt übernommene QoS-Signalisierungsprotokoll wurde auf Fehlerzustände hin untersucht und angepasst. Zu diesem Zweck wurden die Protokollautomaten in UPPAAL [33] modelliert und auf Dead- und Live-Locks analysiert. Des Weiteren flossen die in der Zusammenarbeit mit den Projektpartnern entdeckten Instabilitäten unter unzuverlässigen Übertragungsbedingungen in eine Überarbeitung des Protokolls ein.

Aus der Zusammenarbeit mit dem Projektpartner IABG ergab sich der Wunsch nach einer Überarbeitung der Anwendungsschnittstelle. Die ursprünglich verwendete Binärcodierung des Protokolls stellte sich als übermäßig aufwändig in der Implementierung heraus. Da gerade diese Schnittstelle für die Integration von Drittanbietern in das System essentiell ist, wurde beschlossen, hier auf eine systemübergreifende Lösung in Form von Google Protocol Buffers [34] zu setzen. Die betreffenden Protokollnachrichten wurden in Protobuf neu spezifiziert und den Partnern zur Verfügung gestellt. Dies erlaubt Drittanbietern nun eine einfache Generierung kompatibler Schnittstellen für viele Zielprogrammiersprachen und beschleunigt so die Entwicklung QoS-tauglicher Anwendungen erheblich.

Durch die Integration mit MAC- und PHY-Schicht konnten weitere Implementierungsfehler und -ungenauigkeiten aufgedeckt und behoben werden. Am Ende dieser Entwicklung stand eine erfolgreiche Demonstration des Rev.-#1-Systems im Oktober 2014.

### 2.1.1.4 AP 1140: Implementierung eines Software-Development Kit für Applikations-Entwickler

Um die Entwicklung von Anwendungen durch Drittanbieter zu vereinfachen wurde ein Software Development Kit für das Rev #1-System bereitgestellt. Anstelle einer kompletten Terminalimplementierung inklusive PHY- und MAC-Schicht tritt ein emuliertes Satellitensystem, welches auf einem einzelnen Rechner ausgeführt wird. Dieses zeigt das Verhalten des realen Systems inklusive Übertragungsverzögerung und Signalisierungsabläufen.

Das Emulatorsystem steht in Form von installierbaren Paketen für Debian Linux zur Verfügung. Interessierte Anwender können die entsprechende Softwarequelle einbinden und die notwendigen Programme installieren. Nach der Konfiguration der gewünschten Systemparameter (bspw. Anzahl emulierter Terminals) kann eine passende Umgebung erzeugt werden. Vergleichbar zu realen Terminals stehen danach Anwendungsnetzwerke zur Verfügung, die durch einen emulierten Satelliten verbunden sind.

## 2.1.2 AP1200 - Erweitertes Systemkonzept und simulative Analysen

### 2.1.2.1 AP 1210: Erweitertes Systemkonzept für "flexible Waveform"

Im WP1200 („Erweitertes Systemkonzept“) wurden im Berichtszeitraum erste Arbeiten zur besseren Integration aller drei Layer auf einem Gerät vorgenommen. Die Zielplattform wurde definiert und eine Möglichkeit zur verteilten Entwicklung ohne DT4000 Hardware ist angedacht. Erste Erkenntnisse zur Kommunikation des L2 mit L3 und PHY liegen vor und Teile des öffentlichen Dateninterfaces von L2 wurden spezifiziert.

Zur Optimierung der Wellenform wurde zum einen untersucht, wie bei gegebener MoSaKa Wellenform durch eine optimierte Sortierung der benutzten Frequenzressourcen eine verbesserte Leistungsfähigkeit durch Minimierung gegenseitiger Störungen erreicht wird. Zum anderen wurden zwei Ansätze untersucht, die Wellenform zu verändern. Anstelle des reinen SC-FDM,

d.h. Frequenzmultiplex von verschiedenen Übertragungssignalen pro Sendeterminal können neben dem Signalisierungspfad alle weiteren Signalpfade zeitlich (TDM) in ein einziges Übertragungssignal sortiert werden. Mit diesem SCPT (Single Carrier per Transmit Terminal) Ansatz lässt sich das Sendesignal hinsichtlich des Spitzenwert-Faktors optimieren und es wird somit ermöglicht, den Sendeverstärker besser auszunutzen zu können, ohne benachbarte Kanäle direkt zu stören. Durch die zusätzliche Einbeziehung eines Sendefilters (Pulse Shaping) lässt sich die Nebenkanaalstörung benachbarter Sendeterminale über den Satelliten weiter verringern. Weiterhin wurde die Austauschbarkeit von Spreading von Coderate untersucht und im Hinblick auf die herrschenden Signal-Rausch-Verhältnisse eine Vorschrift zur Wahl der Signalparameter (Modulation, Coderate, Spreizfaktor) erstellt.

Der zweite untersuchte Ansatz zur Änderung der Wellenform betrifft das verwendete Schutzintervall. Die Verwendung eines speziellen Schutzwortes (Unique-Word) anstelle des bei SC-FDM normalerweise verwendeten periodischen Schutzintervalls erlaubt dem Empfänger den Einsatz leistungsfähigerer Synchronisations- und Kanalschätzungsverfahren, welche vor allem Vorteile bei sich zeitlich schnell verändernden Kanälen, bzw. auch beim Auftreten von frequenzselektiven Kanalbedingungen bringen.

Es wurde ein Konzept zur Minimierung der Störungen bei Empfang von mehreren CG-Frames, die von unterschiedlichen Terminals gesendet werden entworfen und verifiziert. Hintergrund für diese Arbeit ist dass das Spektrum in der Mosaka – Waveform auf die verschiedenen Sendeterminale aufgeteilt wird. Soll ein Terminal mit anderen Terminals kommunizieren, die unterschiedliche Empfangsbedingungen haben (z.B. durch Kanaleigenschaften oder Antennenparameter), kann es vorkommen, dass ein Terminal sogar mehrere CG-Frames aussendet. Die CG-Frames lassen sich nach ihrer Größe in Anzahl der benutzten Carrier und ihrer Sendeleistung charakterisieren. Wie die verschiedenen CG Frames spektral zusammengefügt werden, war im MoSaKa Projekt frei wählbar. Dadurch war es möglich, dass zwei CG-Frames im Spektrum nebeneinanderliegen können, die einen großen Leistungsunterschied haben. Ist der Leistungsunterschied sehr groß, kann das erhebliche Auswirkungen auf den Empfang respektive das SNR des CG-Frame mit niedriger Sendeleistung durch die Nebenaussendungen des Leistungsstarken haben. Diese Auswirkungen können einerseits durch sog. Guard-Carrier zwischen den CG-Frames abgemildert werden. Dabei werden unbenutzte Carrier ohne Leistung zwischen die einzelnen CG-Frames einsortiert. Diese ist jedoch nur möglich, wenn noch unbenutzte Carrier vorhanden sind. Weiterhin kann auch die Sortierung der CG-Frames angepasst werden, so dass möglichst wenig Leistungsunterschied zwischen benachbarten CG-Frames besteht. Im Konzept wurden die genannten Lösungsansätze betrachtet, sowie Kombinationen daraus. Weiterhin wurden noch die Fälle betrachtet, dass einige der CG-Frames an feste Positionen gesetzt werden müssen (z.B. der Signalling Slot bzw. Ressourcen abgeschatteter Terminals), und der Rest möglichst optimal darum gruppiert werden muss. Da hierbei die Komplexität sehr stark wächst, wurde auch die Berechnung von suboptimalen Ergebnissen betrachtet, die aber aufgrund des verteilten Ressourcen Managements überall zum gleichen (suboptimalen) Ergebnis kommen muss. Hierbei wurden vielversprechende Lösungsstrategien erarbeitet, die eine echte Verbesserung v.a. in Systemen mit vielen parallelen Übertragungen erzielen können.

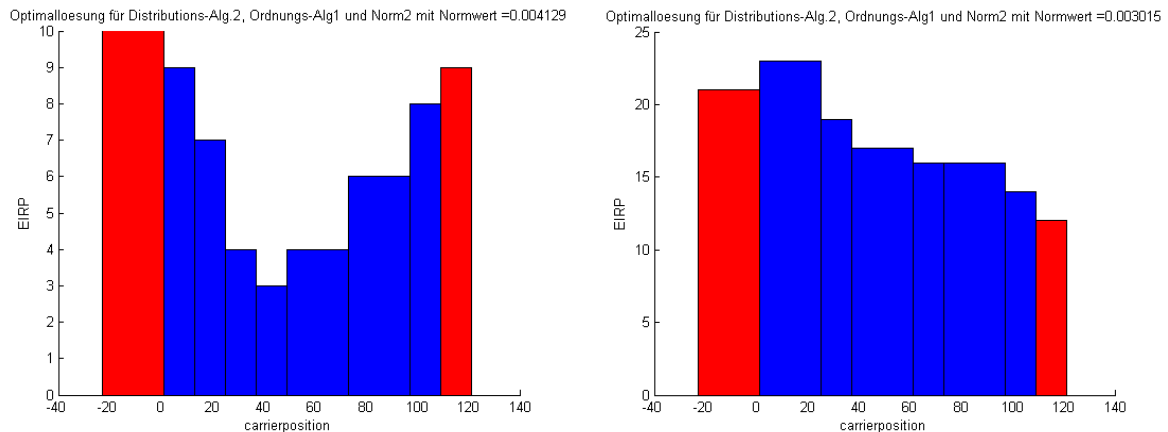


Abbildung 4: Optimale spektrale Ordnung des Sendespektrums für zwei Szenarien mit jeweils zwei festen Anteilen (Signaling-Kanal und der Spektralblock eines abgeschatteten Terminals)  
a) freie CG Frames mit niedrigerer Leitungsdichte, b) CG frames mit ähnlicher Leistungsdichte wie die der festen Blöcke

### 2.1.2.2 AP 1220: Erweitertes Systemkonzept für integriertes Ressourcen- und QoS-Management

Im diesem Arbeitspaket wurde das erweiterte Systemkonzept für das Terminal erstellt. Bei der Analyse der Anforderungen für eine effiziente Cross-Layer Optimierung zeigte sich, dass das gemeinsame Datenmodell notwendig ist und die Ressourcenberechnung möglichst nah gekoppelt sein muss, da andernfalls schlechtere Entscheidungen aufgrund von fehlenden Daten und vor allem aufgrund fehlender Zwischenergebnisse andere Layer erfolgen würden oder sehr große Datenmengen zwischen den verschiedenen Layern ausgetauscht werden müssen, welches die Effizienz mindert und die Komplexität deutlich erhöht. Die Trennung der Datenverarbeitung der verschiedenen Layer kann aber ohne weiteres im traditionellen Schichtenmodell organisiert bleiben, um auch die Vorteile der Abstraktion und Kapselung zu erhalten. Die Vorteile der Kapselung treten vor allem durch die örtlich getrennte Entwicklung der Layer hervor.

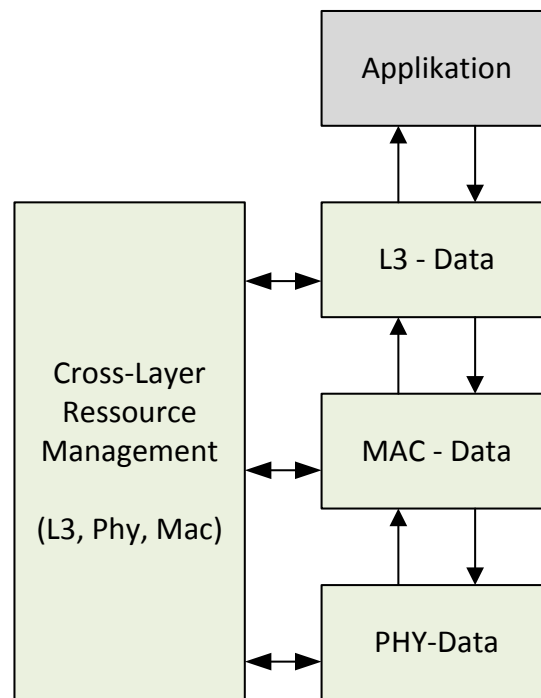


Abbildung 5: Das KaSyMoSa System im Schichtenmodell

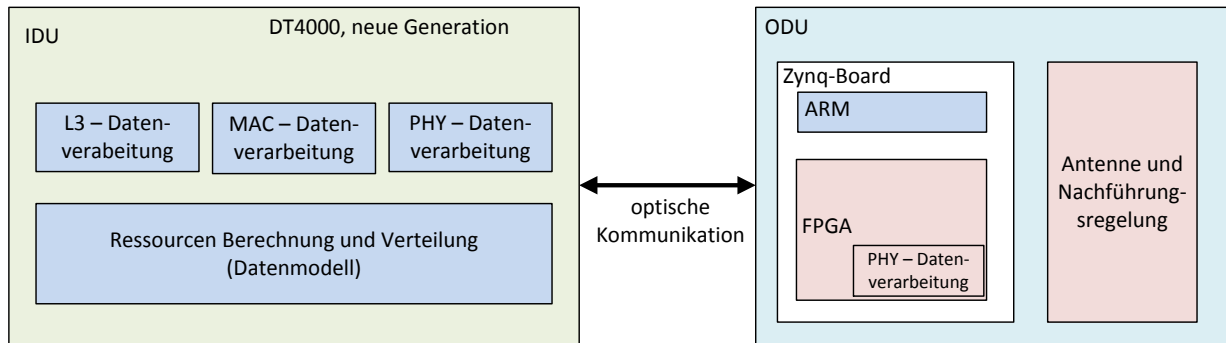


Abbildung 6: Partitionierung IDU und ODU für KaSyMoSa Rev#2

Aus Sicht des Fachgebietes IKS umfasste AP 1220 den Hauptanteil der wissenschaftlichen Arbeit an KASYMOSA: die Untersuchung von Pfadbeziehungen als Schlüssel zur effizienten Ressourcenverteilung. Ausgangspunkt war das in Rev #1 entwickelte QoS-System: eine reservierungsbasierte Architektur mit aktiver Pfadsteuerung aus dem Netzwerk. Während der Entwicklung fiel auf, dass aus Anwendungssicht das bestehende Pfadmodell einfacher Datenflüsse von einer Quelle zu einem Ziel nicht ausreichend ist. Bereits einfache Transportprotokolle wie TCP benötigen zwei voneinander abhängige Pfade zur Übertragung von Daten und den dazugehörigen Bestätigungsnachrichten. Ohne Kenntnis der Abhängigkeit zwischen diesen Pfaden kann das QoS-System keine sinnvolle Entscheidung über die Zuteilung von Ressourcen treffen. Eine Situation, in der nur einer der betreffenden Pfade reserviert werden kann ist für die An-

wendung gleichbedeutend mit der kompletten Ablehnung aller Reservierungen. Ziel für Revision #2 war daher die Entwicklung eines Relationenmodells, mit welchem dem Netz die notwendigen Informationen über Pfadbeziehungen zur Verfügung gestellt werden können. Des Weiteren wurde angestrebt, mit dem gleichen Relationenmodell auch neue Anwendungsfälle, wie die Signalisierung alternativer QoS-Parameter zur automatischen Adaption im Netz, abzudecken.

Relationen werden in KASYMOSA als Ausdrücke der Aussagenlogik realisiert. Diese drücken bestimmte Invarianten über die Zustände reservierter Pfade aus. Damit ist es dem Netz möglich, eine bestehende Ressourcenverteilung hinsichtlich ihrer Gültigkeit zu bewerten: ergeben sich basierend auf den aktuellen Pfadzuständen alle Relationen zu 1, ist die Lösung gültig und verschwendet keine Ressourcen. Ist die nicht der Fall, so sind alternative Lösungen zu suchen. Das System ist dadurch in der Lage, keine Ressourcen an Pfade zu verschwenden, die aufgrund intrinsischer Abhängigkeiten in den höheren Schichten nicht genutzt werden können. Dies schlägt sich in einer deutlich verbesserten Bedienung von Nutzeranforderungen gerade im Überlastfall nieder. Die entsprechenden Ergebnisse konnten erfolgreich als Veröffentlichung auf der WCNC 2016 in Doha, Katar präsentiert werden.

Um eine Integration in nicht-QoS-fähige Netze zu gewährleisten wurde das Signalisierungsmodell überarbeitet. Rev #1 setzte ein QoS-fähiges Endsystem für den erfolgreichen Aufbau eines Pfades voraus. Durch die Auftrennung des Ende-zu-Ende-Pfades in einzelne Segmente kann eine angepasste Behandlung der Reservierung für jeden einzelnen Teilpfad vorgenommen werden. Die bisher bestehende Trennung in Dispatcher-Software als aktives, anfragendes System und QoS-Daemon als passiv umsetzendes System wurde aufgegeben und die gesamte Funktionalität in den QoS-Daemon integriert. Dadurch können wie bereits bisher Knoten im Netz „übersprungen“ (bei mangelnden QoS-Fähigkeiten), sowie Pfade bereits vor dem Endsystem terminiert werden. Dieser Anwendungsfall ist speziell bei der Anbindung des KASYMOSA-Systems an das Internet wichtig: eine Ressourcenverteilung ist hauptsächlich auf dem Satellitenlink als Engstelle notwendig. Da im Internet dahinter KASYMOSA-taugliche Systeme weder notwendig sind, noch vorausgesetzt werden können, kann ein entsprechendes Gatewaysystem nun eine Terminierung aller Pfade vornehmen, ohne das Signalisierungsprotokoll zu stören.

Ein wichtiger Punkt, der schon bei der Entwicklung von MoSaKa identifiziert wurde, ist die Vermeidung von single points of failure durch Verteilung der Aufgaben. Die engere Kopplung der Schichten in KASYMOSA erlaubt es, das verteilte Management des Systems und der Systemressourcen deutlich effizienter und stabiler durchzuführen, da Änderungen im Systemstatus sich schneller und unmittelbarer auf die einzelnen Schichten auswirken können.

### 2.1.2.3 AP 1230: Konzept und Definition für digitale optische Schnittstelle IDU-ODU

Verschiedene Konzepte für die Ausführung der optischen Schnittstelle zwischen ODU und IDU wurden in diesem Arbeitspaket evaluiert. Hierbei wurde die Nutzung eines Wellenlängenmultiplexes auf der optischen Faser als die am besten geeignete Lösung identifiziert, um unabhängig in der Wahl der Protokolle für die verschiedenen Verbindungen, die über die optische Schnittstelle geführt werden zu bleiben. Hierbei ergeben sich auch keine gegenseitigen Beeinflussungen in Bezug auf Latenz oder Jitter.

Die Schnittstelle zwischen dem PHY-Teil der ODU und IDU basiert auf der standardisierten Ethernet-Schnittstelle. Die Alternative ein eigenes RAW – Protokoll zu verwenden wurde verworfen, da die massiv erhöhte Entwicklungszeit gegenüber den potentiellen (aber keineswegs gesi-

cherten) Vorzügen wie geringere Latenzen und geringere FPGA Auslastung, nicht zu vertreten war.

Als Protokoll wird UDP verwendet, da es in der Hardware/FPGA am effizientesten zu implementieren war und den Anforderungen für die Datenübertragung zwischen PC und FPGA genügt. Da die Verbindung zwischen PC und FPGA als Point-to-Point Verbindung aufgebaut ist, ist auch nicht mit Paketverlusten zu rechnen, daher wird kein weitaus aufwändigeres TCP verwendet.

Der Vorteil dieser Lösung ergibt sich dadurch, dass viele Software und Hardware-Module bereits vorhanden und getestet sind, sowie im Hardwareaufbau fertige, einfache und billige Komponenten wie Medienkonverter und bei Bedarf auch Switches ohne Probleme und Anpassungen eingesetzt werden können. Zudem werden mehrere logische Datenströme über verschiedene Portnummern getrennt und vom Netzwerktreiber auf den Datenstrom gemultiplext.

Zur Paketierung der Daten in die UDP-Pakete wurde noch ein kleines, eigenes Protokoll entworfen und implementiert das die Burstzusammenfassungen, den Reset sowie die notwendige Flusskontrolle vom PC in den FPGA hinein beinhaltet.

Aufgrund dieses Konzepts ergab sich die benötigte Hardware. Auf FPGA-Board-Seite wurde ein SFP-Modul eingesetzt, daran die Glasfaserverbindung durch die opt. Drehkupplung und auf der PC-Gegenstelle entweder eine SFP-Netzwerkkarte oder eine Medienkonverter (Glasfaser nach Kupfer Netzwerkschnittstelle), die dann direkt an eine vorhandene Netzwerkbuchse der IDU angebunden werden kann.

#### 2.1.2.4 AP 1240: Jamming Analyse

Im Rahmen der Jamming Analyse wurden zunächst verschiedene Arten von Jammern analysiert. Als Störsignale werden üblicherweise kontinuierliche Rauschsignale oder pulsformige Signale eingesetzt. Weiter spezifiziert kommen insbesondere die folgenden Signaltypen vor:

- Schmalbandige Störer, festes Frequenzband (typischerweise ein Träger) und hohe Leistung.
- Unmodulierte Störer mit fester Frequenz (typischerweise die Trägerfrequenz).
- Schmalbandige Störer, die (z.B. sägezahnartig) über die gesamte Transponderbandbreite des Satelliten scannen (und damit einzelne Träger nur kurzzeitig stören).
- Störer, die ihr Frequenzband entsprechend dem FH-Pattern des zu störenden Nutzers wechseln.
- Intelligente Störer, die ein Signal vom gleichen oder ähnlichen Typ wie das Nutzsignal aussenden, aber nicht die zu übertragende Nachrichteninformation tragen.

Störer können unabhängig vom tatsächlich ausgesandten Nutzsignal arbeiten (sogenannte Barrage Jammer) oder abwechselnd in den Kanal lauschen und darauf reagierend/adaptierend Störsignale senden.

Weiterhin wurden verschiedenen Gegenmaßnahmen analysiert:

- Bandspreizung, um das Signal auf eine größere Bandbreite zu verteilen als der durch den Jammer gestörte Frequenzbereich. Idealerweise Verteilung des Nutzsignals auf einen so großen Frequenzbereich, dass das Signal nicht im Rauschen detektierbar ist.
- Frequenzsprungverfahren, Wechseln der Trägerfrequenz nach einer Pseudo-Zufallsfolge, um den störenden Einfluss schmalbandiger Störer zu begrenzen. Die Pseudo-Zufallsfolge muss dazu auch dem Kommunikationssatelliten bekannt sein. Es hängt deshalb auch vom Kommunikationssatelliten ab, ob dieses Verfahren angewendet werden kann.

- Erhöhung der Sendeleistung, führt zu einem besseren Abstand der Signalleistung zur Stör- und Rauschleistung. Ziel sollte sein, dass die Sendeleistung größer ist als die Störleistung.
- Reduktion der Netto-Übertragungsrate, dafür z.B. Verbesserung der Forward Error Correction Fähigkeit und Wahl eines robusteren Modulationsverfahrens.
- Frequenzdiversität, das Verlagern der Nutzsignalübertragung auf einen anderen Träger bei gleichzeitigem Weitersenden ohne Nutzsignalinformation im bis dahin genutzten Frequenzbereich, um dem Jammer zu suggerieren, dass er ein Nutzsignal stört.
- Decoying, das Senden von besonders wichtigen Informationen über mehrere Kanäle und/oder Frequenzen in der Hoffnung, dass nicht alle verwendeten Kanäle und/oder Frequenzen gestört sind und die Information über mindestens einen Kanal übertragen werden kann.
- Adaptive Antennenarrays, zum Ausblenden der Richtung aus der ein Störer sein Störsignal auf die Bodenstation richtet

Anschließend wurde in Matlab Simulink eine Jamming Simulationsumgebung für DVB-S2 implementiert.

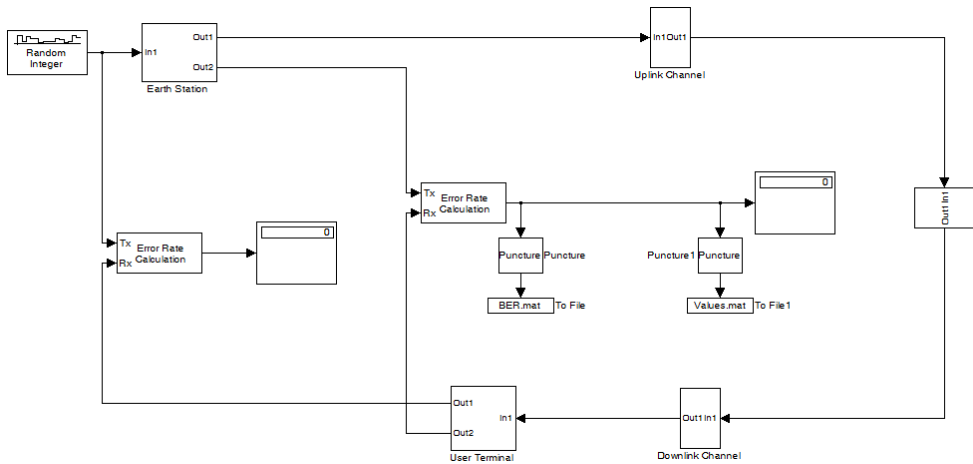


Abbildung 7: Gesamtmodell zur Nachbildung des Standards DVB-S2.

Innerhalb der folgenden Tabelle werden die wesentlichen Annahmen für die durchgeführten Simulationen dargestellt:

Parameter	Wert
Mittenfrequenz des Nutzsignals im Downlink	20,1 GHz
Polarisation des Signals	RHCP
Gewinn der Satellitenantenne	48 dB
Antennentyp der Empfangsstation	HG-Antenne / LP-Antenne (Antennencharakteristiken gemäß MoSa-Ka-Abschlussbericht)
Antennengewinn HG / LP	38 dB / 18,5 dB



Position der Sendestation	München (48° lat, 11°long)
Position der Empfangsstation	Bremen (53° lat, 8,8°long)
Elevationswinkel der Antenne an der Bodenstation	29° (ergibt sich direkt aus der angenommenen Position der Bodenstation)
Rauschtemperatur im Satelliten	724 K
Rauschtemperatur in BS	150 K

Tabelle 1: Randbedingungen für die Simulation.

Im Rahmen der durchgeführten Simulationen wurden die folgenden Jammer betrachtet:

- Jammer bestehend aus zwei Single Tone-Sendern mit:
  - unterschiedlichen einstellbaren Amplituden
  - unterschiedlichen einstellbaren Frequenzen
  - unterschiedlichen einstellbaren Einstrahlrichtungen zur Empfangsantenne der Bodenstation
  - unterschiedlichen einstellbaren Abständen zur Bodenstation
- Schmalbandiger Jammer mit rauschähnlichem Charakter mit
  - einstellbarer Mittenfrequenz
  - einstellbarer Bandbreite
  - einstellbarer Gesamtleistung

Diese beiden Jammer wurden innerhalb von Matlab/Simulink in einem Subsystem implementiert und jeweils für die High Gain und Low Profile Antenne simuliert.

Im Folgenden werden die Ergebnisse für den Single Tone Jammer kurz vorgestellt:

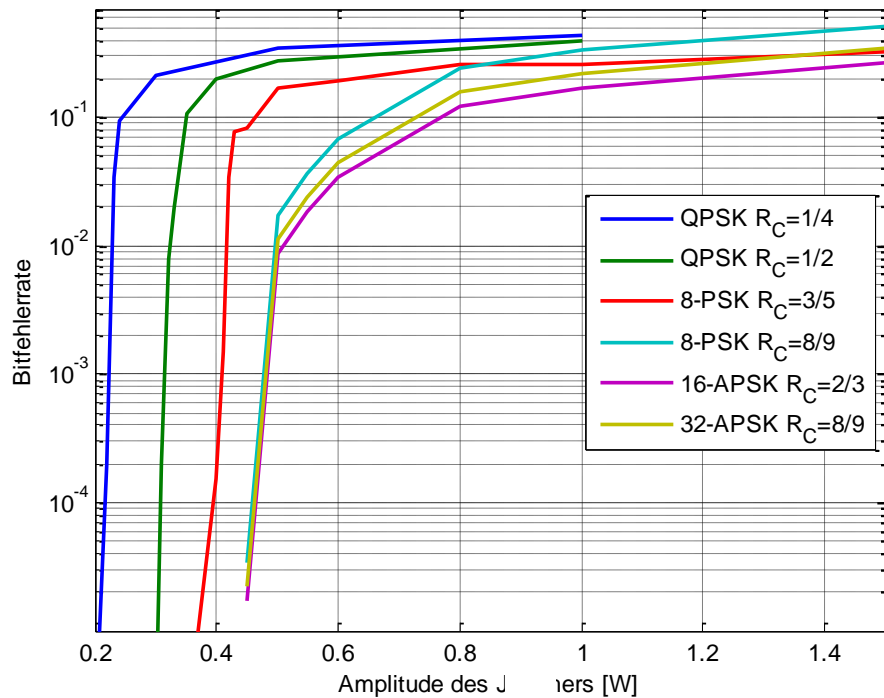


Abbildung 8: Single Tone Jammer- HG-Antenne.

Aufgrund der Tatsache, dass die Links (ohne Jamming) jeweils derart ausgelegt wurden, dass ein Link Margin von etwa 3 dB zu verzeichnen war, sind die durch das Jamming verursachten Bitfehlerraten für alle sechs unterschiedlichen Kombinationen aus Coderate und Modulationsverfahren in einem ähnlichen Bereich.

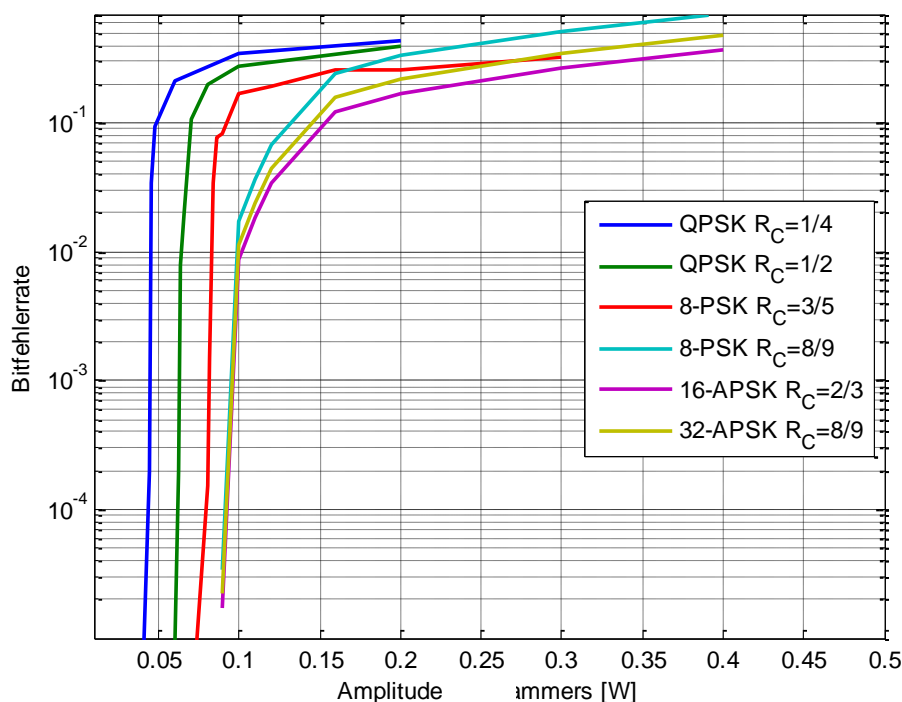


Abbildung 9: Single Tone Jammer- LP-Antenne.

Aufgrund der erheblich geringeren Dämpfung des Jamming-Signals gegenüber dem Nutzsignal (im Vergleich zur HG-Antenne) führt bereits eine Amplitude von 0,1 für die beiden Jamming-Signale in einem Kilometer Abstand zur Bodenstation dazu, dass eine Übertragung der Nutzdaten nicht mehr möglich ist.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass (da die KASYMOSA-Signalstruktur keine Maßnahmen zur Unterdrückung von Jammern beinhaltet) ein Jamming der Signale ohne großen Aufwand möglich ist. Bereits eine Abstrahlleistung des Jammers von 10 mW kann zu einer Unterbrechung der Kommunikation führen. Die durchgeführten Simulationen sollen Anregungen für eine zukünftige Weiterentwicklung des Systems gegeben werden, welche die Robustheit des Systems gegenüber Jammern verbessern können.

## 2.1.3 AP1300 - Entwicklung und Implementierung IDU – Rev #2 – erweitertes KASYMOSA-System

### 2.1.3.1 AP 1310: Entwicklung und Implementierung PHY-Rev #2

Das Systemkonzept der Rev#2 sieht eine optische Schnittstelle zwischen ODU und IDU (siehe AP1230) vor. Weiterhin soll der Tuner L- und S-Band fähig sein sowie eine Bandbreite haben, die einen Empfang der kompletten Mosaka-Waveform zulässt. Die IDU muss fähig sein alle Layer aufzunehmen sowie die Ansteuerung der ODU zu übernehmen. Anfangs war nicht klar, ob die IDU noch einen Teil der FPGA-Datenverarbeitung übernehmen muss oder ob sich die komplette DV in den ODU Teil des Phy integrieren lässt.

Nach der Evaluation verschiedenen Möglichkeiten wurde die Entscheidung getroffen, sämtliche FPGA-basierte Datenverarbeitung in der ODU durchzuführen. Dies hat zum einen den Vorteil, dass die benötigten Datenraten zwischen der IDU und der ODU reduziert werden können. Zum anderen wird in der IDU somit kein FPGA mehr benötigt, wodurch die IDU in einem weiteren

Schritt als Standard-PC ausgeführt werden könnte, der lediglich über eine optische Netzwerkkarte oder einen Medienkonverter verfügen muss.



Abbildung 10: IDU Rev#2 basierend auf neuester Generation des DT4000

Als Basis für die Integration aller 3 Layer wurde ein DT4000 Gerät neuer Generation gewählt. Dieser besteht aus einem Standard Industrie-PC und kann zusätzlich eine FPGA-Hardwareplattform aufnehmen, die aber in der gewählten Partitionierung nicht benötigt wird. Sie könnte aber z.B. für Hardwarebeschleunigung des Turbo-Decoders eingesetzt werden. Der DT4000 beherbergt die komplette Phy – IDU sowie die Layer 2 (Mac) und 3.

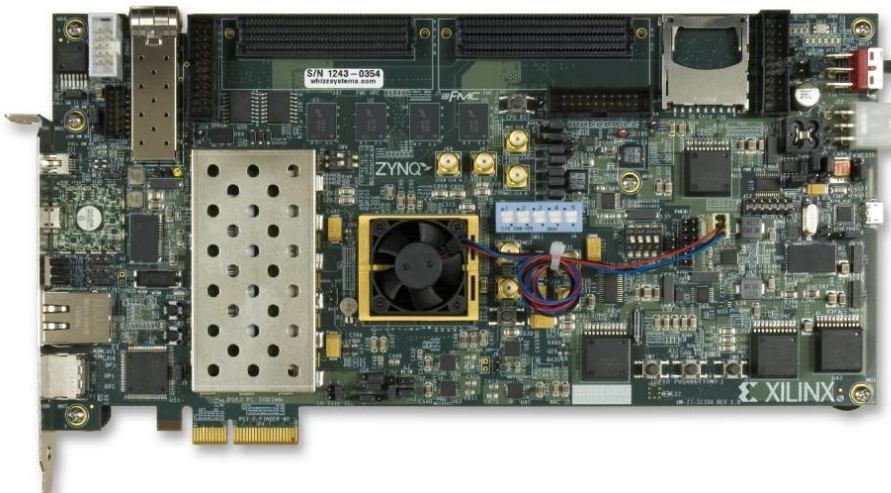


Abbildung 11: Xilinx Zynq Evaluation Board ZC706

Als Basis der ODU wurde ein Xilinx Eval Board mit Zynq-Baustein (ZC706) ausgewählt. Das Board besitzt als zentrale Komponente eine Xilinx Zynq Baustein der Kintex-Reihe. Dieser nimmt die gesamte FPGA-basierte Datenverarbeitung des Phy-Layers auf. Zudem besitzt das Board eine FMC-Schnittstelle, auf der das Tuner-Board aufgesteckt wird (siehe unten). Weiterhin ist nativ ein Anschluss für die optische Netzwerkverbindung (SFP) vorhanden. Die Kommunikation zwischen IDU und ODU erfolgt über dieses optische Dateninterface (siehe auch AP1340).



Abbildung 12: AD-FMCOMMS3-EBZ (Ansicht der Ober- und Unterseite)

Als Tuner für RX und TX wurde das FMCOMMS3- Board von Analog Devices ausgewählt und beschafft. Dieses beinhaltet 2 Sende- und Empfangspfade auf Basis des Analog Devices AD9361 2x2 Transceiver Chips. Es besitzt eine Tuner-Bandbreite von bis zu 56 MHz, welche abhängig von gängigen Satelliten-Transponder-Bandbreiten auch reduziert werden kann. Das Board wurde so ausgewählt, dass es über die vorhandenen Erweiterungsstecker auf das als Teil der ODU ausgewählte Xilinx Eval-Board ZC706 aufgesteckt werden kann.

Als Vorbereitung für AP 4300 (Integration und Evaluierung) wurden das Xilinx Zynq Eval-Board (ZC706) sowie der entsprechende Tuner AD9361 in Betrieb genommen und bestimmte Basisfunktionalitäten hergestellt. Dies ist die initiale Konfiguration des Tuner-Modul, sowie die Monitoring und Control Strukturen für Tuner wie auch Transmitter und Receiver-Pfad.

Der ARM des Zynq-Board wurde mit einem passenden Linux-Betriebssystem ausgestattet, auf dem ggf. auch Softwaremodule der ODU lauffähig wären. Eine Netzwerkverbindung zum Zynq-Board wurde hergestellt. Der ARM Prozessor wird nicht für Aufgaben im Datenpfad verwendet, sondern wird für Monitoring- und Debugging-Aufgaben vorgehalten.

Im Zuge der Umsetzung der Revision #2 des KASYMOSA Terminals wurde die Berechnung des digitalen Phasendiskriminators in die FPGA-Receiver Hardware implementiert. Das Übertragungsprotokoll zum Austausch der Phasendiskriminatorwerte, sowie der empfangenen Leistungs- und Rauschwerte zur digitalen Unterstützung der Antennennachführung wurde definiert und in die Phy Software implementiert und getestet.

Die in Rev#1 weiterentwickelte Software konnte im Kern in die Rev#2 übernommen werden. Es mussten allerdings die meisten Schnittstellen nach außen adaptiert oder neu implementiert werden. Dies sind z.B. die Signal-Schnittstelle in den FPGA, sowie Monitoring und Control. Weiterhin wurde das Ressourcen Management vom Datenpfad separiert und nach C++ portiert.



Dies war eine notwendige Voraussetzung um das Ressourcen Management aller 3 Layer zusammenzufügen.

Das gemeinsame Ressourcen Management wurde so in einem weiteren Schritt in ein vorher erstelltes Framework integriert.

Somit läuft die komplette FPGA-basierte Datenverarbeitung im FPGA des ZC706 Evaluation Board. Der verwendete 2-Kanal-Transceiver ist per FMC-Stecker verbunden und kann in vollem Umfang verwendet werden.

Um die neuen Möglichkeiten dieser Lösung auszunutzen, wurden die Sende- und Empfangsbandbreite auf 10 MHz verdoppelt, die Demo-Geräte können nun eine 256 FFT benutzen. Dazu wurden einerseits die Fähigkeiten des neuen Transceivers genutzt sowie der Systemtakt der Datenverarbeitung im FPGA erhöht. Beides war mit der Rev#1 Hardware nicht möglich. Eine weitere Erhöhung der Sende- und Empfangsbandbreite ist prinzipiell möglich, es wurde jedoch von der Implementierung Abstand genommen, da der Aufwand (höhere Verarbeitungsgeschwindigkeiten) keinen weiteren Mehrwert für das Projekt gebracht hätte.

Die Ressourcenprogrammierung des Receivers (RX) wurde an eine performantere Schnittstelle als in Rev#1 angebunden, so dass auch eine Frame-by-Frame Programmierung beider Empfangspfade kein Problem mehr darstellt. In Rev#1 hätte max. ein Pfad in 250 ms programmiert werden können.

Im Empfangspfad der FPGA-Datenverarbeitung wurde eine neue Monitoring und Control Schnittstelle in die Software implementiert und integriert. Diese ermöglicht eine laufende Kontrolle des Receiver-Verhaltens über die Software sowie eine dynamische Regelung des RX, wie sie z.B. bei Frequenzdrifts oder größeren Standortänderungen notwendig ist.

#### 2.1.3.2 AP 1320: Entwicklung und Implementierung MAC-Rev #2

Ziel von AP 1320 war die Überführung des MAC-Layers aus Rev#1 in das integrierte System mit einer engeren Kopplung der verschiedenen Schichten und die Ergänzung der Schicht um zusätzliche Funktionen. Weiterhin sollten die Algorithmen zur Abschätzung der Abschattungssituation stabilisiert werden und zusätzliche Signalisierungsfunktionen verwirklicht werden.

Die Portierung der zahlreichen Bibliotheken, die die verschiedenen Protokolle implementieren stellte eine besondere Herausforderung dar. Die Abschattungsberechnung ist nun zusätzlich in der Lage Abschattung von Up- und Downlinks von fremden und des eigenen Terminals getrennt zu ermitteln und zu behandeln. Weiterhin wurden Signalisierungsfunktionen eingebaut, die eine Benutzung der Terminals als Relais für kleinere Terminals ermöglicht.

Die enge Kopplung aller drei Protokollschichten erlaubt es eine deutliche geringere Scheduling-latency zu erreichen.

#### 2.1.3.3 AP 1330: Entwicklung und Implementierung QoS Rev #2

Ziel von AP 1330 war die Umsetzung des in AP 1220 spezifizierten Systems, sowie die enge Integration mit dem Ressourcenmanagement der PHY- und MAC-Schichten. In Abstimmung mit den Partnern IIS und IKN wurde frühzeitig festgelegt, dass eine tiefgreifende Integration in einen gemeinsamen Prozessraum die beste Effizienz sowohl zur Entwicklungs-, als auch zur Laufzeit bietet. Dadurch stand für alle Partner eine weitgehende Restrukturierung der bestehenden Implementierung an.

Seitens IKS wurde diese Restrukturierung genutzt, um eine weitere Zielplattform abzudecken: den OmNET++ Netzwerksimulator. Im MoSaKa-Projekt, sowie in Rev. #1 hatte sich herausgestellt, dass das Fehlen einer simulierten Umgebung mit kompletter Kontrolle über das Zeitverhalten der Implementierung Fehlersuche und wissenschaftliche Messungen erheblich erschwert. Durch die in Rev. #2 entwickelte Anbindung an OmNET++ konnte dieser Mangel behoben werden. Alle drei bestehenden Zielplattformen (KASYMOSA-Terminal, KASYMOSA-Emulator und OmNET++) können aus ein und derselben Codebasis bedient werden. Sämtliche algorithmisch relevanten Teile des Systems sind auf allen Plattformen gleich. Lediglich die Anbindung an die zugrundeliegende Laufzeitumgebung musste mehrfach entwickelt werden.

Die Integration der Codeteile aller Partner in eine gemeinsame Basis stellte eine besondere Herausforderung dar. IKS stellte den dafür notwendigen Rahmen in Form von Quellcode-Repositories und Build-Umgebungen bereit. Die Partner IIS und IKN nahmen die notwendigen Anpassungen an ihren Systemteilen vor. Als Resultat steht das KASYMOSA-Ressourcenmanagement in seiner jeweils aktuellsten Fassung über die gleichen Softwarequellen, wie die Emulatorumgebung zur Verfügung. Die kontinuierliche Integration in einer gemeinsamen Codebasis gewährleistet ein erfolgreiches Zusammenspiel der einzelnen Teile, das bei getrennter Entwicklung wesentlich schwieriger umzusetzen wäre. Der Wegfall von bisher notwendigen Prozessübergängen vereinfacht die Systemstruktur erheblich und steigert die Laufzeiteffizienz.

#### 2.1.3.4 AP 1340: Entwicklung digitale optische Schnittstelle IDU

In diesem Arbeitspaket wurde das im AP1230 entwickelte Protokoll implementiert und getestet. Dazu wurden die benötigten Hardwarekomponenten in Betrieb genommen und die Gegenstellen auf Software- und Hardwareseite implementiert.

Weiterhin wurden die logischen Datenkanäle für die Sende- (zum FPGA) und Empfangsdaten implementiert, sowie die zusätzlichen Datenkanäle für Control und Monitoring.

Weiterhin wurde die FPGA-basierte Datenverarbeitung an die neuen Daten-Schnittstellen angeschlossen und die Programmierung des neuen 2-Kanal-Transceivers und die Datenkommunikation zwischen Softwareteil im PC und FPGA über Netzwerk integriert.

Im Softwareteil des Physical Layers wurde die neue Anbindung an die FPGA- Datenverarbeitung integriert und verifiziert. Das Monitoring und Control des TX wurde auf die neue Hardware angepasst und in die neue Schnittstelle zwischen Software und Hardware integriert. Die logischen Datenkanäle wurden hierbei für jeden Pfad einzeln und unterschiedlich konfiguriert, einerseits nach Richtung und andererseits nach erwarteter Datenrate und Echtzeitanforderungen.



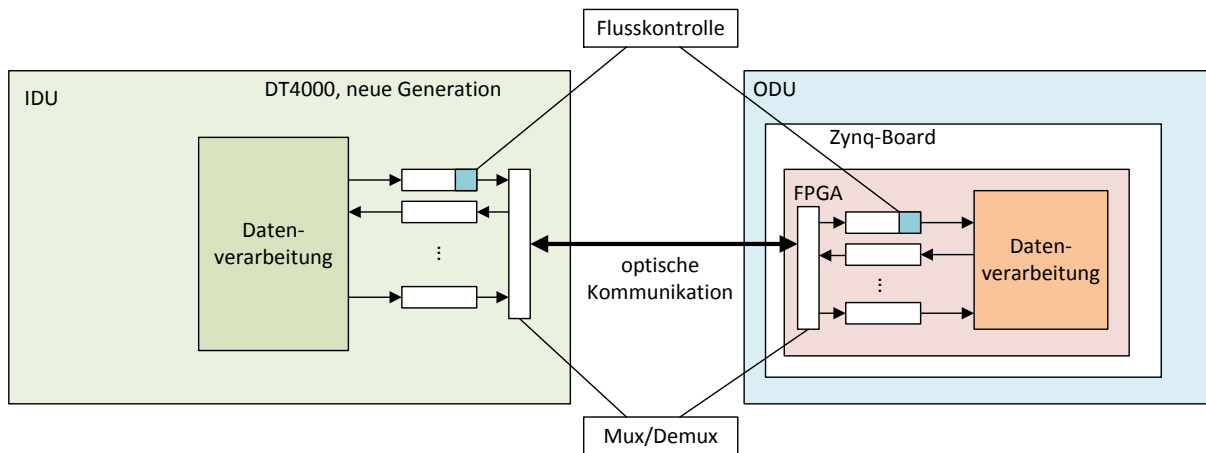


Abbildung 13: Schnittstelle und Datenfluss zwischen IDU und ODU

## 2.1.4 AP1400 – Applikationsentwicklung

Die unter der Kategorie „Applikationsentwicklung“ befindlichen Arbeitspakete setzten ihren grundsätzlichen Schwerpunkt auf die Entwicklung bzw. Weiterentwicklung von Anwendungen im Segment des Krisen und Katastrophenschutzes. Hierbei wurden zum einen nutzerspezifische Funktionserweiterungen zur besseren operativen Unterstützung im Einsatz realisiert. Zum anderen wurde eine höhere Dienstbringungsqualität von bereits existierenden Services durch ein intelligentes auf dem Ka-Band basierendes Ressourcenmanagement und QoS-Unterstützung erreicht. Neben den expliziten Erweiterungen und Entwicklungen standen auch Testinstanzen im Fokus mit denen sich Aussagen zu Verhalten und Performance unter Einflussnahme eines Ka-Band gestützten Ressourcenmanagements und QoS treffen ließen.

### 2.1.4.1 AP 1410: Definition Anforderungen Demo-Applikationen mit KASYMOSA-QoS

Als Spezifikation der Schnittstelle wurde sich auf „The KASYMOSA QoS Signaling Protocol“ Markus Brückner vom 03.12.2015 gestützt.

Zusätzlich zur Spezifikation wurden die Beschreibung und Abhängigkeiten der Datenformate mit Protobuf-Definitionen durch die TU Ilmenau bereitgestellt. Für die automatische Generierung dieser Anteile wurde das maven-protoc-plugin von com.google.protobuf.tools eingesetzt.

Um die Übersichtlichkeit zu verbessern und redundanten Code zu vermeiden wurde das Projekt in mehrere Subprojekte unterteilt.

Das Subprojekt **KASYMOSA-protobuf-schema** beinhaltet die proto-Dateien und erzeugt aus diesen die entsprechenden Java-Klassen, welche zum Lesen und Schreiben der Daten mit dem Protobuf-API benötigt werden. Es bildet somit die Basis der Schnittstelle.

```

└─ kasymosa-protobuf-schema [kasymosa master]
  └─ src/main/java
    └─ KASYMOSA.Protobuf
      ├── Dependencies.java
      └─ PathOuterClass.java
    └─ KASYMOSA.Protobuf.Signaling
      └─ Signalingmessages.java
  └─ src/main/resources
    ├── dependencies.proto
    ├── path.proto
    └─ signalingmessages.proto
  
```

Abbildung 14: KASYMOSA-protobuf-schema Projektstruktur

Das Subprojekt **KASYMOSA-client-api** beinhaltet die eigentliche IABG-Schnittstelle für KASYMOSA. Dieses Subprojekt wurde als Maven-Artefakt in die zu integrierenden Service- und Applikations- Projekte eingebunden, welche an das KASYMOSA-System angebunden wurden. Es enthält somit Klassen welche den Zugriff auf die KASYMOSA-Protobuf-Objektstrukturen vereinfachen und steuern sollen, sowie Klassen, welche die Kommunikation auf der Netzwerkebene abhandeln. Pfade können Beispielsweise über eine entsprechende Schnittstelle (gemäß Observer-Pattern) auf Ihren Zustand überwacht werden.

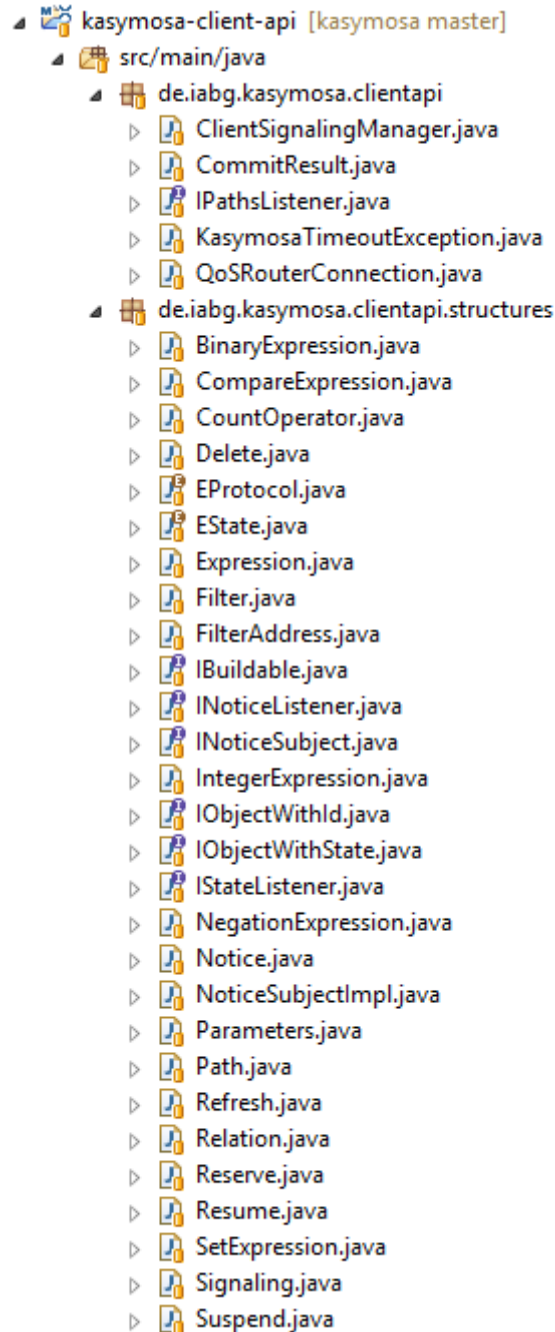


Abbildung 15: kasymosa-client-api Struktur

Das Subprojekt **kasymosa-demo-application** stellte eine erste Demo-Applikation bereit, welche auf einem KASYMOSA-Router zwei Pfade reservierte und anschließend deren Status überwachte. Das Programm wurde als Kommandozeilen-Applikation ohne eigene Oberfläche ausgeführt.

Das bereits erwähnte **kasymosa-router** Subprojekt stellte einen Dummyrouter zur Verfügung, welcher auf eingehende KASYMOSA-Nachrichten lauscht und diese mit entsprechenden Antworten quittiert. Außerdem verfügt das Programm über eine Oberfläche welche die reservierten Pfade anzeigt und die Möglichkeit bietet den Zustand der Pfade zu ändern (Suspend/Resume). Der Router wurde auch bei weiteren Implementierungen zu initialen Funktionstests eingesetzt.

#### 2.1.4.2 AP 1420: Entwicklung von einfachen Testapplikation

Im Rahmen der Implementierung der KASYMOSA-QoS-Signaling Spezifikation und deren Integration in bestehende Anwendungen entstanden eine Reihe von Testanwendungen, welche stets im Fokus standen sich zum genannten Protokoll konform zu verhalten. Diese Anwendungen reichten von einfachen texteingabebasierten Testprogrammen bis hin zu Streaming-Anwendungen welche im Rahmen einer Demonstration Anwendung fand und im folgenden Abschnitt näher erläutert wird.

Um die Reservierung von Pfaden sowie die Datenübertragung mit verschiedenen Datenraten unter Beachtung der aktuell verfügbaren Übertragungsrate zu veranschaulichen wurde ein Bildschirmübertragungssystem auf UDP-Basis entwickelt. Ziel war es, dabei die Bildqualität (Auflösung und Kompressionsverfahren) dynamisch an die zur Verfügung stehende Datenübertragungsrate anzupassen.

Das System gliedert sich in zwei Bestandteile – einen Sender und einen Empfänger. Der Sender übernimmt die Rolle des Clients, reserviert Pfade, erzeugt Screenshots und sendet diese als UDP-Pakete an den Empfänger. Der Empfänger erzeugt aus den empfangenen UDP-Paketen Bilder, welche dann zur Anzeige gebracht werden. Zusätzlich wurde noch ein Dummy-Router entwickelt, über den die Pfadreservierung mittels KASYMOSA-Protokoll getestet, sowie der Status der Pfade manipuliert werden kann.

#### ScreenPresentation-Sender

Der Sender verfügt über eine Oberfläche, in welcher die Netzwerk- und Capturing-Einstellungen festgelegt werden können. Die Einstellungen werden automatisch gespeichert und beim Start des Programms ebenfalls automatisch geladen.

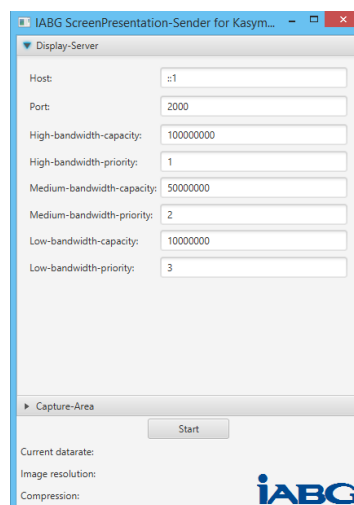


Abbildung 16: ScreenPresentation-Sender

Es werden drei Pfade mit frei einstellbarer Datenübertragungsrate (Bits/s) und Priorität konfiguriert. Der Port, auf dem die UDP-Pakete an den Empfänger geschickt werden, ist wie die IPv6-Adresse des Empfängers ebenfalls frei einstellbar.

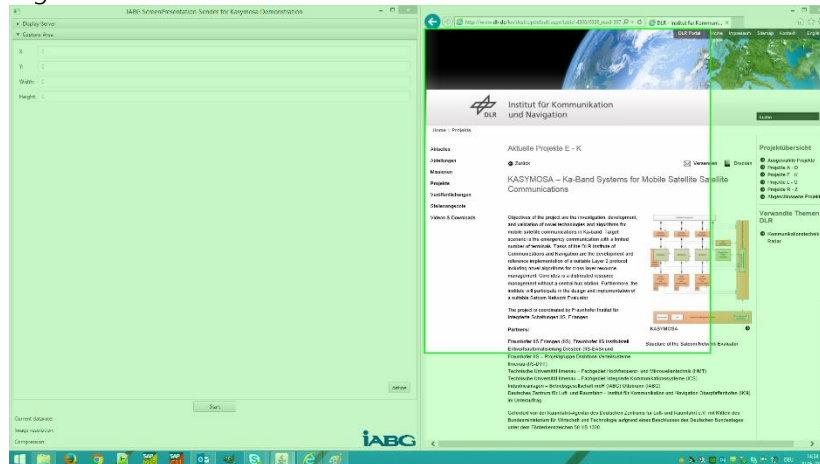


Abbildung 17: Screen area selection

Die Auswahl des zu sendenden Bildschirmbereichs erfolgt über eine Oberfläche welche der Auswahl von Microsofts Snipping-Tool nachempfunden ist. Wird im Reiter „Capture Area“ auf den Button „define“ geklickt so wird der Bildschirm mit einer teiltransparenten grünen Fläche überlagert. Anschließend ist es möglich, mit der Maus (press and drag) einen Bereich zu selektieren.

Über den Button „Start“ wird der Prozess der Pfadreservierung sowie der anschließenden Bildübertragung gestartet. Nachdem die Pfade erfolgreich reserviert wurden wird die kontinuierliche Bildübertragung gestartet. Die Bildübertragung erfolgt in Einzelbildern welche entweder mit JPEG oder PNG komprimiert wurden. Die Auflösung ist variabel und wird wie auch die Kompressionsart dynamisch an die zur Verfügung stehende Datenübertragungsrate angepasst.

### Protokoll

Da das ScreenPresentation mit Einzelbildern arbeitet und diese Bilder auch komprimiert noch größer sind als die Kapazität eines UDP-Pakets müssen die einzelnen Segmente in einer Art übertragen werden, die es ermöglicht die einzelnen Segmente nach dem Empfang wieder zu kompletten Bildern zusammen zu setzen. Um diese Möglichkeit zu schaffen enthält jedes UDP-Paket einen Segment-Information-Header. Die Paketgröße wurde auf 1500 Bytes limitiert um eine Überschreitung der maximalen MTU-Size zu vermeiden



ImageID	Start bei 0, inkrementell, identifiziert das Bild
SegmentID	Start bei 0 (für jedes Bild), inkrementell, identifiziert das Segment. Das jeweils letzte Segment eines Images wird durch die SegmentID „-1“ markiert.
ImageData	Abschnitt der Bilddaten

Tabelle 2: Screenpresentation Protokoll Anteile.

### ImageVisualization-Server

Der Empfänger setzt die empfangenen UDP-Pakete zu vollständigen Bilddaten zusammen und bringt visualisiert diese unter Beachtung des originalen Seitenverhältnisses. Die Eingabe des Ports erfolgt über ein Textfeld. Der Port wird automatisch gespeichert sowie im Empfängerteil aktualisiert. Beim Start der Software wird die letzte Porteinstellung automatisch geladen.



Abbildung 18: ImageVisualization-Receiver

### KASYMOSA Dummy-Router

Der Dummy-Router stellt eine einfache Gegenstelle zum Testen der Anwendung dar. Er ist dem Verhalten eines KASYMOSA-Routers nachempfunden, unterstützt die Funktionen jedoch nicht in vollen Umfang. Es können Pfadreservierungen vorgenommen und der Status der Pfade beeinflusst werden (Active/Suspended).

Id	State	Source	Destination	Datarate	Priority	CollisionPolicy	Lifetime	Pro
91c22d97-9bd9-408b-804a-486fc...	SUSPENDED	:62419	:2000	100000000	1	REJECT	0	UDP
f0d258b4-0b50-42f4-a78a-8af492...	SUSPENDED	:62419	:2000	50000000	2	REJECT	0	UDP
33599bb1-8a55-497f-b91a-ea6dd...	ACTIVE	:62419	:2000	10000000	3	REJECT	0	UDP

Abbildung 19: DummyRouter

## Demonstration mit verringerter Datenübertragungsrate

Um zu demonstrieren wie sich eine verringerte Datenübertragungsrate auf das Verhalten der Demonstrationsprogramme auswirkt, wurden im Dummy-Router die zwei Pfade mit der höchsten Datenübertragungsrate abgeschaltet (siehe Abbildung 19).

Der Sender erhält daraufhin Suspend-Nachrichten für diese Pfade und schaltet auf die kleinste reservierte Datenübertragungsrate um. Da eine Bildübertragung in der bestmöglichen Qualität nun nicht mehr möglich ist, wird zuerst das Kompressionsverfahren vom verlustfreien PNG auf das verlustbehaftete JPEG-Verfahren umgestellt. Nachdem jedoch mit diesem Verfahren die Zielbildrate von 25Hz unter Einhaltung der zugesicherten Datenübertragungsrate nicht erreicht werden kann, wird zusätzlich noch die Auflösung angepasst.

Die vom Empfänger visualisierten Bilder weisen nun deutlich sichtbare Qualitätseinbußen auf. Insbesondere scharf abgegrenzte Strukturen wie Linien und Texte sind nun nicht mehr gut erkennbar oder weisen Pixeleffekte auf.

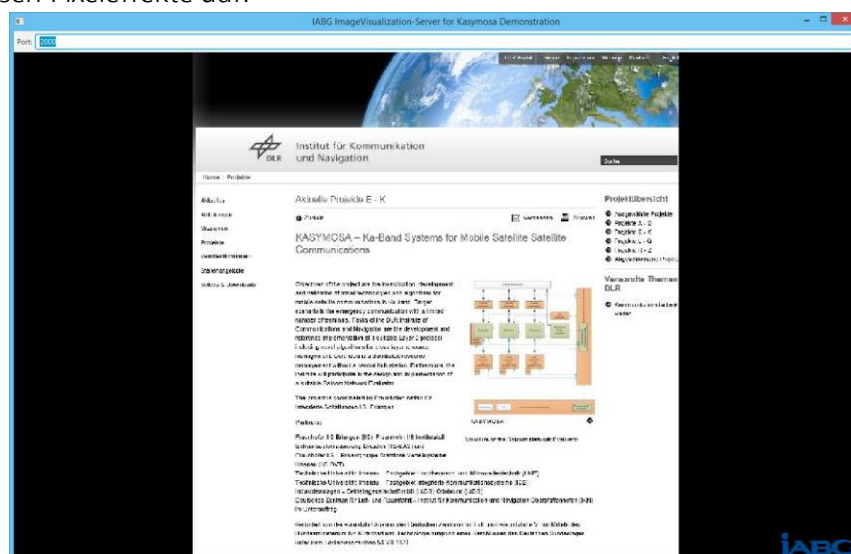


Abbildung 20: ImageVisualization Results

Da sich die hier beschriebene ScreenPresentation Testanwendung hervorragend eignete das Handling mit dem Protokoll und dessen Auswirkungen hinsichtlich Ressourcenmanagements, Pfadreservierungen sowie Relationen unter den Pfaden zu demonstrieren, wurde diese Anwendung zu Integrationszwecken allen interessierten Konsortiumsteilnehmern inklusive Quellcode zur Verfügung gestellt.

### 2.1.4.3 AP 1430: Erweiterung der KASYMOSA-Demoapplikationen

Bei der Erweiterung um einen Service Protokollierung wird ein Logging Mechanismus benötigt, der im Rahmen der IT-Sicherheitsanforderungen bezüglich einer ganzen SOAP Message und der Informationsobjekte folgende Anforderungen abdeckt:

- Dokumentation der Aktivitäten durch Datenaufzeichnung und Datenarchivierung;
- Analyse des Informationsaustauschs nach operativen Gesichtspunkten bzw. Einstufungsgesichtspunkten;
- Analyse des Informationsaustauschs nach technischen, betrieblichen und sicherheitstechnischen Gesichtspunkten.

Die Aufgabe dieses Logging Mechanismus besteht aus:

- einer zentralen und dezentralen Ereignisprotokollierung (bestehend aus der Datenaufzeichnung und einem spezifischen Logging),



- einer Ereignisanzeige über den RuDi-Explorer (und RuDi-Test-Explorer),
- sowie eine Bereitstellung von entsprechenden Verwaltungsfunktionen:
  - die Ereignisprotokolle zu löschen bzw. zu speichern,
  - die Ereignisprotokollierung einzustellen (z. B. ein- und ausschalten),
  - die Ereignisprotokollierung und Ereignisanzeige zu konfigurieren.

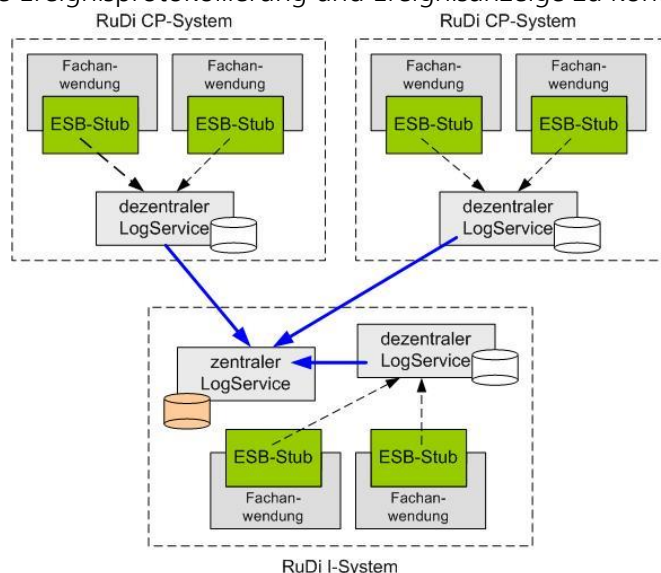


Abbildung 21: Übersicht der Logging Service Architektur

In der hier gezeigten Abbildung ist das Prinzip der Architektur für den LogService dargestellt. Der Logging Service besteht aus einem dezentralen und aus einem zentralen Anteil. Der dezentrale Anteil erhält über die ESB-Stubs die Messages, legt diese dezentral im Speicher ab und sendet die Messages in Abhängigkeit der Auslastung an den zentralen Anteil.

Der für KASYMOSA und somit auch in der Referenzumgebung Dienste umgesetzte Logging Mechanismus basiert auf dem Talend Service Activity Monitoring (SAM). Dabei sendet während der Servicenutzung der SAM-Agent – integriert in den ESB-Stub (Karaf/OSGi Container) – Logging (Trace) Messages an den SAM Monitor Service, der ein Bestandteil der SOA-(ESB-) Infrastruktur (I-System) ist.

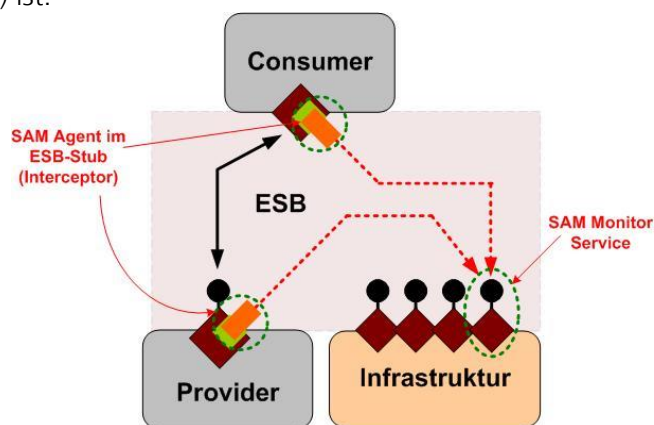


Abbildung 22: SAM-Architektur in RuDi (ESB-Stub & Infrastruktur)

Der SAM Monitor Service empfängt die Logging (Trace) Message und legt diese in einer Datenbank ab.

Das Resultat des Loggings wird im ServiceRegistryExplorer tabellarisch festgehalten. Hierbei werden eine ID und ein Zeitstempel vergeben. Über den Event Type wird festgehalten ob es sich grundsätzlich um einen Request oder Response Event handelt und ob dieser eingehend oder ausgehend vom jeweiligen System erfolgte. Durch Selektion des jeweiligen Eintrags kann die ein- oder ausgehende SOAP Nachricht angezeigt werden.

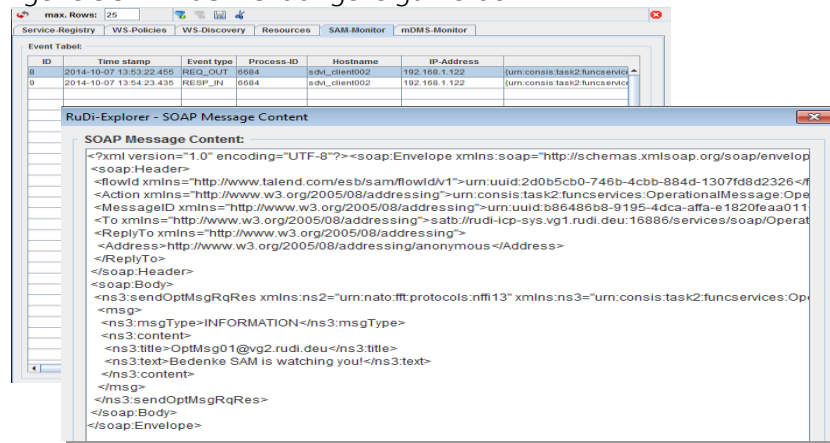


Abbildung 23: Protokolierte REQ-OUT SOAP Message

#### 2.1.4.4 AP 1440: Anpassung bestehender Applikationen an KASYMOSA-QoS

Als Ausgangspunkt für die Erweiterung der RuDi-Services um KASYMOSA-QoS Funktionalitäten betrachteten wir die Nutzung verschiedener Dienste über eine Satellitenstrecke. Jeder Dienst kann hierbei unterschiedliche Anforderungen bezüglich seiner Quality of Service (QoS) an eine Satellitenübertragung haben und zusätzlich auch mit unterschiedlichen Prioritäten versehen sein. Für ein solches Szenario musste Rudi um die Fähigkeit einer Servicenutzung in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden QoS des Transportlinks erweitert werden. Hierbei wurden auch Elemente von Serviceverhalten innerhalb eines unterbrochenen Netzwerks herangezogen, da sich bei einer nicht verfügbaren aber geforderten QoS ein Service ähnlich verhält wie bei einem unterbrochenen Netzwerk.

Die Anpassung und Integration der neu erstellten KASYMOSA-API ist in erster Linie analog zur Umsetzung des MoSaKa-QoS zu betrachten, welches am 24.09.2014 erfolgreich demonstriert werden konnte.

Es ist innerhalb der Servicekommunikation via Satellit mit Verzögerungen und Unterbrechungen zu rechnen, auf welche die jeweilige Anwendung zu reagieren hat. In Abbildung 24 wird skizziert, wie der Aufbau der Systemumgebung im KASYMOSA Kontext zur Nutzung von Services innerhalb der Evaluationsumgebung konzipiert wurde und welche Dienste dafür vorgesehen wurden.

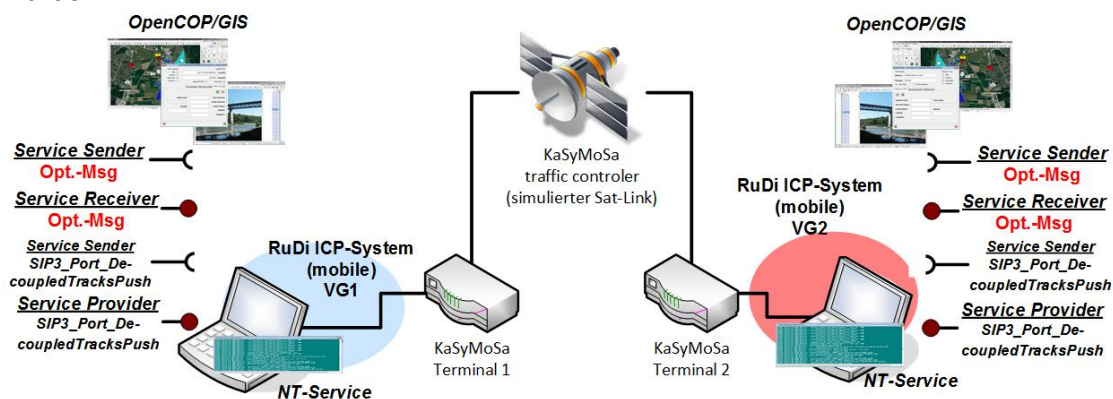


Abbildung 24: Szenario Servicenutzung via Satellitenlink

Im Vergleich zur vorangegangenen Realisierung bei MoSaKa fällt auf, dass die QoS-Dispatcher-Instanzen entfallen und somit die Anwendungssysteme direkt mit den Terminals über das KASYMOSA-QoS Signaling Protocol kommunizieren. Als Schnittstelle wurde die bereits in den Testanwendungen entwickelte und erprobte API als Maven Bundle in den NT-Service integriert. Der interessante Teil einer Service-Nutzung mit Quality of Service (QoS)-Parameter ist auf der Service-Consumer Seite, weil es hier darum geht, die angeforderten und benötigten Quality of Service (QoS)-Parameter zu prüfen und zu reservieren. Sowohl für den Service Request als auch für den Service Response sollte der Service Consumer die QoS Parametrierung übernehmen. Dies gilt auch für das klassische Service-Kommunikationspattern, der One-Way-Messages.

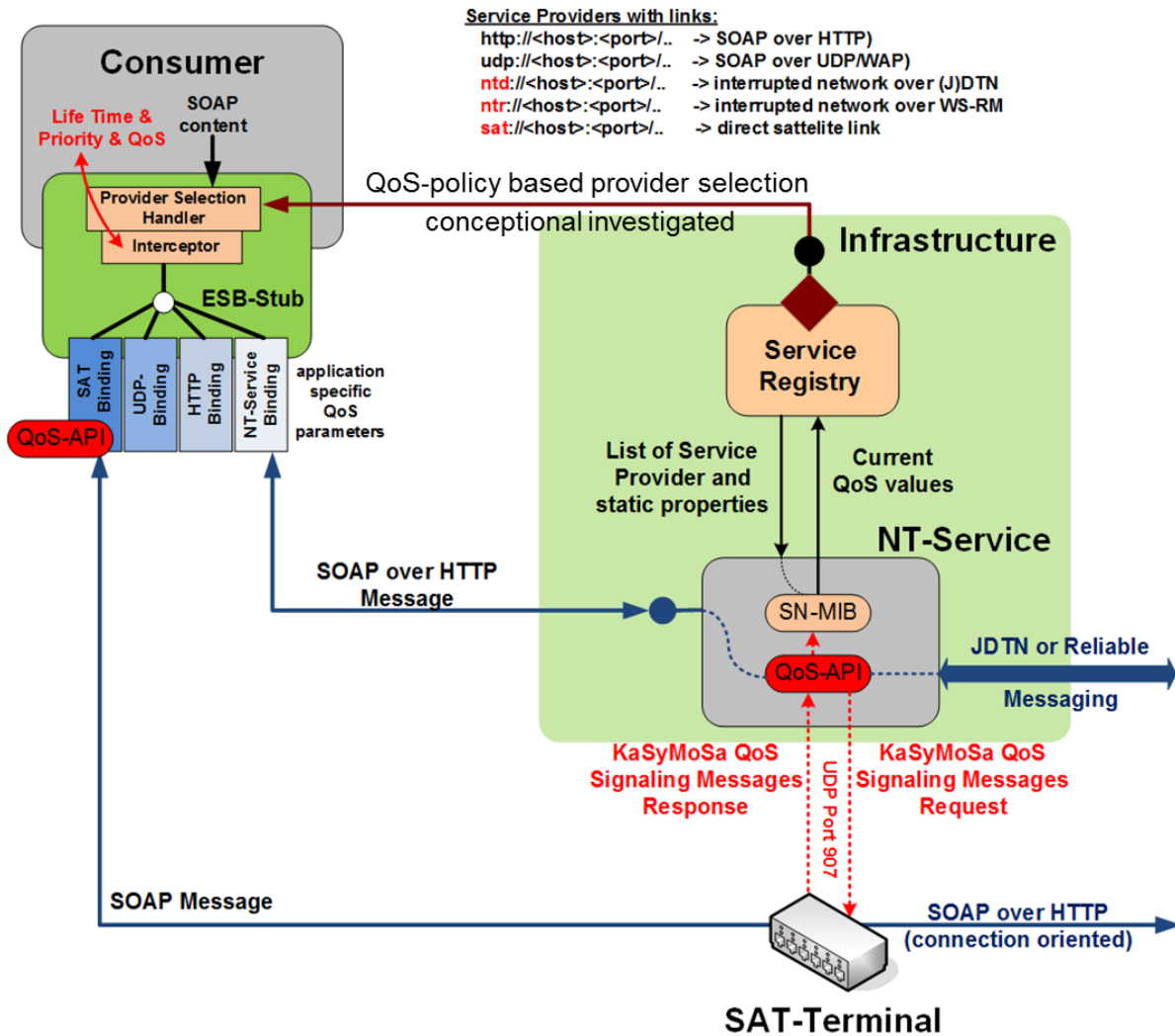


Abbildung 25: Servicenutzung mit QoS settings

Im Falle einer Service Nutzung über einen Satellitenlink operiert der NT-Service über ein hardware-spezifisches Interface-Plugin. In der Abbildung 25 ist hier die Rede von der sogenannten QoS-API. Über diese Schnittstelle agiert der NT-Service als Initiator, um Ressourcen aus dem Netzwerk anzufragen. Der NT-Service ist somit der „Owner“ des angefragten Pfades und wird über jegliche Änderungen dieser Ressource informiert. Hierbei kann der NT-Service auch als Initiator für mehrere Ressourcenanfragen auftreten. Die aktuell verfügbaren QoS-Parameter vom Satellitenterminal werden für interne Verwaltungsprozesse mit den Informationen in der Service Network Management Information Base (SN-MIB) gespeichert und abgeglichen. Eine über Poli-

cies gesteuerte automatisierte Selektion des Providers anhand dessen QoS-Parameter wurde konzeptionell beleuchtet, aber im Rahmen der KASYMOSA-QoS-Signaling-integration nicht umgesetzt.

Bei der Servicenutzung innerhalb unterbrochener Netzwerke über den NT-Service (protocol link: `nt://<host>:<port>/...`) sollte die Consumerapplikation asynchrone (none-blocking) Übertragungen von Oneway Notifications unterstützen. Hierbei schickt der RuDi-Binding-Interceptor die SOAP-Nachrichten mit der Headererweiterung über http an den NT-Service. Der NT-Service hingegen legt diese SOAP-Nachricht intern ab. In Abhängigkeit eines verfügbaren QoS-Parameter versendet der NT-Service diese SOAP Nachricht an den NT-Service derselben Domäne wie der gewünschte Service-Provider.

Wenn der NT-Service auf Basis der angeforderten QoS-Parameter die benötigten Ressourcen reservieren kann, verschickt er die SOAP Nachricht auf WS Reliable Messaging Basis über die Satellitenstrecke (connectionless) an den anderen NT-Service. Der NT-Service wird bei einer Ablehnung der angeforderten Ressourcen bis zum Ende der Lebenszeit der SOAP Nachricht immer wieder neue Übertragungsversuche starten. Bei unterschiedlichen Prioritäten von SOAP Nachrichten innerhalb des NT-Servicespeichers wird die weitere Übertragung jeder einzelnen SOAP-Nachricht in Abhängigkeit ihrer Priorität behandelt.

Für gewöhnlich besitzt ein Sender keine übergreifende Funktionalität zur Bestätigung einer Übertragung an einen Empfänger. Diese Überprüfung muss von der Anwendung selbst übernommen werden (Unterstützung von asynchronen, non-blocking und oneway-Nachrichten).

Sowohl der sendende als auch der empfangende NT-Service beinhalten die WebService-Schnittstelle des Reliable-Messaging Service, welcher auf dem OASIS Standard wie im WSRM-WSDL beschrieben basiert. Der NT-Service empfängt eine SOAP-Nachricht von einem externen Service, welche Transportmetadaten enthält. Im Falle der KASYMOSA Realisierung kann es sich hierbei um eine SOAP Nachricht des OptMsgService oder des SIP3 Decoupled Req/Res Service handeln. Die sendende Instanz des NT-Service erstellt einen dynamischen Sende-Thread mit einem Bestätigungspost. Daraufhin nutzt der sendende NT-Service den Consumer-Anteil der RM Service-Schnittstelle zur Erzeugung der Transportsitzung mittels der Serviceoperation „CreateSequence()“ zum Kommunikationspartner NT-Service, welcher an dieser Stelle über den Provider-Anteil der Service Schnittstelle kontaktiert wird. Die empfangende NT-Service-Instanz erzeugt nach Erhalt der Anfrage einen dynamisch empfangenden Thread inkl. Empfangsport und sendet seine Antwort an den sendenden NT-Service zurück. Sobald die Antwort von der sendenden NT-Service Instanz empfangen wurde, beginnt dieser mit der Übertragung der Daten inkl. der SOAP Nachricht. Sobald der empfangende RM-Thread eine Sequenznummer der Fenstergröße empfängt, bestätigt er den Empfang dieser Datenblöcke. Sollte ein Datenblock fehlen, wird dieser Block vom NT-Service erneut gesendet. Wenn alle Datenblöcke verschickt sind und der sendende RM-Service auch alle Empfangsbestätigungen erhalten hat, signalisiert er über die Serviceoperation „TerminateSequence()“ das Ende der Übertragungssequenz. Die Empfänger NT-Service Instanz kann nun zum einen das Ende der Übertragung bestätigen und zum anderen die empfangene SOAP-Nachricht an den eigentlich adressierten Service weiterleiten. Für den Fall, dass der Ziel-Service nicht zur Verfügung steht, kann die Nachricht mit samt der Verbindungsmetadaten lokal gespeichert werden. Letztendlich wird jetzt auch der dynamische empfangende Thread beendet.

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht das beschriebene Kommunikationspattern. Es müssen somit zwei Pfade über die QoS-API reserviert werden. Bei der ersten Reservierung werden die Ressourcen des Reliable-Messaging Service Interface allokiert. Wohin gegen die zweite Pfad-anfrage der konkreten Datenübertragung des dynamischen Threads gilt. Der NT-Service selbst kann hierbei als HTTP-Proxy für SOAP-Nachrichten gesehen werden.

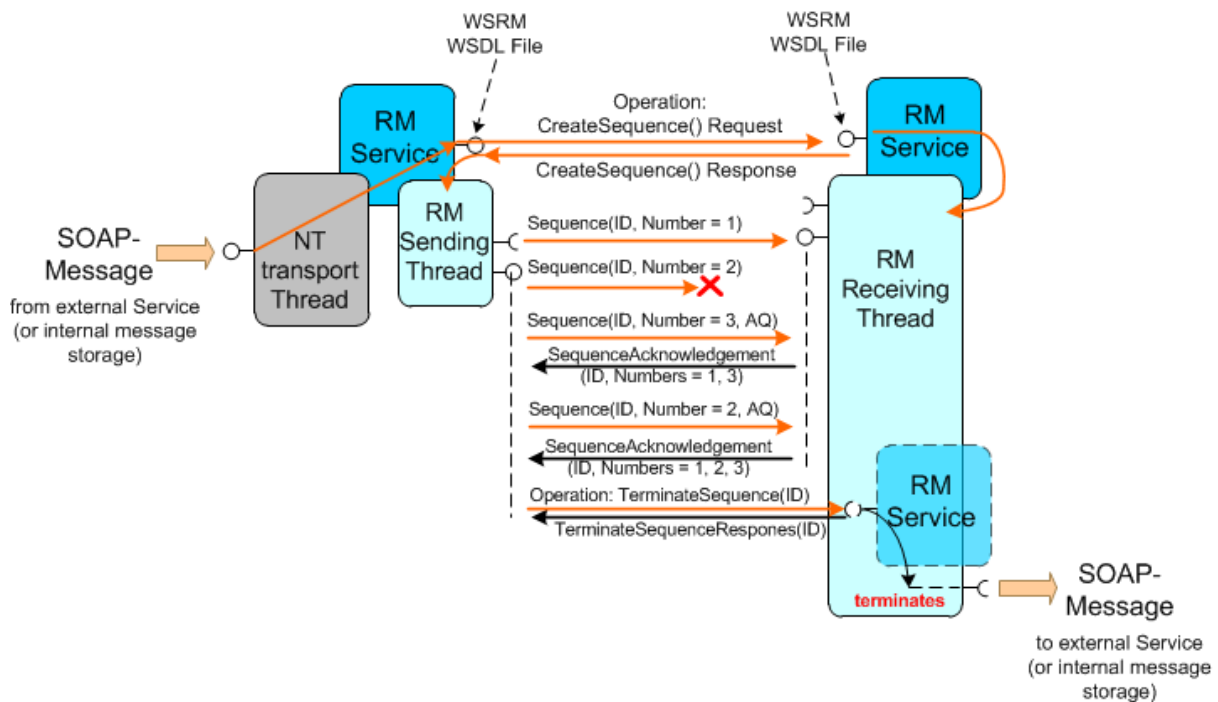


Abbildung 26: Reliable Messaging zwischen NT-Services

Bei einer fehlerhaften Reservierung einer QoS Anfrage oder einem Fehler bei der Übertragung bricht der RuDi-Binding-Interceptor die Servicenutzung mit einer „Connection refused“ Meldung ab. Wenn der RuDi-Binding-Interceptor den direkten Serviceaufruf abbricht, wird keine weitere Übertragung der verworfenen Nachricht eingeleitet.

### Demonstration Einsatzszenar

Dem Grundgedanken Organisationen Katastrophenschutzkräften wie dem THW, aber auch Feuerwehr oder Polizei im Falle einer Großschadenslage eine flexible und mobile Kommunikationsplattform zu bieten, wurde auch in der finalen Demonstration Rechnung getragen. Da insbesondere im Zusammenhang bei Katastrophenschutz im Ausland mit unterschiedlichen Infrastrukturen in den Einsatzgebieten zu rechnen ist, sofern diese überhaupt noch intakt ist, steht hier auch gewisser Autarkie Aspekt, welcher durch die Satellitenkommunikation erbracht werden kann, im Vordergrund.

Auch wenn das hierbei skizzierte Einsatzszenar nicht vollumfänglich in ein Storyboard eingebettet wurde, fanden sich alle wesentlichen Instanzen um die Funktionsfähigkeit nachzuweisen. Somit waren über drei Satellitenterminals die einzelnen Systeme angebunden um die Katastrophenschutzrelevanten Instanzen und Einsatzorte zu repräsentieren.

- Ein Heimatland, welches für die Logistik, Aufbereitung von Informationen oder auch den Einsatz-Review zuständig ist.
- Das Einsatzland mit der Aufgabe der Einsatzkoordination und Lageerstellung.
- Das Katastrophengebiet welches mit mobilen Kräften hinsichtlich Bedarfsermittlung, Soforthilfe und Aufklärung eingebunden wird.



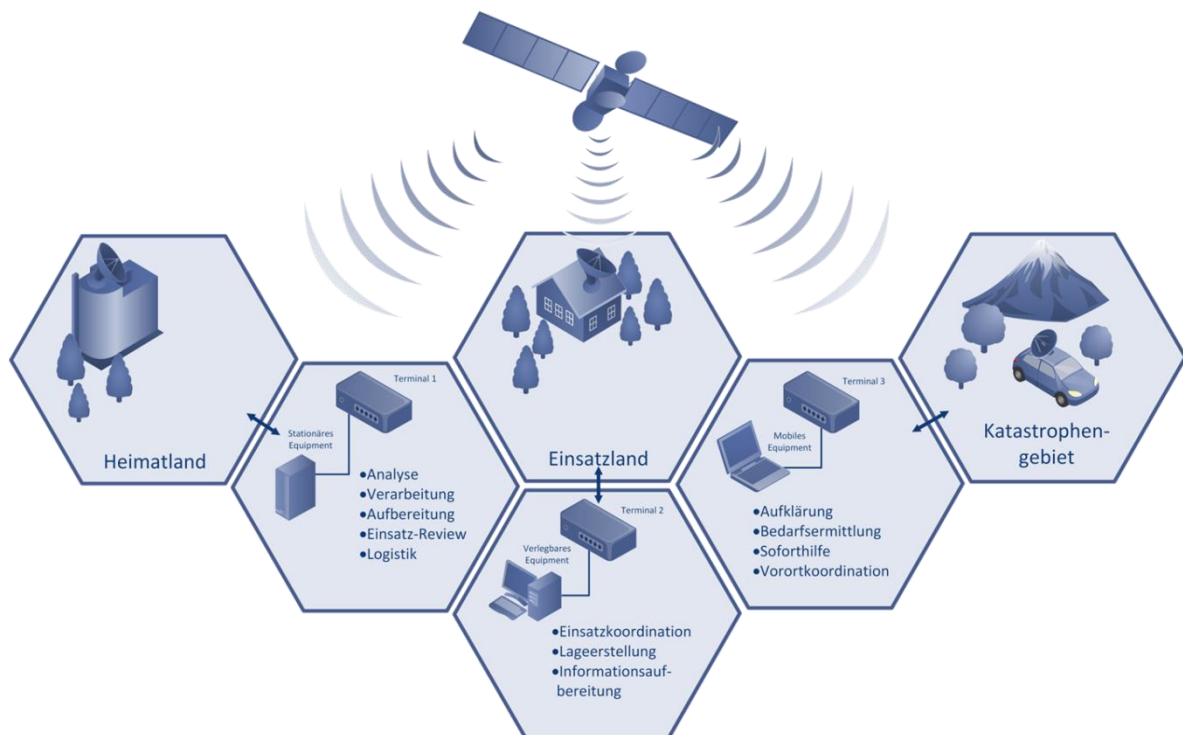


Abbildung 27: Demonstrationsszenar

Die hierfür vorgesehenen Anwendungen und Dienste wurden angepasst bzw. erweitert. Somit wurden der GPS und der NFFI-Service zur Positionsbestimmung der mobilen Einheit (PKW) verwendet. Das sowohl im Einsatzland befindliche System als auch das System im Heimatland konnten diese Daten für eine kartenbasierte Lagerstellung über den dafür reservierten QoS-Pfad in der GeoDatenViewer Anwendung konsumieren. Zusätzlich stand den beteiligten Instanzen mit dem Operational Message Service ein Dienst zur Koordination mittels Textmeldungen sowie Dateianhänge zur Verfügung.

### 2.1.5 AP2100 - Entwicklung High-Gain Antennentechnologien

Die Bearbeitung dieses Arbeitspakets teilt sich in die Fertigstellung und Charakterisierung einer Referenzimplementierung 1.0 der High-Gain Antenne und weiterführenden Untersuchungen zu verschiedenen Komponenten einer Referenzimplementierung 2.0 sowie deren Fertigstellung und Charakterisierung.

#### Referenzimplementierung 1.0 der HG-Antenne

Die Integration der High-Gain Antenne mit den benötigten Komponenten war bereits im Rahmen des Förderprojekts MoSaKa in einem fortgeschrittenen Stadium. Für die Verwendung der Antenne für das Terminal Rev.#1 wurden daher überwiegend Messungen zur Charakterisierung wichtiger Systemparameter durchgeführt. Beispielhaft seien an dieser Stelle die Messungen zum Phasenrauschen der Empfänger sowie Messreihen zur Generierung des Fehlervektors zu nennen. Das Phasenrauschen der Empfänger besitzt mit  $-92 \text{ dBc/Hz} @ 10 \text{ kHz}$  einen für die Anwendung in KASYMOSA ausreichend guten Wert. Für die Messung des Fehlervektors wurde vom künstlichen Satelliten der Versuchsanlage FORTE ein zirkular polarisiertes zeitharmonisches Signal bei 20 GHz ausgesendet, während die Antenne schrittweise um die optimale Ausrichtung in Elevation und Azimut verfahren wurde und gleichzeitig die Ausgangssignale des Phasendiskriminators



gemessen wurden. Die Ergebnisse für die Amplitude und den Winkel des ermittelten Fehlervektors sind als normierte Werte in Abbildung 28 dargestellt. Darin ist gut zu erkennen, dass der Fehlervektor ein Minimum in seiner Amplitude besitzt, wenn die Antenne optimal ausgerichtet ist bzw. wenn die Signalquelle außerhalb des Detektionsbereichs der nachführbaren Antenne liegt. Innerhalb des Detektionsbereichs ist die Amplitude des Fehlervektors ein Maß für die absolute Fehlerrichtung der Antenne, während der Winkel die Richtung der Fehlerrichtung angibt.

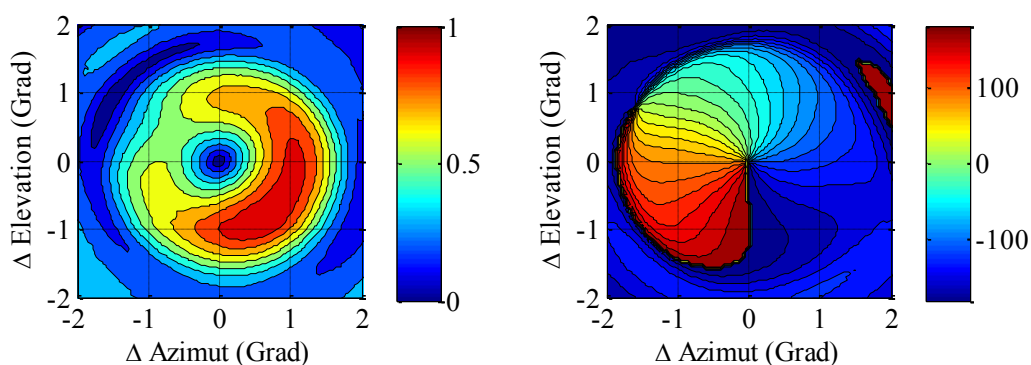


Abbildung 28: Gemessener Fehlervektor in Amplitude (links) und Winkel (rechts)

### Referenzimplementierung 2.0 der HG-Antenne

Die Referenzimplementierung 2.0 der HG-Antenne ist die Antenne, welche für das HG-Terminal Rev.#2 eingesetzt wird. Hierbei handelt es sich um einen neuen Entwurf einer kompakten Reflektorantenne mit zugehörigem Speisehorn und einem neuen  $TM_{01}$ -Monopuls Speisesystem.

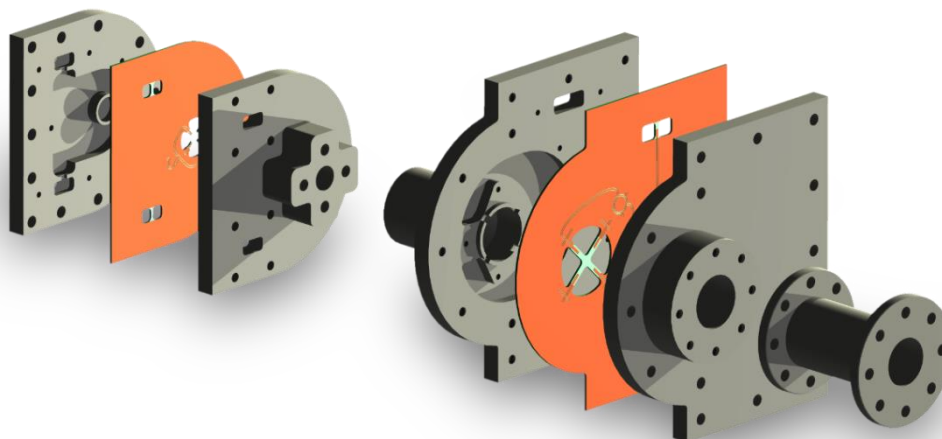


Abbildung 29: Explosionsdarstellung des PCB-basierten  $TM_{01}$  Modenkopplers für Sende- und Empfangsbetrieb im Ka-Band

Das im Rahmen von KASYMOSA entworfene und untersuchte Speisesystem für die HG-Antenne basiert auf planaren Strukturen auf Leiterplatten welche die benötigten Moden im Rundhohlleiter anregen. Dieser Ansatz ermöglicht sehr kompakte Übergänge zwischen mikrostreifenleitungsbasierter Signalführung und Hohlleiterübertragung. Perspektivisch lassen sich diese Übergänge insbesondere bei individuell entworfenen Signalumsetzern verlustarm und platz sparend

einsetzen. Der in Abbildung 29 dargestellte Monopuls-Koppler ermöglicht die Speisung des fundamentalen  $TE_{11}$ -Modes bei 20 GHz gemeinsam mit dem für die Nachführung benötigten  $TM_{01}$ -Mode an einer Position im Rundhohlleiter. Die Platine hierfür sowie das zugehörige Gehäuse sind im rechten vorderen Teil des Bildes zu sehen. Die Speisung des  $TE_{11}$ -Modes bei 30 GHz erfolgt im hinteren linken Teil des Kopplers. In beiden Frequenzbereichen können beide zirkulare Polarisationen gespeist werden.

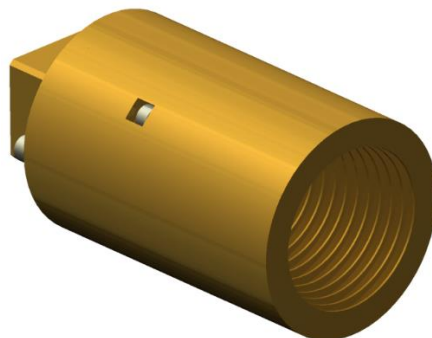


Abbildung 30: CAD-Modell des Rillenhorns mit den Abmessungen 47mm x 89 mm ( $\varnothing$  x L) passend zur 40 cm Cassegrain Antenne in Verbindung mit dem PCB-basierten Koppler

Für die Speisung der Parabolantenne wurde ein für die Verwendung mit dem PCB-basierten Modenkoppler ausgelegtes Rillenhorn entworfen und gefertigt. Das Horn weist einen Nebenkeulenabstand von 30 dB bei 20 GHz und 23 dB bei 30 GHz auf und ermöglicht eine sehr gute Fokussierung der Parabolantenne bei beiden Frequenzbereichen, da die Lage des Phasenzentrums über dem verwendeten Frequenzbereich nur um etwa 2 mm variiert. Abbildung 30 zeigt das CAD-Modell des Horns, welches innerhalb der Projektlaufzeit gefertigt wurde und für die Verwendung in Kombination mit dem PCB-basierten Modenkoppler zur Verfügung steht. Diese Speisekette ist zusätzlich auch für die Verwendung mit der 60 cm Cassegrain-Antenne des HG-Terminals Rev.#1 verwendbar und wurde während der Projektlaufzeit auch in diesen integriert.

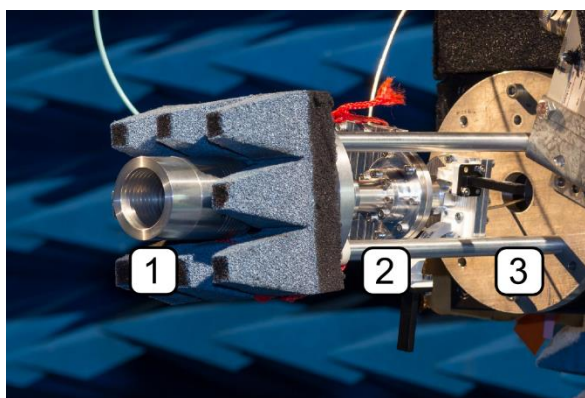


Abbildung 31: Messaufbau zur Charakterisierung des PCB-basierten Modenkopplers im Antennenmesslabor der TU Ilmenau. Der Messaufbau besteht aus einem Rillenhorn (1), dem Koppler (2) und einem Antennenpositionierer (3).

Im Empfangsfrequenzbereich von 19,7-20,2 GHz ist die Speisekette besser als -15 dB angepasst und erzielt eine Polarisationsentkopplung für beide zirkulare Polarisationen von mehr als 30 dB. Die gemessenen Verluste innerhalb der Speisekette belaufen sich auf weniger als 2,5 dB und werden durch die Verwendung von verlustbehaftetem Substratmaterial (Rogers RO4003C) her-

vorgerufen. Im Sendefrequenzbereich von 29,5-30 GHz liegt die Anpassung bei besser als -19 dB und die Polarisationsentkopplung beträgt mindestens 22 dB. Die Verluste in diesem Frequenzbereich liegen mit weniger als 3.3 dB etwas höher als im Empfangsfrequenzbereich. Eine Reduktion der Verluste ist zu erwarten, wenn die Umsetztechnik gemeinsam mit dem Koppler auf einem gemeinsamen Substrat aufgebaut wird, da hierbei auf einen Teil der gedruckten Leitungen sowie auf Rechteckhohlleiter-Übergänge verzichtet werden kann.

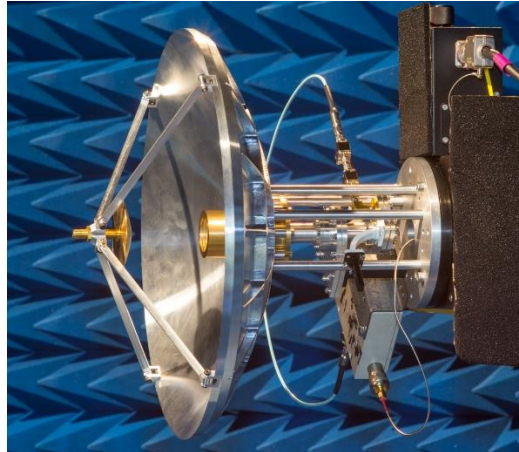


Abbildung 32: Messaufbau im Antennenmesslabor der TU Ilmenau zur Charakterisierung der 40 cm Parabolantenne, welche durch den PCB-basierten Modenkoppler gespeist wird.

Der für die Referenzimplementierung 2.0 verwendete Antennentyp basiert auf einer *displaced-axis* Cassegrain Antenne nach [35] mit einem Durchmesser von 40 cm. Dieser Antennentyp mit einem ringförmigen Fokus des Hauptreflektors bietet den Vorteil, dass der durch den Subreflektor abgeschattete Bereich nicht mit elektromagnetischen Feldkomponenten belegt wird und somit höhere Apertureffizienzen (hier ca. 69% / 57% bei 20 GHz / 30 GHz) erzielt werden können. Darüber hinaus verhindert dieser Aufbau Rückstreuungen vom Subreflektor in das Speisehorn, wodurch effektiv Fehlanpassungen vermieden werden. Abbildung 32 zeigt den Messaufbau für die Reflektorantenne zusammen mit dem PCB-basierten Multimode-Monopuls Speisesystem. Die dabei ermittelten Messergebnisse zu den Richtdiagrammen sind in Abbildung 33 und Abbildung 34 als beispielhafte Schnitte durch die weitgehend rotationssymmetrische Charakteristik dargestellt. Der Gesamtaufbau erreicht hierbei im Empfangsfrequenzbereich einen realisierten Gewinn von 33,3-34,4 dBi und eine Polarisationsentkopplung von mehr als 33 dB. Für den Sendefrequenzbereich werden Werte für den realisierten Gewinn von 35,1-36 dBi und eine XPD von mehr als 22 dB erreicht. Ausgehend von einer Rauschzahl des Empfängers von 1,5 dB wird ein G/T des Terminals von etwa 11-12 dB/K erreicht.

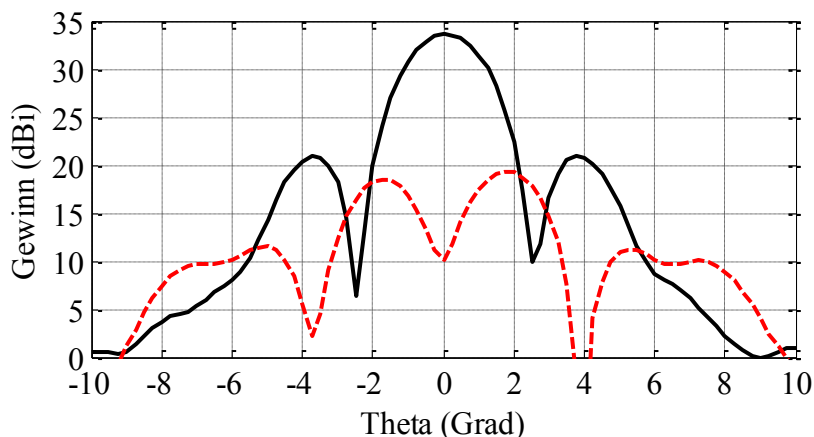


Abbildung 33: Richtdiagramme der 40 cm Parabolantenne für die Speisung im TE11 Mode mit LHCP (schwarz) und für die Speisung im TM01 Mode (rot gestrichelt) bei 20 GHz.

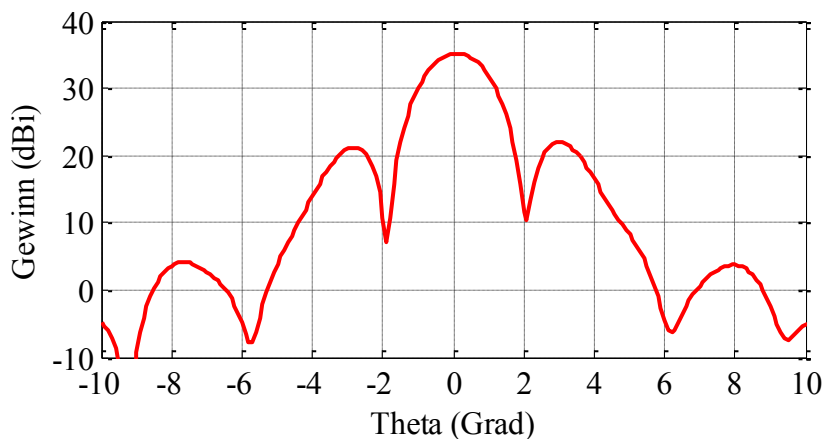


Abbildung 34: Richtdiagramme der 40 cm Parabolantenne für die Speisung mit RHCP bei 30 GHz.

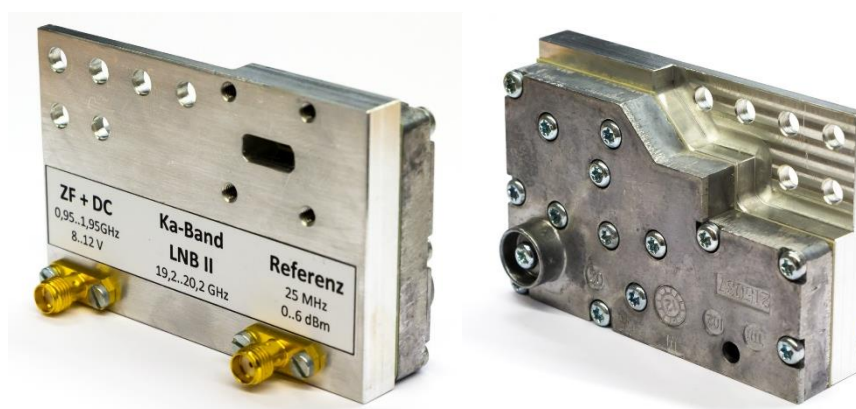


Abbildung 35: Kompaktes LNB Modul mit der Möglichkeit der Synchronisierung der Lokaloszillatoren bei 25 MHz

Im Bereich Front-End-Entwicklung wurde im Projekt ein für den modularen Einsatz mit skalierbarer Anzahl an Empfangspfaden verwendbares LNB-Modul aufgebaut. Hierbei handelt es sich um

den Empfangsumsetzer eines Ka-Band VSAT-Sendeempfängers von Global Invacom, welcher einzeln aufgebaut wurde und über eine Schnittstelle zur Synchronisation mit einem 25 MHz Signal erweitert wurde. Exemplarisch wurden hierfür zwei Module für die Verwendung im Multimode-Monopuls-Nachführsystem aufgebaut. Abbildung 35 zeigt die kompakten (17 mm x 49 mm x 73 mm) und leichten (116 g) Module. Die Empfangsmodule lassen sich sowohl für die HG-Antenne als auch für die LP-Antennenpaneele einsetzen, wobei die Empfänger prinzipiell auch direkt in die Paneele integriert werden können. Die wichtigsten technischen Daten sind in Tabelle 3 aufgelistet. Für den Sendepfad kommt die TX-Funktionalität der in Rev.#1 verwendeten Signalumsetzer von ViaSat zum Einsatz.

<b>ZF</b>	<b>950-1950 MHz</b>
<b>Rauschzahl</b>	1,5 dB
<b>Konversionsgewinn</b>	52 – 62 dB
<b>Spannungsversorgung</b>	8 – 12 VDC
<b>LO Referenz</b>	25 MHz

Tabelle 3: Technische Daten des LNB Moduls

## Untersuchungen zu Komponenten für mobile Hochgewinnantennen

Im Rahmen der Entwicklungen zur Referenzimplementierung 2.0 der HG-Antenne wurden über den Aufbau der 40 cm Cassegrain-Antenne mit zugehörigem Speisesystem und Signalumsetzern hinaus weitere Teilkomponenten untersucht, welche für den Aufbau von mobilen Satellitenterminals relevant sind.

Um auch bei Hochgewinnantennen eine Reduzierung der Aufbauhöhe zu erzielen wurden im Rahmen des Projekts die elektrodynamischen Eigenschaften von Parabolantennen mit elliptischer Apertur untersucht. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass diese Reflektorform besondere Ansprüche an die Dimensionierung der Speisekette stellt. Bei der Verwendung der Speisestrukturen, welche für die bestehenden HG-Antennen verwendet wird, ergeben sich Nachteile hinsichtlich der Apertureffizienz und der Polarisationsreinheit der Antenne. Das rotationsymmetrische Richtdiagramm des Speisehorns bewirkt unterschiedliche Feldbelegungen des Reflektors in der vertikalen und horizontalen Ebene, wodurch je nach Dimensionierung ein Überstrahlen in der schmalen Ebene oder eine zu geringe Ausleuchtung der breiten Ebene entsteht. Diese Eigenschaft erschwert die Maximierung der Apertureffizienz unter der Verwendung eines Rundhorns. Für eine bessere Ausleuchtung wäre an dieser Stelle die Verwendung einer Hornantenne mit elliptischem Querschnitt zu bevorzugen, da hierbei unterschiedliche und damit für den Reflektor passende Öffnungswinkel in der vertikalen und horizontalen Ebene realisierbar sind. Problematisch ist dabei, dass ein solches Horn unterschiedliche Ausbreitungskonstanten für vertikal und horizontal polarisierte Wellen besitzt und somit auch unterschiedliche Transmissionsphasen für diese beiden. Dadurch wird die zirkulare Polarisation, welche vom Modenkoppler erzeugt wird, unter Umständen stark verfälscht. Auch die Lage des Phasenzentrums kann bei einem ellipti-



schen Horn in den beiden Ebenen verschieden sein, wodurch eine Fokussierung der Parabolantenne für beide Schnittebenen verhindert wird.

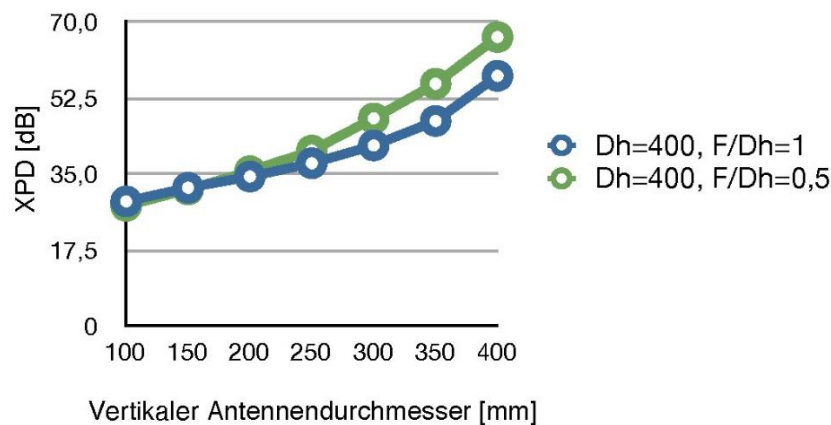


Abbildung 36: Polarisationsreinheit XPD einer elliptisch geformten Parabolantenne mit einem horizontalen Durchmesser von  $D_h = 400$  mm für verschiedene vertikale Durchmesser sowie zwei verschiedene Fokusslängen  $F$

Neben der Aperturreffizienz wird auch die Polarisationsreinheit in Abhängigkeit vom Achsenverhältnis der Apertur negativ beeinflusst. Abbildung 36 zeigt die Abhängigkeit der Polarisationsreinheit vom vertikalen Antennendurchmesser für einen festen horizontalen Durchmesser bei der Verwendung desselben runden Speisehorns. Hierbei zeigt sich eine deutliche Degradation der Polarisationsreinheit für große Achsenverhältnisse. Aufgrund dieser Eigenschaften wurde für die Referenzimplementierung 2.0 der HG-Antenne auf eine rotationssymmetrische Antenne mit geringerem Durchmesser im Vergleich zur Referenzimplementierung 1.0 gesetzt.

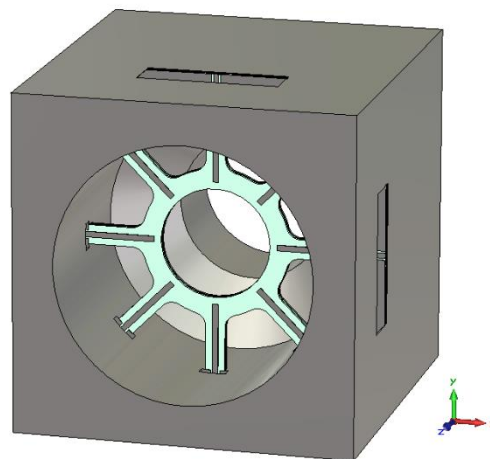


Abbildung 37: CST-Modell eines  $TE_{21}$ -Modenkopplers für den Frequenzbereich um 20 GHz

Zusätzlich zu alternativen Antennentypen wurde im Rahmen von KASYMOSA auch eine geänderte Speisestruktur entworfen und simulativ untersucht. Hierbei handelt es sich um einen  $TE_{21}$ -Modenkoppler, welcher in derselben Technologie aufgebaut ist wie der  $TM_{01}$ -Modenkoppler der Referenzimplementierung 2.0. Das Multimode-Monopuls-Verfahren auf Basis des  $TE_{21}$  Modes bietet eine etwas höhere Sensitivität bei der Messung des Fehlervektors und ermöglicht darüber hinaus eine Nachführung der Antenne auf linear sowie zirkular polarisierte Signalquellen, wäh-



rend beim  $TM_{01}$ -Multimode-Monopuls-Verfahren nur auf zirkular polarisierte Quellen nachgeführt werden kann [36]

Der Koppler ist in Abbildung 35 als CST-Simulationsmodell dargestellt und besteht aus einem Übergang von einem 11 mm- auf einen 19 mm-Rundhohlleiter sowie aus gedruckten Strukturen auf Rogers RO4003C Substratmaterial. Am 11 mm Rundhohlleiter-Anschluss kann ein Koppler angeschlossen werden, welcher duale zirkulare Polarisation im Sende- sowie im Empfangsfrequenzbereich erzeugt und an den 19 mm Rundhohlleiter kann ein Speisehorn zur Beleuchtung einer Reflektorantenne angeschlossen werden. Die Anregung des  $TE_{21}$  Modes in dualer Polarisation erfolgt über insgesamt acht Feldsonden, welche im Modell in Abbildung 35 zu sehen sind. Der  $TE_{21}$  Mode wird hierbei über vier Feldsonden angeregt, von denen gegenüberliegende Sondenpaare mit gleicher Phase angeregt werden, während orthogonal zueinander liegende Feldsonden mit einem Phasenversatz von  $180^\circ$  gespeist werden müssen. Um zirkulare Polarisation zu erzeugen, wird bei diesem Prinzip zusätzlich die zweite Ausprägung des  $TE_{21}$  Modes angeregt, welche um  $45^\circ$  verdreht zur ersten Ausprägung im Rundhohlleiter liegt. Aus diesem Grund besteht der Koppler aus zwei Gruppen von je vier Feldsonden, welche um  $45^\circ$  gedreht im Rundhohlleiter liegen. Das benötigte Speisetzwerk muss somit insgesamt acht Feldsonden mit jeweils passenden Phasenlagen zusammenführen und besitzt eine entsprechend hohe Komplexität, wodurch größere dielektrische Verluste ( $>4\text{dB}$ ) zu erwarten sind. Dadurch wird die Dynamik für die Nachführung beschränkt und die Vorteile gegenüber einem  $TM_{01}$  Multimode Monopuls Nachführsystem reduzieren sich. Darüber hinaus besteht durch den benötigten großen Hohlleiterdurchmesser, um bei 20 GHz den  $TE_{21}$  Mode anregen zu können, das Problem, dass bei 30 GHz bis zu 17 Hohlleitermoden ausbreitungsfähig sind und deren Anregung unterdrückt werden muss. Hierfür werden Modenwandler oder -sperrern benötigt, welche ebenfalls zur Komplexität und auch zu Verlusten beitragen und damit den technischen Aufwand weiter erhöhen. Insbesondere wenn die Möglichkeit, zusätzlich auch auf linear polarisierte Quellen nachzuführen zu können, nicht benötigt wird, ist der Einsatz eines einfacheren  $TM_{01}$ -Multimode-Monopuls-Systems ausreichend, weshalb im Rahmen von KASYMOSA auf die Fertigung eines  $TE_{21}$ -Multimode-Monopuls-Systems verzichtet wurde.

Des Weiteren wurden Untersuchungen zur Mehrband-Fähigkeit der HG-Antenne durchgeführt. Der Hauptfokus lag hierbei auf dem Entwurf einer Koppelstruktur zur Verwendung im Ku-Band, welche direkt an den bestehenden Ka-Band-Koppler angeschlossen werden kann. Für den Entwurf wurde ein Empfangsfrequenzband im Bereich um 12 GHz angestrebt, um die prinzipielle Mehrbandfähigkeit zu demonstrieren, da es im Ku-Band regionale Unterschiede für die konkreten Frequenzbereiche gibt. Für den Down-Link werden Frequenzbereiche von einer Breite von bis zu 0,5 GHz im Bereich von 11,45-12,75 GHz verwendet. Für den Up-Link wird der Frequenzbereich von 14-14,5 GHz genutzt. Der Koppler kann hierbei auch für andere Frequenzbereiche im Ku-Band skaliert werden. Das Simulationsmodell des Kopplers ist in Abbildung 38 zu sehen und besteht aus einem Übergang von einem 14 mm Rundhohlleiter zu einem 17,5 mm Rundhohlleiter (blau transparent) und vier auf Leiterkarte gedruckten Strukturen, welche in den Hohlleiterübergang hineinragen, und den zugehörigen Anschlüssen als Mikrostreifenleitung. Der 14 mm Rundhohlleiter-Anschluss entspricht dem Rundhohlleiter, welcher durch den bereits bestehenden Koppler gespeist wird, sodass der Ku-Band-Koppler zwischen dem Ka-Band-Koppler und der Hornantenne eingefügt werden kann.

Die Funktionsweise dieses Kopplers ist dem Prinzip des bestehenden Ka-Band-Kopplers ähnlich. Jeweils im Rundhohlleiter gegenüberliegende Paare von gedruckten Strukturen werden bei Einspeisung des  $TE_{11}$  Modes am 17,5 mm Rundhohlleiter mit einem Phasenversatz von  $180^\circ$  angeregt und teilen eingespeiste Signale jeweils zur Hälfte auf die beiden zugehörigen Anschlüsse auf. Ein Speisetzwerk auf Basis von Mikrostreifenleitungen (nicht im 3D-Modell für die Feldsi-

mulation enthalten) führt die Signale über eine 180°-Umwegleitung und einen Leistungsteiler zusammen.

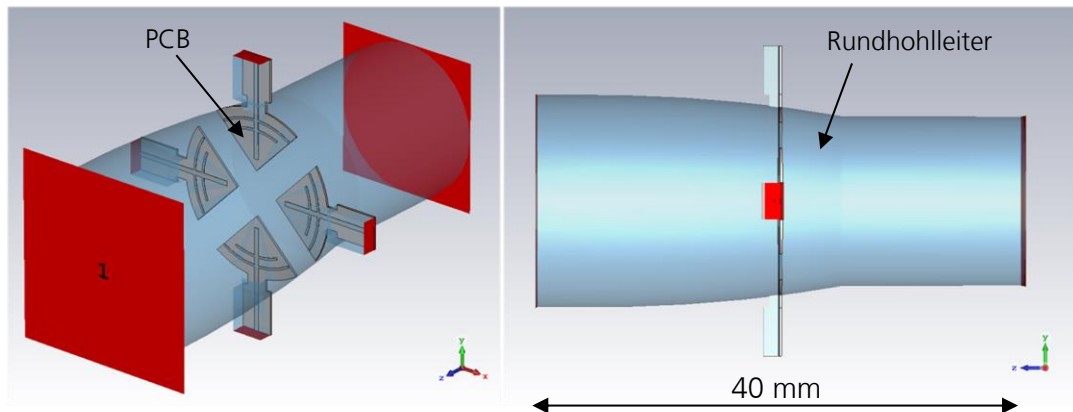


Abbildung 38: CST-Simulationsmodell des Ku-Band Kopplers als perspektivische und seitliche Ansicht bestehend aus einem Rundhohlleiterübergang (blau transparent) und den gedruckten Strukturen zur Signaleinspeisung im Ku-Band und den zugehörigen Anschlüssen auf Mikrostreifenleitungsebene.

Die Streuparameter des Kopplers inklusive Speisetzwerk im Ku-Band sind in Abbildung 39 zu sehen. Im Bereich von 11,3 bis 12,4 GHz ist der Koppler am 17,5 mm-Rundhohlleiter besser als -10 dB angepasst und besitzt eine Einfügedämpfung zwischen dem Rundhohlleiter und dem zusammengeführten Anschluss auf Mikrostreifenleitungsebene zwischen 0,1 und 0,6 dB.

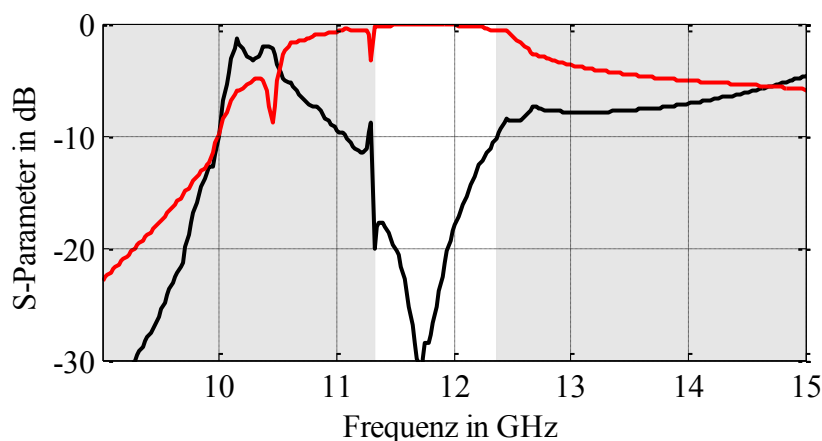


Abbildung 39: Anpassung (schwarz) der Koppelstruktur am 17,5 mm-Rundhohlleiter für den TE<sub>11</sub> Mode im Ku-Band sowie die Transmission (rot) für den Grundmode im Rundhohlleiter zum PCB-basierten Anschluss nach dem zugehörigen Speisetzwerk. Der Frequenzbereich mit einer Anpassung von besser als -10 dB ist weiß gekennzeichnet (11,3-12,4 GHz).

Da der Koppler zwischen dem Speisehorn und dem Ka-Band-Koppler montiert wird, liegt ein besonderer Fokus auf dessen Transmissionseigenschaften zwischen den beiden Rundhohlleiteranschlüssen in den beiden Ka-Band-Frequenzbereichen. Signale bei 20 und 30 GHz müssen den Ku-Band-Koppler möglichst ungestört passieren können. Zu diesem Zweck besitzen die gedruckten Strukturen zur Anregung des Grundmodes im Ku-Band jeweils mehrere Stichleitungen, wel-

che eine Einkopplung der Ka-Band-Signale in die Mikrostreifenleitungen verhindern und eine möglichst ungestörte Transmission innerhalb der Rundhohlleitersegmente ermöglichen.

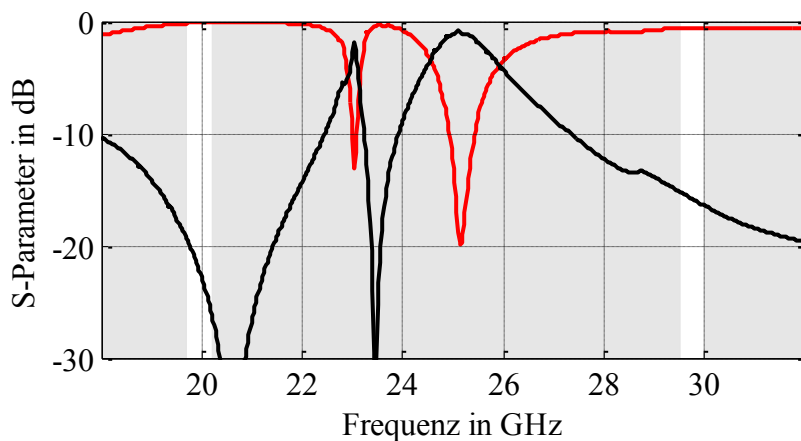


Abbildung 40: Anpassung (schwarz) für die Speisung des  $TE_{11}$  Modes im 17,5 mm-Rundhohlleiter sowie die Transmission (rot) zwischen 17,5 mm- und 14 mm-Rundhohlleiter im Ka-Band. Die beiden Ka-Band-Frequenzbereiche, welche in KASYMOSA verwendet werden (19,7-20,2 GHz und 29,5-30 GHz), sind weiß gekennzeichnet.

Die Anpassungs- und Transmissionseigenschaften des Ku-Band-Kopplers im Ka-Band für den fundamentalen  $TE_{11}$  Mode sind in Abbildung 40 dargestellt. Im Downlink-Frequenzbereich von 19,7 bis 20,2 GHz liegt die Einfügedämpfung zwischen 0,1 und 0,2 dB bei einer Eingangsreflexion von unter -19 dB. Im Uplink-Band von 29,5 bis 30 GHz beträgt die Einfügedämpfung etwa 0,6 dB bei einer Anpassung von besser als -15 dB. Die Werte für die Einfügedämpfung resultieren teilweise aus Verlusten im verwendeten Substratmaterial sowie in einer geringen Anregung höherer Moden im Rundhohlleiter.

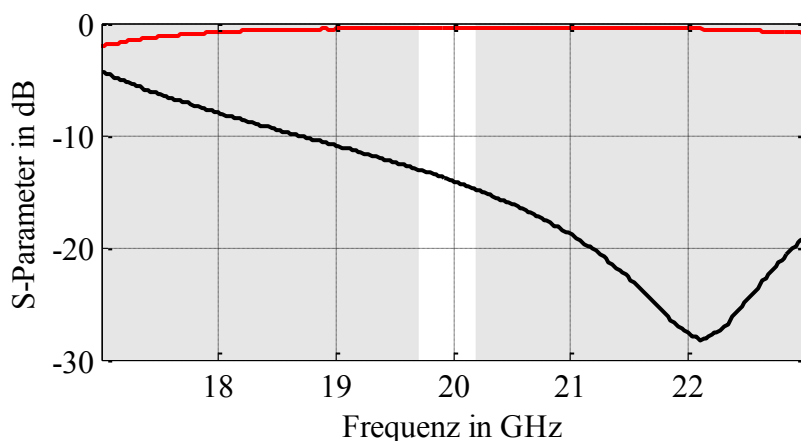


Abbildung 41: Anpassung am 17,5 mm Rundhohlleiter (schwarz) und Transmission zwischen beiden Rundhohlleitern (rot) des Kopplers im Ka-Band-Empfangsbereich für den  $TM_{01}$  Mode.

Das Transmissions- und Anpassungsverhalten des Kopplers für den für die Nachführung wichtigen  $TM_{01}$  Mode im Empfangsbereich ist in Abbildung 41 zu sehen. Hierbei entsteht eine Einfügedämpfung von etwa 0,4 dB bei einer Anpassung von besser als -13 dB.

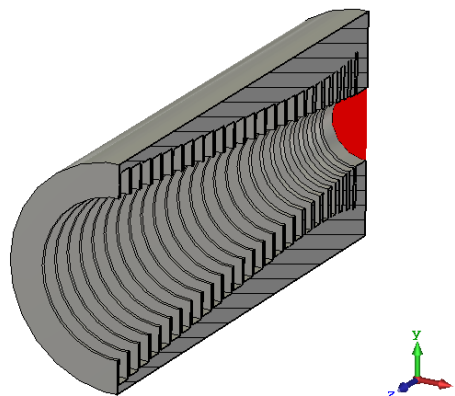


Abbildung 42: Aufgeschnittenes CST\_Modell eines Rillenhorns für die Speisung von Parabolantennen zur Verwendung mit den PCB-basierten Kopplern für das Ka- und das Ku-Band

Passend zu dem oben beschriebenen Ku-Band-Koppler wurde ein Rillenhorn entworfen, welches bei den drei Frequenzbereichen (11,3-12,4 GHz, 19,7-20,2 GHz, 29,5-30 GHz) für die Speisung von Parabolantennen verwendet werden kann. Das CST-Simulationsmodell dieser Hornantenne ist in Abbildung 42 als aufgeschnittene Darstellung abgebildet. Die wichtigsten Kenngrößen sind in Tabelle 4 aufgelistet. Das Horn zeigt gute bis sehr gute Werte für den Nebenkeulenabstand. Die Direktivität und damit einhergehend auch die 3 dB-Keulenbreite variiert spürbar über der Frequenz, weshalb an dieser Stelle ein Kompromiss getroffen werden muss, wenn die Antenne als Speisung für einen Reflektor zum Einsatz kommt, da die Ausleuchtung der Parabolantenne nur für eine Frequenz optimiert werden kann.

Frequenzbereich	Direktivität	3 dB Keulenbreite	Nebenkeulenabstand
<b>11,3-12,4 GHz</b>	11,6 dBi	51,3°	33 dB
<b>19,7-20,2 GHz</b>	16,7 dBi	27,1°	40 dB
<b>29,5-30,0 GHz</b>	19,5 dBi	20,0°	22 dB

Tabelle 4: Simulierte Kennwerte des Ku-/Ka-Band-Rillenhorns

Die vorgestellte Ku-/Ka-Band-Speisekette zeigt, dass die Technologie der Referenzimplementierung 2.0 der HG-Antenne auch prinzipiell für mehrere Satellitenbänder parallel ausgelegt werden kann. Für eine Fertigung dieses Kopplers besteht allerdings weiterer Forschungsbedarf, da zusätzlich noch eine Funktionalität im Uplink-Bereich des Ku-Bands anzustreben ist.

### 2.1.6 AP2200 - Entwicklung Low-Profile Antennentechnologien

Dieses Arbeitspaket liefert Beiträge zur anwendungsorientierten Entwicklung von nachführbaren Antennen geringer Baugröße und -höhe. Es beinhaltet vor allem Arbeiten bezüglich innovativer Nachführverfahren und einer Erhöhung des Integrationsgrades der ODU der *Low-Profile* (LP)

Antenne. Die Antennenentwicklung umfasst die Bereitstellung von Sensorinformationen für LP-spezifische Nachführkonzepte, welche für den moderaten Antennengewinn geeignet sind und Regelschleifen sowohl im Azimut als auch in der Elevation berücksichtigen. Hierzu gehören einerseits der *Maximum Ratio Combining*-Ansatz (MRC) [37] auf der Basis von Subaperturen mit mehrzügigen Empfangs- und Sendezweigen für die Elevation und andererseits die Erforschung eines elektronischen Monopuls-Nachführverfahren für die Azimutebene.

Zu Beginn des Projektes *KASYMOSA* stand als Aufgabenstellung die Fertigstellung des Referenzimplementierung 1.0 der LP-Antenne im Vordergrund. Hierfür wurde durch das Fachgebiet HMT die Antennenaußeneinheit fertiggestellt und stand für die Validierung in der ersten Projektphase, bei der das gesamte Terminal einschließlich der höheren Kommunikationsschichten an der Fraunhofer-Versuchsanlage *FORTE* getestet wurde, bereit (Abbildung 43). Dieser LP-Demonstrator besitzt vier Antennenpaneele und zwei verschiedenen Elevationsneigungsebenen für die Verwendung auf dem sich an *FORTE* befindenden Bewegungsimulator oder auch auf einem Fahrzeugdach. Diese Antennenaußeneinheit erlaubt die Strahlnachführung in der Elevationsebene mit Hilfe des MRC-Verfahrens sowie die Bereitstellung eines zweiten Empfangskanals für die Anwendung einer Monopuls-Nachführung im Azimut. Der Durchmesser des Positionierers beträgt 60 cm und die Gesamthöhe inkl. Radom liegt bei 34 cm. Für die bidirektionale Kommunikation wurden in diesem Entwicklungsstadium noch monobandig gespeiste Antennenpaneele mit Aperturabmessungen von jeweils 60 mm x 200 mm verwendet. Es konnten Antennengewinne im Downlinkband (19,7-20,2 GHz) von immer mehr als 17,0 dBi und im Uplinkband (29,5-30,0 GHz) von immer mehr als 19,0 dBi messtechnisch verifiziert werden.

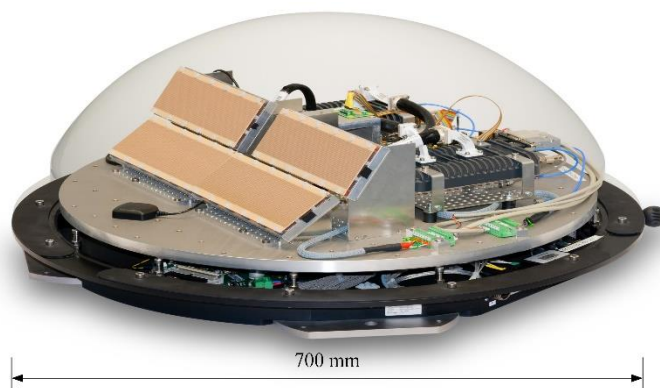


Abbildung 43: Ka-Band Terminal-Außeneinheit der LP-Referenzimplementierung 1.0

Für die Referenzimplementierung 2.0 der LP-Antenne wurde gemeinsam durch HMT, IIS und EAS ein Realisierungskonzept erarbeitet, welches als Blockschaltbild in Abbildung 44 dargestellt ist.

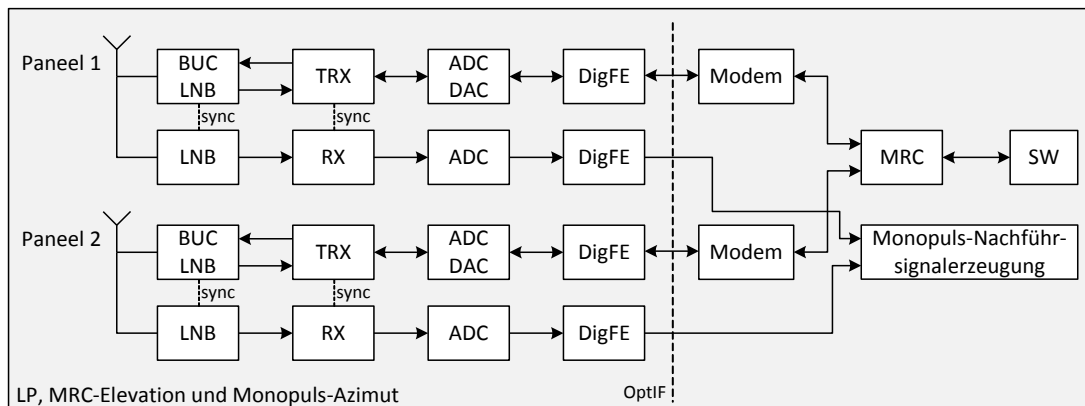


Abbildung 44: Blockschaltbild des LP-Terminals mit *Maximum Ratio Combining* (MRC) für die Elevationsnachführung und dem Monopulsverfahren für die Azimutnachführung; (BUC – Block Up-Converter; LNB – Low-Noise Block; TRX/RX – Sende-/Empfänger; DAC/ADC – Digital-Analog-Converter; DigFE – Digital Frontend; SW – Software)

Die dargestellte Architektur berücksichtigt zunächst zwei dualbandige Antennenpaneele, ist aber auf eine höhere Anzahl erweiterbar. Besondere Merkmale liegen vor allem darin, dass die Drehdurchführung zwischen Außen- und Inneneinheit (ODU und IDU) als faseroptische Schnittstelle (OptIF) ausgelegt ist und dass bereits auf der ODU eine AD/DA-Wandlung im Basisband und eine erste digitale Signalverarbeitung (DigFE) vorgenommen wird. Neben der MRC-Nachführung in der Elevation besitzt jedes Paneel bei dieser konzeptionellen Architektur einen zusätzlichen Empfangspfad zum Zweck der Gewinnung von Monopuls-Azimet-Nachführinformationen in der IDU.

Zum *KASYMOSA*-Konzept für die LP-Antenne gehört die Entwicklung von Ka-Band Leckwellenantennenpaneelen, welche eine dualbandige (Up- und Downlinkband innerhalb des Ka-Bandes) periodische Struktur besitzen sowie in ihrer Anregung dualbandig betrieben werden. Zu den periodischen Strukturen wurden im Fördervorhaben *MOSAKA* [38] bereits entscheidende Vorarbeiten geleistet. Für die vollständig dualbandigen Paneele wurden im Projekt *KASYMOSA* verschiedene Formen der Primärspesung von Leckwellenantennen zunächst mit der Hilfe von numerischen Feldsimulationen untersucht und optimiert. Generell bietet ein vollständig dualbandiger Paneelentwurf die Möglichkeit einer Platzersparnis um bis zu 50% bei gleichem Antennengewinn und trägt somit zu einer möglichst kompakten Antennenaußeneinheit bei.

Nach verschiedenen Entwürfen mit einer geringeren Anzahl an speisenden zirkular polarisierten Schlitzen wurde eine Variante mit acht Schlitzstrahlern für jeweils beide Frequenzbereiche entworfen, wobei für 20 GHz mit zwei außenliegenden Hohlleitern gespeist wird und der für die Speisung bei 30 GHz verantwortliche Rechteckhohlleiter sich im Zentrum des Paneels befindet (Abbildung 45).



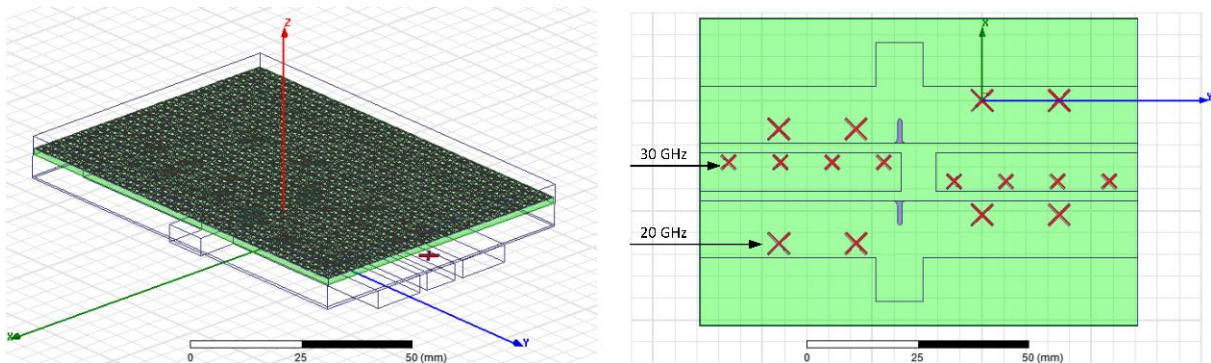


Abbildung 45: Links: Simulationmodell eines Leckwellenantennenpanels mit einer Rechteckhohlleiterspeisung im Up- und Downlinkband und einer Fläche von 70 mm x 100 mm; rechts: Verteilung zirkular polarisierter Schlitzstrahler auf der Oberseite des Rechteckhohlleiter-Speisenetzwerkes für die Anregung des Leckwellenantennenpanels

Die verwendete Antennenapertur beträgt zunächst 70 mm x 100 mm, wobei die erste Realisierung eines dualbandig gespeisten Panels zur messtechnischen Evaluation mindestens 70 mm x 200 mm betragen sollte. Letztgenannte Größe entspricht nahezu den bisher bei dem LP-Demonstrator der Referenzimplementierung 1.0 verwendeten Paneelabmessungen, allerdings reduziert sich die Anzahl der bisher benötigten Antennenpaneele durch die Verwendung der neuen Variante um die Hälfte. Die Simulationsergebnisse mit Hilfe der 70 mm x 100 mm Apertur, welche in Abbildung 46 dargestellt werden, dienen zunächst der Einschätzung über die prinzipielle Realisierbarkeit dieses dualbandigen Ansatzes bei gleichzeitiger Reduktion der Feldsimulationsdauer.

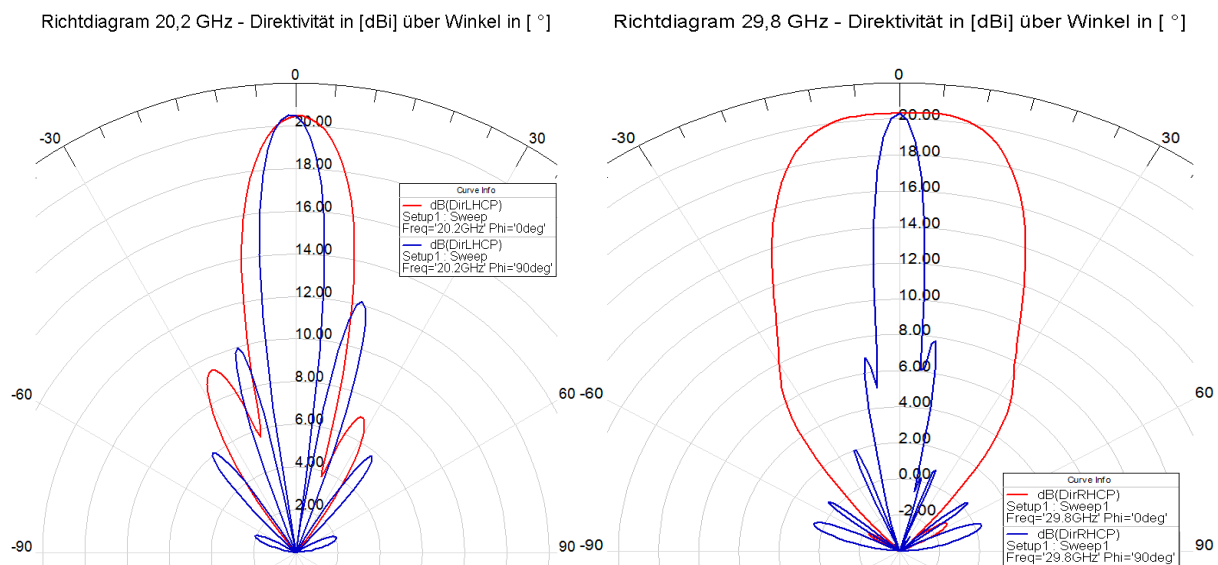


Abbildung 46: Links: Simulationsergebnis für die Antennendirektivität über dem Elevationswinkel (rote Kurve) und über dem Azimutwinkel (blaue Kurve) bei 20,2 GHz Rechts: Simulationsergebnis für die Antennendirektivität über dem Elevationswinkel (rote Kurve) und über dem Azimutwinkel (blaue Kurve) bei 29,8 GHz

Die simulierte Direktivität in Hauptstrahlrichtung beträgt 20,5 dBi bei 20,2 GHz im Downlink und mit linkshändig-zirkularer Polarisation (linker Teil der Abbildung). Im Uplink 20,3 dBi bei 29,8 GHz mit rechtshändig-zirkularer Polarisation (rechter Teil der Abbildung). Die rote Kurve stellt in beiden Fällen die Richtcharakteristik in der Elevation dar und die blaue Kurve charakterisiert das Strahlungsverhalten im Azimut. In beiden Fällen ist der Öffnungswinkel der Elevationsrichtcharakteristik größer als der des Azimuts, was auf die Rechteckgeometrie des Antennenpanels sowie die Positionsverteilung der speisenden zirkular polarisierten Schlitzstrahler zurückzuführen ist. Die Direktivität liegt im gesamten Downlinkband (19,7 bis 20,2 GHz) immer über 18 dBi und weist innerhalb der gesamten Nutzbandbreite eine Kreuzpolarisationsentkopplung (XPD) von >14 dB auf. Im gesamten Uplinkband (29,5 bis 30,0 GHz) werden immer mindestens 19,8 dBi bei einem XPD > 17 dB erreicht. Die Ergebnisse dieses frühen Paneelentwurfs entsprechen bereits der Leistungsfähigkeit und den Antennenparametern der zuvor monobandig gespeisten Antennenpaneele, allerdings bei nur halber Baugröße. Diese vielversprechenden Ergebnisse des prinzipiellen Entwurfs einer adäquaten dualbandigen Speisung für die zweilagige periodische Struktur führten zum Entwurf eines größeren Paneels im Hinblick auf eine messtechnische Verifizierung der Ergebnisse. Diese Messergebnisse eines Paneels der doppelten Größe können dann zu einem exakten Vergleich mit den Resultaten der bereits vorhandenen monobandig gespeisten Paneele herangezogen werden.

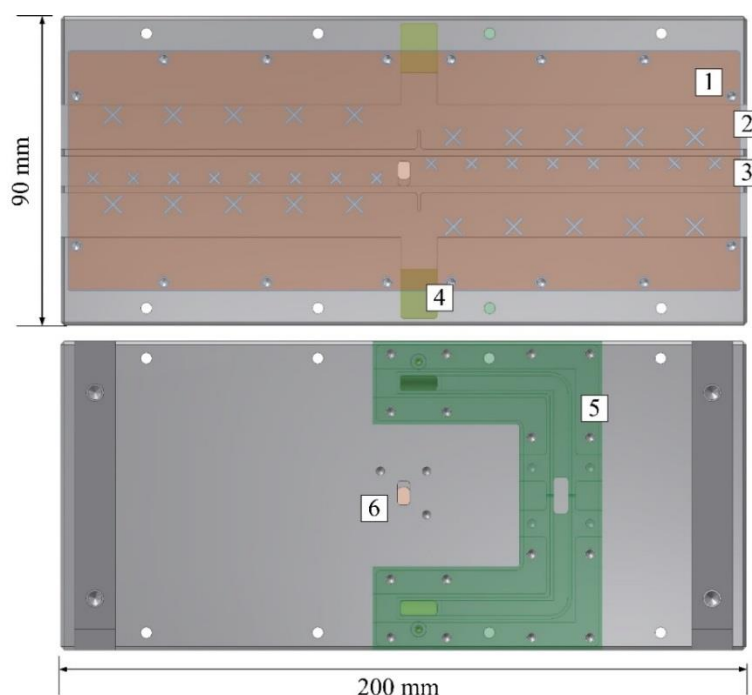


Abbildung 47: CAD Modell der dualbandigen Speisestruktur des Ka-Band Antennenpanels (Vorder- und Rückseitenansicht); Bestandteile: Metallplatte mit 20 und 30 GHz Schlitzstrahlergruppe (1), 20 GHz (2) und 30 GHz (3) Rechteckhohlleiter-Speisenetzwerk, Hohlleiterbiegungen zur Paneelrückseite (4), Rechteckhohlleiternetzwerk mit verschiedenen E- und H-Biegungen für die Zusammenführung zu einem gemeinsamen 20 GHz Flansch (5), 30 GHz Hohlleiterflansch mit Iris (6).

Es wurde weiter an dem vollständig dualbandigen Antennenpaneel für die LP- Antennenaußen-einheit gearbeitet, wozu vor allem der Entwurf des dualbandigen Speisenetzwerks gehörte. Es wurde ein deutlich größeres Modell eines dualbandigen Speisenetzwerks, geeignet für eine Antennenapertur mit 70 mm x 200 mm, entworfen. Das dreidimensionale CAD-Modell, welches

für den Fertigungsprozess erstellt werden musste, ist in der Abbildung 47 dargestellt und weist eine deutlich größere Schlitzstrahlergruppe für 20 und 30 GHz auf, geeignet für die Belegung der bereits erprobten dualbandigen PRS (*Partially Reflective Surface*) [39].

Die Abbildung 47 zeigt die Vorder- und die Rückseite des Ka-Band Panels ohne die Darstellung der zweilagigen PRS, um den Aufbau der Speisung und die Realisierung der HF-Schnittstellen zu illustrieren. Der Neuheitswert dieses Aufbaus besteht vor allem in der Realisierung eines Speisernetzwerks basierend auf gefrästen Rechteckhohlleitern sowohl für den Empfangs- als auch den Sendefrequenzbereich. Die darin geführten Wanderwellen regen die dualbandige Schlitzstrahlergruppe (vgl. Abbildung 47, Markierung 1) an, eine zirkular polarisierte EM-Welle abzustrahlen. Die Schlitzstrahler werden wie bei den bisherigen monobandigen Implementierungen präzise in eine 0,5 mm dünne Metallplatte Laser-geschnitten. Für die Anregung des Panels wurde für 20 GHz eine Gruppe mit 20 Strahlern verwendet (vgl. Abbildung 47, Markierung 2), deren Strahlerlängen von 6,8 mm bis 7,0 mm variieren. Die beiden darunter liegenden äußeren Rechteckhohlleiter werden mittengespeist und auf der Rückseite des Panels durch ein zusätzliches Bauteil, phasenrichtig kombiniert (vgl. Abbildung 47, Markierung 5, grün eingefärbtes Bauteil). Die 30 GHz Anregung wird durch 16 Schlitzstrahler realisiert, mit unterschiedlichen Längen zwischen 4,375 mm und 4,800 mm, welche durch einen einzelnen Hohlleiter gespeist werden (vgl. Abbildung 47, Markierung 3). Durch die verschiedenen Schlitzlängen weicht man absichtlich von einer optimalen Resonanz des Einzelstrahlers ab, um einen gewünschten Leistungsanteil abzustrahlen. Die eingespeiste Leistung wird im aufgezeigten Fall möglichst gleichförmig über der Gruppe abgestrahlt, um die dualbandige PRS möglichst flächeneffizient zu nutzen. Auf der Antennenrückseite wurden zwei Hohlleiterflansche realisiert mit standardisierten Abmessungen für eine simultane Funktionalität in beiden Frequenzbereichen. Der 30 GHz Flansch besitzt eine integrierte Iris mit optimierter Stärke und Breite (vgl. Abbildung 47, Markierung 6) für eine gute Eingangsanpassung. Im gesamten dualbandigen Speisernetzwerk wurden mehrere E- und H-Hohlleiterbiegungen sowie T-Verzweigungen entworfen und optimiert.

Die Funktionalität des neuen Paneelentwurfs wurde vor der Implementierung mit Hilfe von EM-Vollwellensimulationen und einem dreidimensionalen Modell, welches nicht alle mechanischen Herstellungsdetails vollständig berücksichtigt, in mehreren Entwurfsschritten erprobt und optimiert. Die Realisierung des beschriebenen CAD-Modells eines vollständig dualbandigen Ka-Band Antennenpaneels mit einer Apertur von 70 mm x 200 mm zeigt die Abbildung 48.

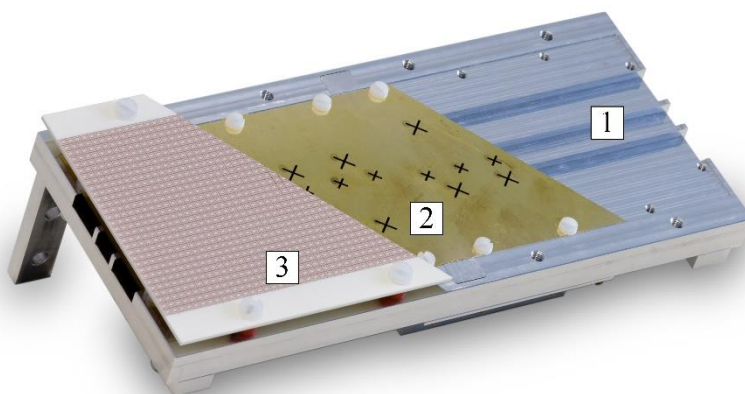


Abbildung 48: Dualbandiges Antennenpaneel für die LP-Antennenaußeneinheit bestehend aus einer Grundmetallplatte mit einer 20 und 30 GHz Hohlleiterspeisestruktur (1), einer Schlitzstrahlergruppe als Anregung für das Downlink- und Uplink-Satellitenband (2) gelegen unterhalb einer zweilagigen PRS (*Partially Reflective Surface*) mit einer Apertur von 70 mm x 200 mm (3).

Die Abbildung 49 zeigt das Messergebnis des vorgestellten Paneels für den realisierten Antennengewinn über dem *Downlink*-Band. Der maximale co-polarisierte Gewinn (LHCP) beträgt 22,2 dBi bei der Frequenz 19,7 GHz. Die Mindesteffizienz der Antenne wurde mit 65% gemessen. Über einem 900 MHz breiten Frequenzbereich (19,2 bis 20,1 GHz) beträgt der realisierte Gewinn immer mindestens 20 dBi. Die verwendbare Bandbreite hat sich leicht um ca. 0,3 GHz zu tieferen Frequenzen hin verschoben, aufgrund von Geometrieabweichungen der PRS auf dem Leiterplattenmaterial nach dem Herstellungsprozess. Die in der Abbildung sichtbare und gewollte Differenz zwischen dem LHCP- und dem RHCP-Gewinn ist ein Maß für die Kreuzpolarisationsentkopplung (XPD). Diese beträgt innerhalb der genannten Bandbreite immer mehr als 15 dB.

Die Frequenz im Uplink-Band mit maximalem Gewinn in Hauptstrahlrichtung wurde bei 30,0 GHz ermittelt (vgl. Abbildung 50). Der realisierte RHCP-Gewinn beträgt 22,9 dBi und es ist eine Gesamteffizienz von 74% messbar. Die Kreuzpolarisationsentkopplung beträgt ca. 16 dB im Uplink-Band.

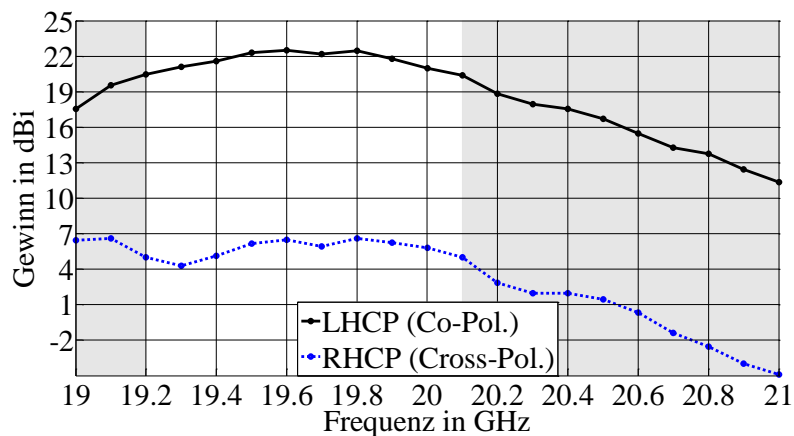


Abbildung 49: Messergebnisse des co- und des kreuzpolarisierten realisierten Gewinns über dem Frequenzbereich des Downlink-Bandes eines dualbandigen Antennenpaneels mit einer Apertur von 70 mm x 200 mm

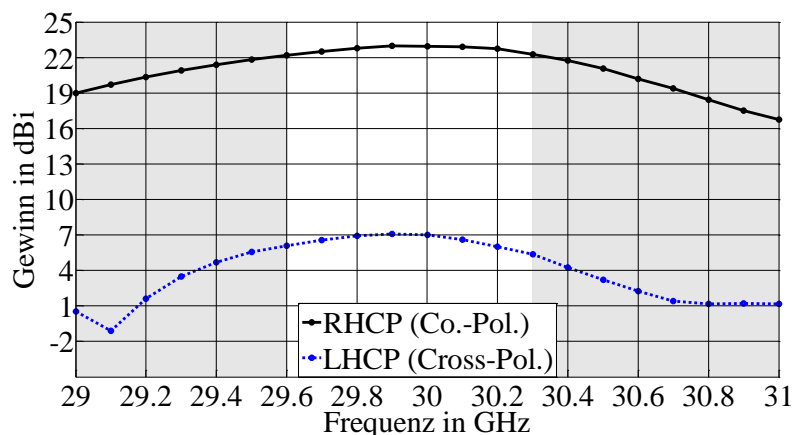


Abbildung 50: Messergebnisse des co- und des kreuzpolarisierten realisierten Gewinns über dem Frequenzbereich des Uplink-Bandes eines dualbandigen Antennenpaneels mit einer Apertur von 70 mm x 200 mm

Die beiden folgenden Abbildungen vergleichen das simulierte und gemessene LHCP Gewinn-Richtdiagramm des Antennenpanels bei 19,7 GHz in der Elevationsebene (Abbildung 51) und in der Azimutebene (Abbildung 52). Die 3-dB Keulenbreite beträgt in der Elevationsebene ca. 15° während der Öffnungswinkel im Azimut etwa 4° beträgt. Der simulierte Antennengewinn liegt ca. 0,8 dB unterhalb des Wertes der Messung. Diese geringe Differenz resultiert aus geringfügigen Geometrieabweichungen folgend aus dem Herstellungsverfahren für die PRS. Die Frequenzverschiebung von 0,3 GHz zu niedrigeren Frequenzen hin, führt zu Veränderungen in Bezug auf die Nullstellentiefe und die Breite der Nebenkeulen im Richtdiagramm.

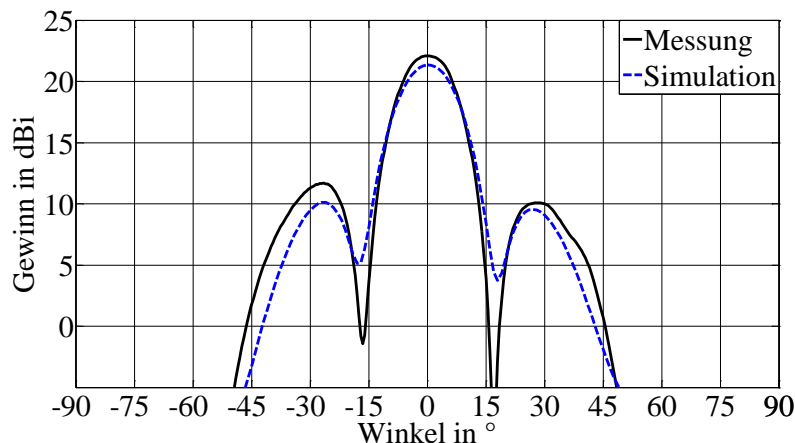


Abbildung 51: Vergleich des simulierten und gemessenen Gewinn-Richtdiagrammes (LHCP-linkshändig zirkulare Polarisation) bei 19,7 GHz in der Elevationsebene eines dualbandigen Antennenpanels mit einer Apertur von 70 mm x 200 mm

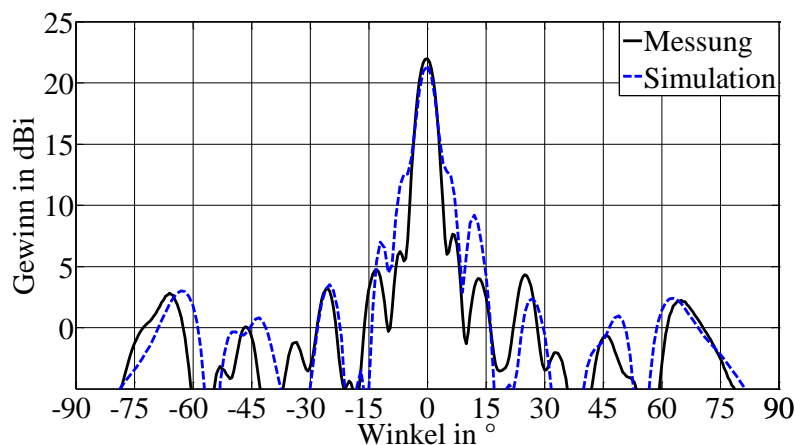


Abbildung 52: Vergleich des simulierten und gemessenen Gewinn-Richtdiagrammes (LHCP-linkshändig zirkulare Polarisation) bei 19,7 GHz in der Azimutebene eines dualbandigen Antennenpanels mit einer Apertur von 70 mm x 200 mm

Die Abbildung 53 und Abbildung 54 stellen das simulierte und gemessene RHCP Gewinn-Richtdiagramm des Antennenpanels bei 30,0 GHz - der Frequenz des Maximalgewinns im *Up-link*-Band - in der Elevationsebene (Abbildung 53) und der Azimutebene (Abbildung 54) dar. Die 3-dB Keulenbreite beträgt in der Elevationsebene ca. 25° während der Öffnungswinkel im Azimut etwa 3° beträgt.



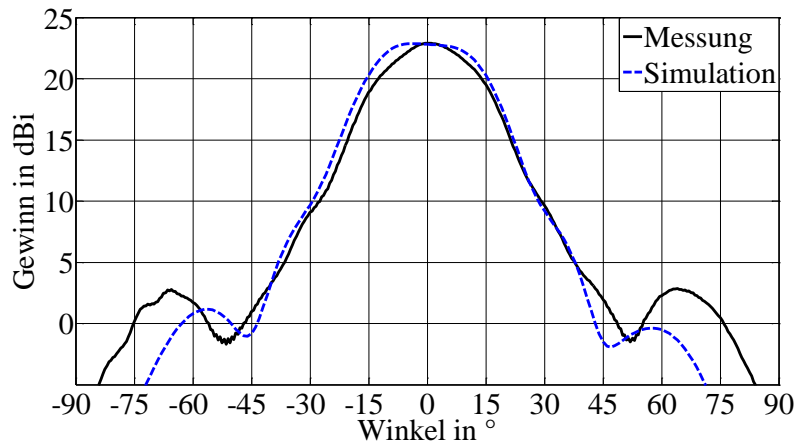


Abbildung 53: Vergleich des simulierten und gemessenen Gewinn-Richtdiagrammes (RHCP-rechtshändig zirkulare Polarisation) bei 30,0 GHz in der Elevationsebene eines dualbandigen Antennenpanels mit einer Apertur von 70 mm x 200 mm

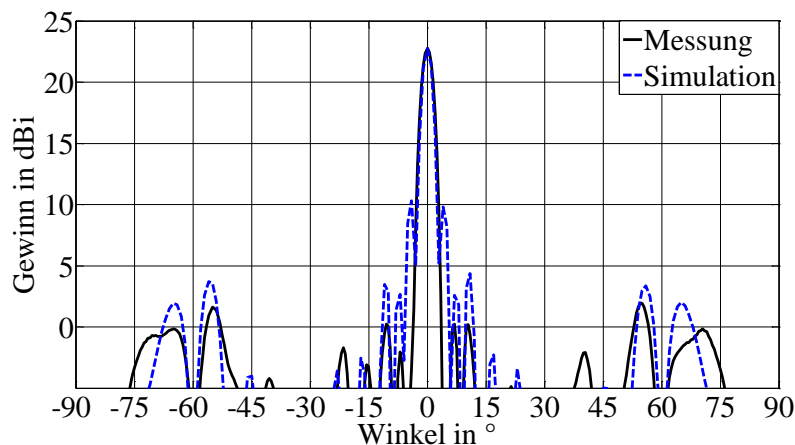


Abbildung 54: Vergleich des simulierten und gemessenen Gewinn-Richtdiagrammes (RHCP-rechtshändig zirkulare Polarisation) bei 30,0 GHz in der Azimutebene eines dualbandigen Antennenpanels mit einer Apertur von 70 mm x 200 mm

Diese vorgestellte vollständig dualbandige Antennenpanel-Variante mit einer Apertur von 70 mm x 200 mm bestätigte nach der Realisierung und durch die messtechnische Verifikation die Funktionstauglichkeit des gewählten Ansatzes und kann unter maximaler Platzausnutzung eines neuen mechanischen Azimutpositionierers in größeren Variante in die Antennenaußeneinheit integriert werden und als Nutzlast Verwendung finden.

Für die Referenzimplementierung 2.0 der LP-Antenne ist im Rahmen des Vorhabens der Aufbau einer neuen Satellitenterminal-Außeneinheit in Form eines Demonstrators entworfen worden (vgl. Abbildung 55). Diese Außeneinheit basiert auf einem optimierten mechanischen Azimut-Antennenpositionierer, gefertigt durch die Firma iMAR GmbH in St. Ingbert. Im Vergleich zum bisher genutzten Antennenpositionierer, welcher am Ende des Fördervorhabens *MOSAKA* entstanden ist, soll sich die gesamte Außeneinheit durch einen deutlich kompakteren Aufbau (60% Volumeneinsparung) und eine um 40% geringere Bauhöhe auszeichnen. Durch die Wahl eines anderen Antriebssystems (Zahnriemenantrieb mit bürstenlosem Gleichstrommotor) konnte die



mechanische Aufbauhöhe des Positionierers selbst deutlich verringert werden bei einer vergleichbaren Maximalgeschwindigkeit und Beschleunigung des Nutzerterminals für den vorgegebenen Anwendungsfall (vgl. Tabelle 5). Eine weitere wesentliche Neuerung besteht in einer optischen Anbindung der Antennenaußeneinheit zur Inneneinheit über Glasfaserkabel und eine entsprechende optische Drehkupplung. Die Tabelle 3 vergleicht die wesentlichen technischen Daten und die Nutzlast der bisher verwendeten Referenzimplementierung 1.0 mit den Eigenschaften und der Nutzlast für die *KASYMOSA* Referenzimplementierung 2.0.

Technische Daten	Rev.#1	Rev.#2
Durchmesser Nutzlastplattform	600 mm	500 mm
Positioniererrhöhe	94 mm	55 mm
Gesamthöhe mit Radom	341 mm	203 mm
Antriebssystem	Direktantrieb, Torquemotor	Zahnriemenantrieb, bürstenloser DC-Motor
Dynamik	300°/s, 300°/s <sup>2</sup>	300°/s, 300°/s <sup>2</sup>
Gewicht	29,5 kg	25 kg
Drehbereich Azimut	unbegrenzt	unbegrenzt
Nutzlast	2 RX und 2 TX Paneele, jeweils 60 x 200 mm <sup>2</sup>  Antennengewinn Downlink 17-19 dBi, Uplink 19-22 dBi  max. 12 kg	2 TRX Paneele, 70 x 300 mm <sup>2</sup> , 70 x 350 mm <sup>2</sup>  Antennengewinn Downlink 22-24,5 dBi, Uplink 22-24 dBi  max. 8 kg
Drehübertrager	6 Kanal koaxial	1 Kanal optisch
Radom	Halbrundes Radom, großzügig ausgelegt	Zylindrische Bauform des Radoms mit geeignetem Kantenradius, erlaubt Nutzlastaufbauhöhe von 15 cm  Transmissionsdämpfung im Frequenzbereich von 19,5-20,5 GHz von < 0,4 dB und 29,5-30,5 GHz von < 0,7 dB

Tabelle 5: Vergleich der wesentlichen technischen Daten der bisherigen Referenzimplementierung 1.0 (Rev.#1) und der neuen und optimierten *KASYMOSA* Referenzimplementierung 2.0 (Rev.#2) für die LP-Antenne

Im Vergleich zu den Paneelen mit einer Apertur von 70 mm x 200 mm ist es geplant, für den neuen Demonstratoraufbau zwei deutlich längere und in der Abmessung verschiedene Antennenpaneele zu verwenden (vgl. CAD Konstruktionszeichnung der Außereinheit in Abbildung 55).

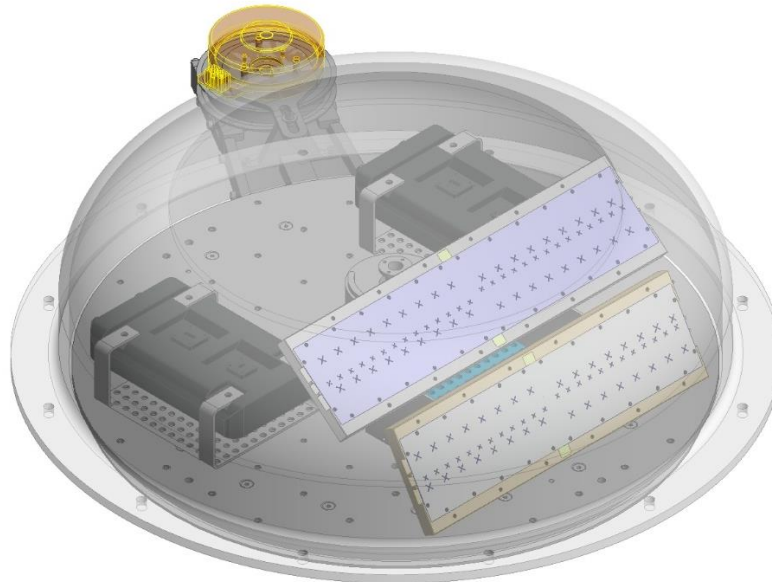


Abbildung 55: 3D CAD Konstruktion der KASYMOSA LP Terminal-Außereinheit mit Radom (transparente Darstellung), zwei verschieden großen Antennenpaneelen (ohne Dual-Band PRS dargestellt), bi-direktionalen Ka-Band Frequenzumsetzern (dunkelgrau gefärbte Module), sowie der abgesetzten Antriebseinheit (im hinteren Teil der Abbildung).

Die dualbandigen Paneele weisen Antennenaperturen von 70 mm x 300 mm und 70 mm x 350 mm auf und sind nach dem Entwurf und numerischer Optimierung vollständig gefertigt und auf dem mechanischen Antennenpositionierer als Teil der Nutzlast implementiert (vgl. Abbildung 57). Diese Paneele lösen die bisher auf dem Rev.#1 Demonstrator verwendeten – lediglich monobandig funktionalen – Antennen mit einer Abmessung von 60 mm x 200 mm ab. Neben dem Vorteil der gemeinsamen Nutzung einer Antennenapertur für den Up- und Downlink-Frequenzbereich liegen die Gewinne der neu realisierten Paneele um etwa 5 dB (Downlink) und 2 dB (Uplink) höher. Die gefrästen Paneel-Grundplatten mit integrierten Speisernetzwerken und ein Hohlleiterverteilnetzwerk für 20 GHz als Zusatzteil für die Rückseitenmontage sind in der Abbildung 56 dargestellt.



Abbildung 56: Geringe Grundmetallplatten für dualbandigen Ka-Band Antennenpaneelle mit Antennenaperturen von 70 mm x 300 mm und 70 mm x 350 mm sowie einem Hohlleiternetzwerk für 20 GHz als Zusatzbauteil für die Rückseitenmontage

Bei den in dieser Abbildung nicht dargestellten Komponenten handelt es sich um Bleche, die hochpräzise Laser-geschnittene Gruppenschlitzstrahler zur Anregung der zweidimensional-periodischen Leckwellenantenne beherbergen, sowie die zweilagig auf hochfrequenztauglichem Substratmaterial realisierte dualbandige PRS für die bi-direktionale Kommunikation im Ka-Satellitenband. Die vollständige Implementierung aller Nutzlastkomponenten auf dem mechanischen Positionierer ist in der Abbildung 57 dargestellt.

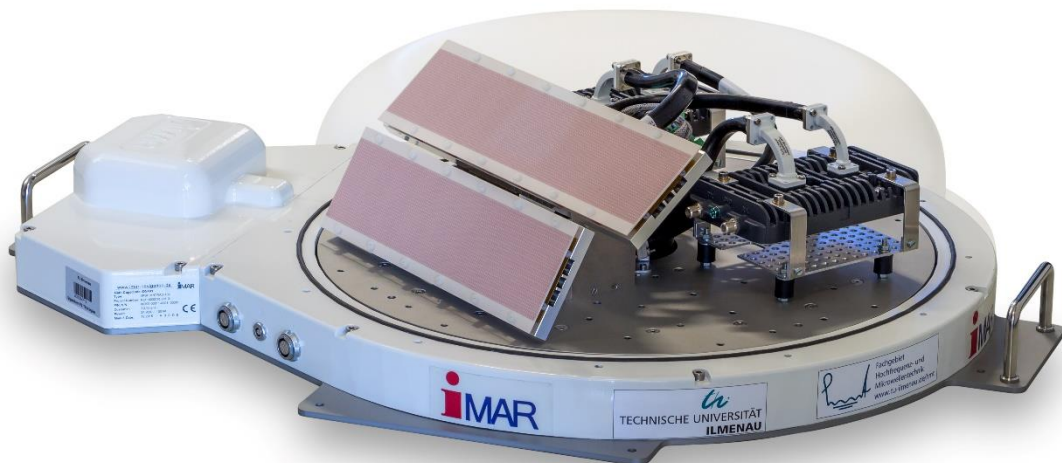


Abbildung 57: Ka-Band Low-Profile Antennendemonstrator bzw. Außeneinheit des mobilen KASYMOSA-Satellitenterminals (Referenzimplementierung 2.0)

Die hier verwendeten Sendeempfangsumsetzer sind kommerziell verfügbare der Firma ViaSat, können aber prinzipiell durch die im Abschnitt 2.1.1 vorgestellten Module (vgl. Abbildung 35) ersetzt werden und tragen somit zur Reduktion des Platzbedarfes der Nutzlast bei. Der Demonstrator berücksichtigt den Bedarf an mehreren parallel Frequenz-konvertierenden Empfangspfaden und die Erprobung einer A/D-Umsetzung ins Basisband bereits auf der LP-Außeneinheit, noch vor der optischen Drehdurchführung, was systemorientierte Vorteile erbringt. Der Entwurf und die Beschaffung von Hardware zur Integration des analogen PHY Sende- und Empfangszweiges inkl. digitaler optischer Schnittstelle in der ODU, sowie die Integration dieser Hardware auf der Antennenaußeneinheit und die Integration der relevanten Teile der PHY Firmware auf die Hardware war Aufgabe des Konsortialpartners Fraunhofer IIS in Erlangen.

Die Abbildung 58 zeigt das Messergebnis für das Richtdiagramm eines 70 mm x 350 mm großen Paneels bei 19,8 GHz im Downlink-Band. Der numerisch ermittelte realisierte Gewinn beträgt 24,5 dBi, entsprechend den 3-dB-Öffnungswinkeln von ca. 2° und 14° in den beiden Hauptebenen. Der Abstand zur ersten Nebenkeule in der Elevationsebene beträgt im Durchschnitt ca. 10 dB und in der Azimutebene ca. 13 dB. Die Messung der Richtcharakteristik bei 30,1 GHz (vgl. Abbildung 59) zeigt einen maximalen realisierten Gewinn von 23,9 dBi bei einer breiteren Hauptkeule in der Elevation von ca. 30° aber dafür stark reduzierten Nebenkeulen und einer schmaleren Hauptkeule in der Azimutebene mit ca. 1,8° 3-dB-Öffnungswinkel. Bei dieser Senderichtcharakteristik sind die potenziell störenden Nebenkeulen im relevanten Öffnungswinkelbereich nahezu nicht vorhanden.

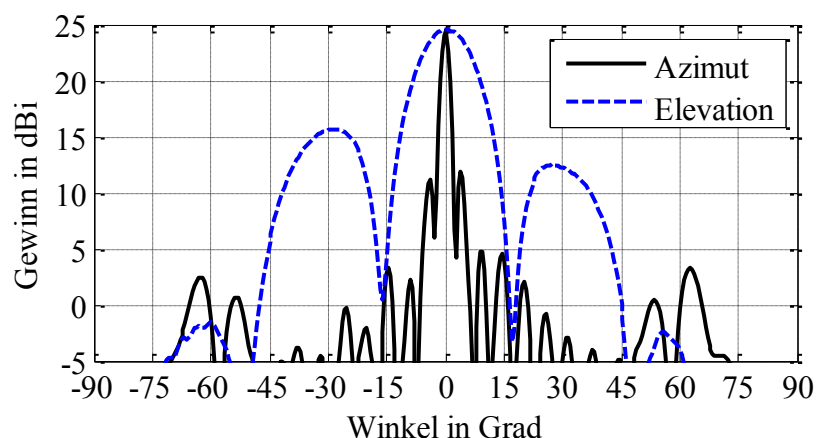


Abbildung 58: Messung der Antennenrichtcharakteristik eines 70 mm x 350 mm Paneels. Darstellung der Elevationsebene (blaue Kurve) und der Azimutebene (schwarze Kurve) bei 19,8 GHz

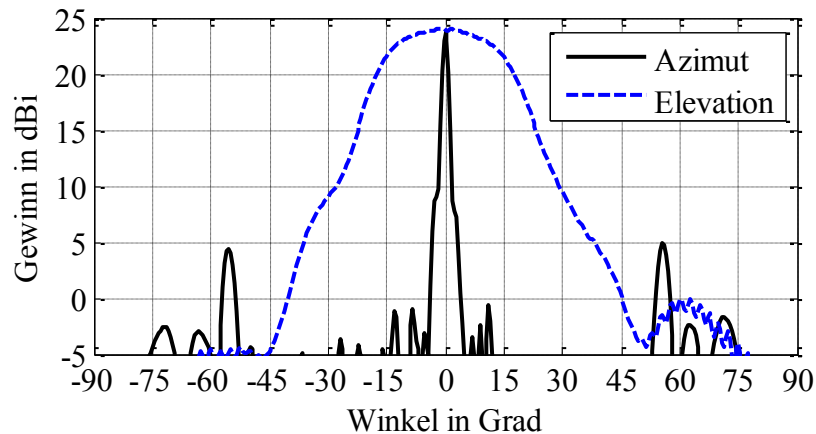


Abbildung 59: Messung der Antennenrichtcharakteristik eines 70 mm x 350 mm Panels. Darstellung der Elevationsebene (blaue Kurve) und der Azimutebene (schwarze Kurve) bei 30,1 GHz.

Die Abbildung 60 und die Abbildung 61 zeigen das Messergebnis des 350 mm langen Panels für die Direktivität, den realisierten Antennengewinn, die Kreuzpolarisationsentkopplung (XPD) und die Verluste im Downlink und Uplink-Band. Der maximale co-polarisierte Gewinn (LHCP) beträgt 24,5 dBi bei der Frequenz 19,8 GHz und 23,9 dBi bei 30,1 GHz. Die Verluste der Antenne bewegen sich im gewünschten Arbeitsfrequenzbereich immer zwischen 1-2 dB. Im relevanten Frequenzbereich von 19,7-20,2 GHz und 29,5-30,0 GHz beträgt der realisierte Gewinn, trotz einer leichten Verschiebung der Mittenfrequenz, immer mindestens 22 dBi. Es konnte eine Kreuzpolarisationsentkopplung von 15-19 dB im Downlink-Bereich und 21-32 dB im Uplink-Bereich erreicht werden.

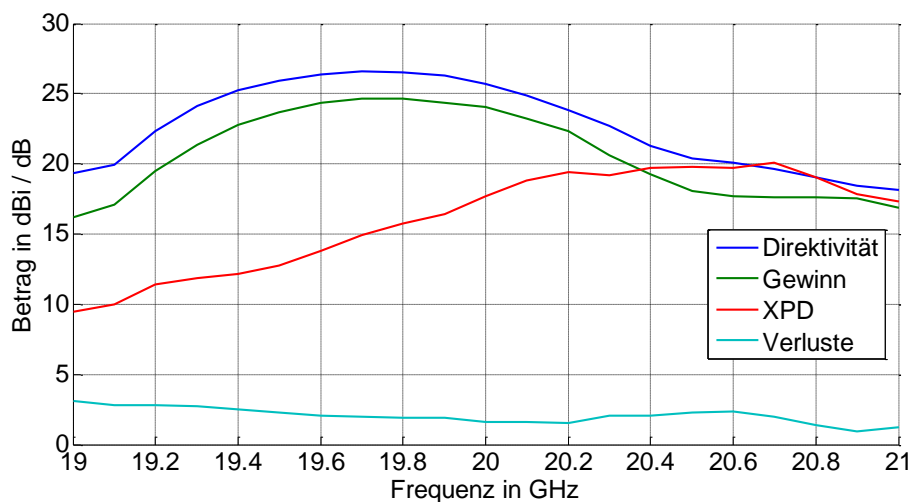


Abbildung 60: Messung des Frequenzganges im Downlink-Band (19,7-20,2 GHz) von Direktivität, Gewinn, Kreuzpolarisationsentkopplung und Verlusten eines 70 mm x 350 mm Panels

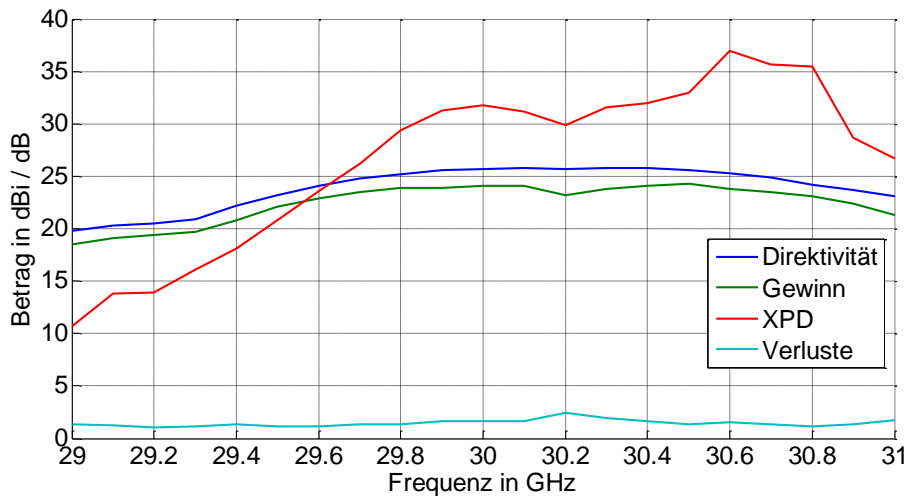


Abbildung 61: Messung des Frequenzganges im Uplink-Band (29,5-30,0) von Direktivität, Gewinn, Kreuzpolarisationsentkopplung und Verlusten eines 70 mm x 350 mm Panels

Weiterhin wurden im Projektverlauf prinzipielle Untersuchungen zu der Zielstellung vorgenommen, die Hauptstrahlrichtung eines LP-Antennenpanels in der Elevation feststehend zu neigen, um so eine flachere Montage auf dem Antennenpositionierer gegenüber der Azimutebene zu ermöglichen. Diese Strategie wurde durch eine gezielte Recherche und einen Vergleich mit dem Stand der Technik gegenüber dem Einsatz konformer Antennenstrukturen bevorzugt, da dieser eine bessere Vereinbarkeit mit der bereits erfolgreich verifizierten dualbandigen frequenzselektiven Oberflächen als Antennenapertur verspricht und somit anwendungsbezogen den größeren Erfolg ermöglicht. Dafür wurden drei verschiedene Ansätze numerisch simuliert und hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit und ihres anwendungsbezogenen Nutzens bewertet. Die effektivste Methode, eine geneigte Hauptstrahlrichtung zu realisieren, ist die mechanische Verkipfung der teilweise reflektierenden Oberfläche ( PRS) gegenüber der Antennenmassefläche um einen definierten Verkipfungswinkel  $\gamma_{PRS}$  (vgl. Abbildung 62). Die Abbildung 63 zeigt den Einfluss des Verkipfungswinkels der PRS auf die Strahlneigung der Antennencharakteristik bei einer Frequenz von 20 GHz.

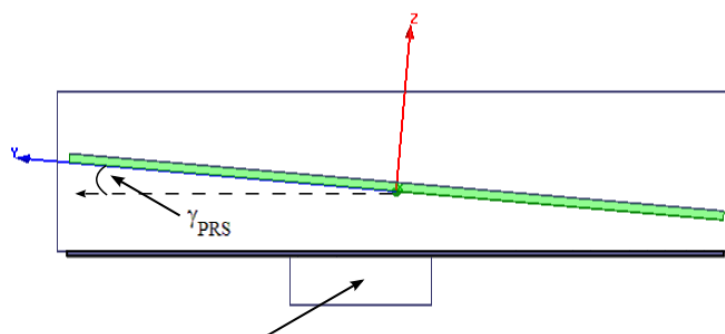


Abbildung 62: Simulationsmodell eines 60 mm x 60 mm Antennenpanels mit einer verkippten PRS (grün) gegenüber der Antennenmassefläche; in der Massefläche befindet sich ein zirkular polarisierter Schlitzstrahler, der durch einen darunterliegenden Rechteckhohlleiter gespeist wird



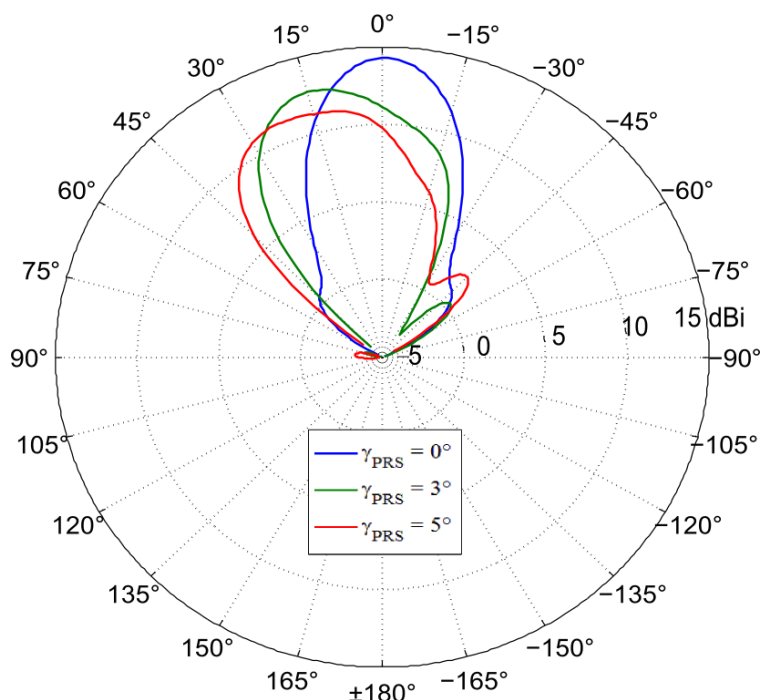


Abbildung 63: Richtdiagramme bei 20 GHz mit verschiedenen Hauptstrahlrichtungen, erzeugt durch unterschiedliche Verkippungen  $\gamma_{PRS}$

Mit der maximal erreichten Neigung der Hauptstrahlrichtung um  $24^\circ$  bei einem Neigungswinkel  $\gamma_{PRS}$  von  $5^\circ$  lässt sich eine Ersparnis der Aufbauhöhe von 2 cm erreichen. In diesem Fall beträgt die Direktivität 11,3 dBi für eine Apertur von 60 mm x 60 mm. Dieser relativ geringe Wert kommt vor allem dadurch zustande, dass diese prinzipiellen Untersuchungen mit lediglich einem Schlitzstrahler durchgeführt wurden. Es liegt nahe, dass sich die Prinzipien der Strahlneigung auch auf die Speisung mit einer Schlitzstrahlergruppe ausweiten lässt, welche sonst bei den LP-Antennenpaneelen Verwendung findet. In Abhängigkeit vom Verkippungswinkel gehen mit der Neigung auch Verluste der Direktivität bzw. des Gewinns einher. Durch eine genauere Betrachtung der Anforderungen muss ein Kompromiss zwischen Einsparung der Aufbauhöhe und Verringerung des Antennengewinns gefunden werden. In einem weiteren Ansatz wurde eine Neigung der Hauptstrahlrichtung mittels mehrerer Primärstrahler, die phasenverzögert zueinander angeregt werden, realisiert. Bei den Primärstrahlern handelt es sich um, wie bereits vorhergehend beschrieben, zirkular polarisierte Schlitzstrahler. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde zunächst der Einfluss einer fest eingestellten Phasenverzögerung zwischen zwei Primärstrahlern erprobt und bewertet. Eine Weiterverfolgung dieses Ansatzes wurde zunächst zurückgestellt, da der vorher beschriebene Lösungsweg, die besseren Ergebnisse lieferte. Im dritten Ansatz wurde eine zweilagige PRS neu entworfen, deren Grundelemente quadratische Patches sind. Mit deren Hilfe sollte die Hauptstrahlrichtung durch Veränderung der Kopplung zwischen oberer und unter Schicht der PRS geneigt werden. Mit diesem Ansatz konnte keine konstruktive Änderung der Richtcharakteristik erreicht werden, da die Kopplung durch Veränderung der PRS erfolgte und somit die Reflexionseigenschaften der Leckwellenantenne zu stark verändert wurden. Anhand der Simulationsergebnisse und Abschätzung der Realisierbarkeit wurde der Ansatz mit einer Verkippung der PRS ausgewählt und ein Antennenpaneel in Testgröße gefertigt, das im Antennenmesslabor der TU Ilmenau messtechnisch verifiziert wurde. Bis auf eine Frequenzverschiebung um ca. 0,5 GHz zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen Simulationsdaten und Messergebnissen. Zusätzlich wurde der Ansatz für eine bereits entwickelte und gefertigte dual-

bandige Antenne vermessen. Hierbei zeichnete sich ab, dass eine Verkippung der PRS zu schlechteren Ergebnissen als im monobandigen Fall führt, allerdings ist eine Neigung der Hauptstrahlrichtung grundsätzlich erkennbar. Das heißt, dass mit dem Ansatz einer verkippten PRS auch für Dualbandstrukturen eine Neigung der Hauptstrahlrichtung prinzipiell möglich ist. Es bedarf hierfür allerdings noch einiger Anpassungen und Optimierungen der PRS, damit die gewünschten Strahleigenschaften bei gleichzeitiger Neigung der Hauptstrahlrichtung erhalten bleiben.

### 2.1.7 AP2300 - Entwicklung und Optimierung Nachführverfahren

Zu den wesentlichen Ergebnissen im Bereich der Antennennachführentwicklung zählen die Konzipierung, Implementierung und Erprobung diverser Regelungsansätze zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Nachführeinheiten. Des Weiteren stand die Entwicklung generischer Modelle im Vordergrund der Arbeiten, die eine Analyse unterschiedlicher Sensor- und Aktorkonfigurationen sowie verschiedener Regelungsansätze zur Strahlnachführung ermöglichen. Sie bilden im Hinblick auf eine spätere kommerzielle Verwertung die Basis für die Erprobung unterschiedlicher Leistungsvarianten und ermöglichen damit Untersuchungen zur Überführbarkeit der entwickelten Hardware und implementierten Algorithmen der Technologiedemonstratoren in Richtung vorwettbewerblicher Produktentwicklung. Relevante Arbeitspakete waren

- AP 2300 (Entwicklung und Optimierung Nachführverfahren),
- AP 4200 (Messkampagne Antenne und Nachführung Rev #A mit realem Sat),
- AP 4300 (Integration und Evaluierung Rev #2) und
- AP 4400 (Demonstration und Abschlusspräsentation).

Für die Erprobung der Nachführalgorithmen standen im Wesentlichen die Demonstratoren der Referenzimplementierung Rev #1 zur Verfügung. Dabei handelt es sich um zwei Antennennachführeinheiten, eine mit sehr geringer Aufbauhöhe und einem mechanischen Freiheitsgrad, dem MoSaKa-Low-Profile-Demonstrator, und einer mit Parabolantenne, hohem Aufbau und zwei mechanischen Freiheitsgraden, dem MoSaKa-High-Gain-Demonstrator. Aufbauend auf der Regelungshardware des Vorgängerprojektes MoSaKa wurden erweiterte Algorithmen zur Nachführung der Antennen entwickelt und implementiert, die im Rahmen des Meilensteins MS2 in der Referenzimplementierung Rev #A mündeten.

Im weiteren Projektverlauf wurden sowohl die Regelungshardware als auch die darauf implementierten Algorithmen überarbeitet, teils neu entworfen, in Betrieb genommen und getestet. Zudem wurden während des Projektes in enger Zusammenarbeit mit den jeweiligen Projektpartnern und Industriebetrieben zwei weitere Nachführeinheiten konzipiert, entwickelt, gefertigt und mit der notwendigen Antennentechnik bestückt. Die dabei entstandenen Demonstratoren (wiederum ein LP-Demonstrator und ein HG-Demonstrator) waren Bestandteil der Referenzimplementierung Rev #2 und standen für die Erprobung der Nachführalgorithmen erst gegen Ende des Projekts zur Verfügung. Die Referenzimplementierung Rev #B umfasst alle in der zweiten Projekthälfte entstandenen Algorithmen sowohl für Rev #1 als auch Rev #2.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Arbeitsergebnisse entsprechend den einzelnen Referenzimplementierungen für die verschiedenen Demonstratoren vorgestellt. Anschließend werden die Grundkonzepte als auch die softwaretechnische Umsetzung der bereits erwähnten, weitgehend generischen Modellbibliothek vorgestellt sowie Werkzeuge, die deren Benutzung erleichtern sollen.

#### Regelalgorithmik für die HG Rev #A

Ausgangspunkt bildete die aus dem Vorgängerprojekt bestehende Geschwindigkeitsregelung des HG-Demonstrators. Diese wurde um eine Lageregelung erweitert, die unter Nutzung des Fehlersignals des analogen Phasendiskriminators (PD) bei Sichtkontakt zum Satelliten bereits eine

stabile Ausrichtung auf den Satelliten ermöglichte. Nachteil dieser Regelung war, dass längere Zeiten der Abschattung vom Satellitensignal im Allgemeinen eine Fehlausrichtung verursachten, die in der Folge aufgrund des fehlenden Satellitenkontakts nicht mehr korrigiert werden konnte. Für die anschließend notwendige Satellitensuche, die Initialisierung und diverse Parametrierungen wurden verschiedene Hilfsroutinen in der Programmiersprache C für das im Projekt MoSaKa entwickelte Controllerboard implementiert. Zudem wurde eine Benutzeroberfläche geschaffen, die eine gewisse Bedien- und Beobachtungsfunktionalität für die Controllerhardware bereitstellt. Die Leistungsfähigkeit der geschaffenen Algorithmen wurde sowohl auf dem Motion-Emulator der Testumgebung FORTE als auch auf dem Fahrzeug am realen Satelliten getestet und schließlich auf einer Zwischendemonstration dem Projektträger präsentiert.

Innerhalb des Projektes wurden im Rahmen des Arbeitspaketes 4200 für die Integration von IDU- und ODU-Signalen Protokolle festgelegt und implementiert, die für den Informationsaustausch zwischen den Einheiten zur Verfügung stehen.

Ein Schwerpunkt der Integrationsarbeiten stellte die digitale Bereitstellung der Phasendiskriminatorwerte durch die IDU dar. Ziel war dabei die digitale Berechnung der rotatorischen Lageabweichung zwischen der Antennenempfangs- und der Satellitenrichtung innerhalb der IDU auf der Grundlage der demodulierten Signale, durch den sog. digitalen Phasendiskriminator. Zu diesem Zweck wurde eine Reihe von Untersuchungen zu dessen statischen und dynamischen Verhalten durchgeführt und dokumentiert. Abbildung 64 zeigt qualitativ die normierten, berechneten Signalleistungswerte für den TE11- und den TM01-Mode.

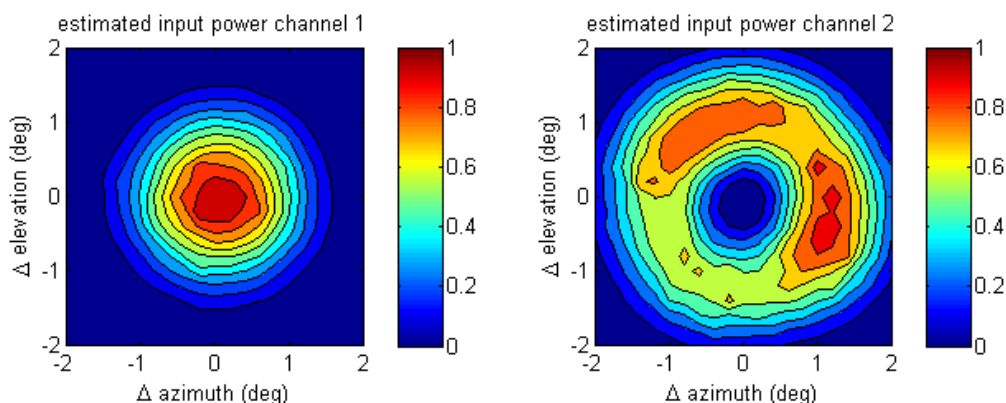


Abbildung 64: Berechnete, normierte Signalleistungen der Empfangssignale für den TE11-Mode (links) und den TM01-Mode (rechts)

Die Fehlausrichtung der Antenne kann durch einen zweidimensionalen Fehlervektor beschrieben werden, dessen Amplitude und Winkel in Abbildung 65 dargestellt sind.

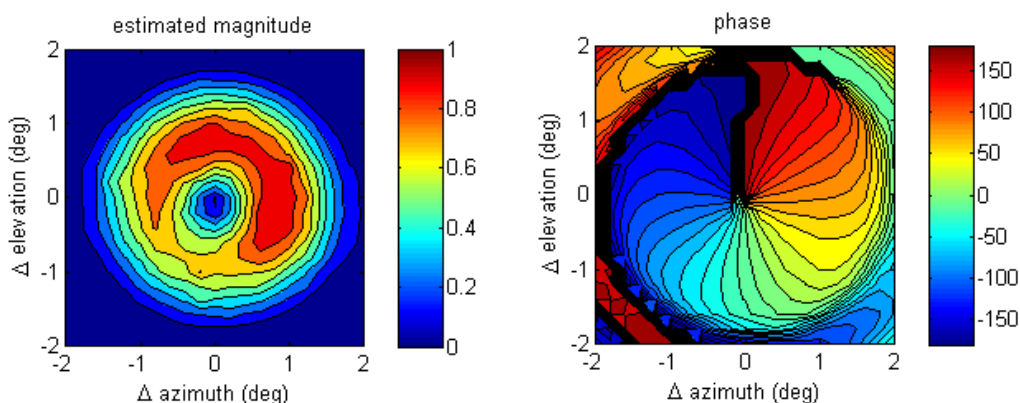


Abbildung 65: Berechneter Fehlervektor in normierter Amplitude (links) und Winkel (rechts)

Als problematisch erwiesen sich in diesem Zusammenhang die Pegelanpassungsschaltungen an den Eingängen der Inner Physical Layer Module, deren Verstärkungen nur mit geringer Abtastrate ausgelesen werden konnten. Erst mit der Referenzimplementierung Rev #2 der IDU konnten hier wesentliche Verbesserungen erzielt werden, wodurch der Einsatz zur Erprobung der Regelungsverfahren nicht sinnvoll erschien. Ebenfalls problematisch war die Unterstützung der beiden LP-Antennenpaneele durch die IDU, wodurch eine Erprobung der Regelalgorithmen der LP nicht möglich war.

Im Zug der Weiterentwicklung der Nachführverfahren wurden zwei Geräte der Rev. #1 des Phy auf 3 Empfangspfade erweitert (1x S-Band, 2x L-Band), um 2 Empfangspfade im L-Band der HG parallel demodulieren zu können und daraus den digitalen Phasendiskriminatorwert zu berechnen. Gleichzeitig können diese Geräte wie bisher ohne Einschränkungen als S-Band Terminals betrieben werden, was dem Test- und Messaufbau zusätzliche Flexibilität verleiht. Weiterhin wurde zusätzlich das Auslesen des AGC (Automated Gain Control) Werts implementiert, dieser konnte in der Rev. #1 jedoch system- bzw. hardwarebedingt nur alle 50 bis 100 ms ausgelesen werden.

Zur Unterstützung der Entwicklung und Optimierung der Nachführverfahren wurden in Messungen mit der HG-Antenne neben dem digitalen Phasendiskriminator alle anderen notwendigen Empfangsparameter in zeitlich hoher Auflösung protokolliert, so dass mit den zeitlich nachvollziehbaren Verdrehungen der Antenne die Grundeigenschaften des Systems berechnet werden können. Die Erkenntnisse aus diesen Messungen und der Messkampagne an sich wurden benutzt um Verbesserungen des Terminals Rev #2 zu erreichen.

Durch die größere Leistungsfähigkeit des Terminals Rev#2 und vor allem durch die andere Anbindung des Tuners konnte so in Rev# 2 erreicht werden, dass die AGC Werte nun synchron und latenzarm mit den Phasendiskriminatoren ausgelesen werden kann, was ganz neue Möglichkeiten für eine digitale Antennenregelung ergibt. Die Werte können nun mit bis zu 100 Hz (alle 1-2 ms) ausgelesen werden.

### Regelalgorithmik für die LP Rev #A

Die LP-Antenne der Referenzimplementierung Rev #1 verfügt über einen mechanischen Freiheitsgrad, der eine Drehbewegung der Antenne um die Azimutachse erlaubt. In Elevationsrichtung verfügt die Antenne über ein sehr breites Pattern und kann durch entsprechendes Verschalten der einzelnen Antennenpaneele innerhalb der IDU bereits dem Satelliten elektronisch nachgeführt werden. Für die Nachführeinheit wird daher davon ausgegangen, dass ausschließ-

lich die Ausrichtung der Azimutrichtung gegenüber dem Navigationskoordinatensystem nachge-  
regelt werden muss.

Im ersten Projektabschnitt wurde für die LP-Antenne eine einfache Geschwindigkeitsregelung  
implementiert, die eine Drehung des Fahrzeuges um die Azimutachse kompensiert. Drehungen  
um andere Drehachsen wurden dabei unberücksichtigt gelassen. Die dabei entstandene Rege-  
lung wurde im Rahmen der Zwischendemonstration dem Projektträger präsentiert.

### Entwicklung generisches Modell Nachführverfahren-Antenne

Auf den Ergebnissen des Projektes MoSaKa basierend wurden mit dem Software-Werkzeug  
Matlab/Simulink, speziell der Toolbox SimMechanics, verschiedene Modelle entwickelt, die es  
auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen erlauben, das Verhalten des Nachführsystems und der  
Antenne wirklichkeitsnah simulativ zu untersuchen. Die Modelle zeichnen sich durch einen weit-  
gehend generischen Aufbau aus, der es ermöglicht, durch geeignete Parametrisierung diverse  
Hardwarekomponenten in unterschiedlichen Leistungsklassen nachzubilden. Die Parametrisie-  
rung der einzelnen Modellkomponenten erfolgt auf der Grundlage von Matlab-Skripten. Inner-  
halb des Projektes wurden bereits für wesentliche Komponenten derartige Matlab-Skripte ange-  
legt, in denen typische Parameter und Optionen zur Modellierungstiefe voreingestellt sind. Die  
Parametrisierung der entsprechenden Modelle erfolgte auf der Grundlage von Datenblättern  
und in enger Zusammenarbeit mit den einzelnen Arbeitsgruppen am IIS sowie den Projektpart-  
nern der Technischen Universität Ilmenau. Zu diesem Zweck wurden an den verschiedenen  
Standorten Experimente durchgeführt, um fehlende Parameter bzw. Kennfelder ermitteln zu  
können.

Eine Gesamtkonfiguration, die mit der vorliegenden Modellbibliothek untersucht werden kann,  
besteht immer aus einem mechanischen Aufbau, diverser Sensorik, Aktuatorik und einem Regler  
(siehe Abbildung 66). Zur konkreten Untersuchung einer gewünschten Hard- und Software-  
konfiguration müssen als erstes alle relevanten Modelle miteinander verschaltet und die zugehö-  
rigen Parameter geladen werden. Aufbauend auf den so definierten Modellen können dann  
Simulationen durchgeführt werden, um anhand konkreter Testszenarien das Verhalten der Kon-  
figuration zu untersuchen. Innerhalb des Projektes wurde eine Softwareumgebung in Matlab  
entwickelt, mit deren Hilfe sich alle diese Schritte skriptbasiert vornehmen lassen. Hierzu wird ein  
Steuerskript erstellt, das prinzipiell zwei Teile beinhaltet, einen Konfigurationsteil für die Hard-  
und Softwarezusammenstellung und einen Teil zur Festlegung des Testfalls, in dem die Model-  
lierungsebene, alle Simulationsparameter und das Testszenario definiert werden. Im Konfigurati-  
onsteil wird zunächst ein Basismodell für den mechanischen Aufbau gewählt. Für alle im Projekt  
betrachteten Demonstratoren der Rev #1 stehen entsprechende Modelle zur Verfügung. An-  
schließend erfolgt die Festlegung der zu betrachtenden Sensoren, Aktuatoren und Regler. Für  
diesen Zweck wurde eine Schnittstelle geschaffen, die für jeden Sensor-, Aktuator- und Regler-  
typ eine entsprechende Parametrisierung der generischen Modelle anhand der vorgefertigten  
Parameterskripte vornimmt.

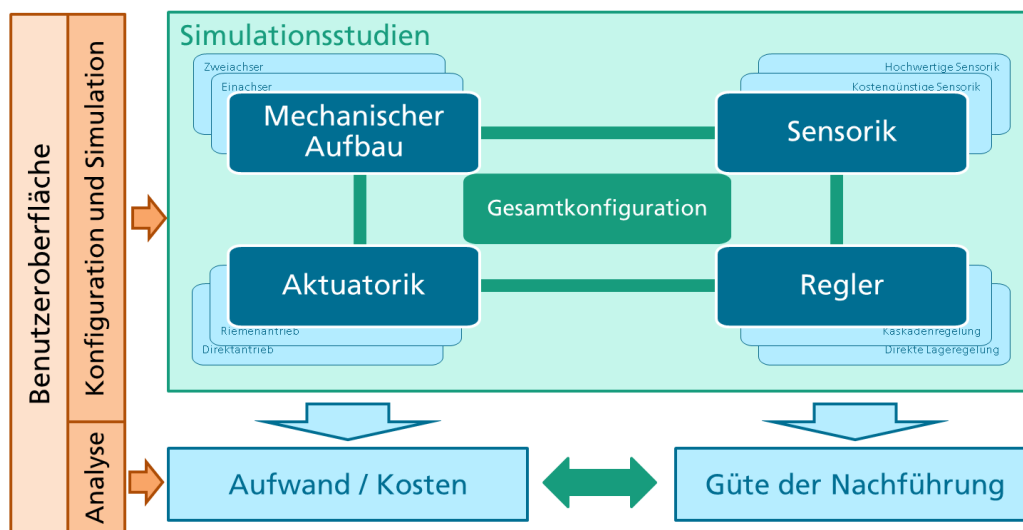


Abbildung 66: Konzept der generischen Modellbibliothek und deren Werkzeuge zur Konfiguration und Analyse

Im zweiten Teil des Steuerskripts wird das Simulationsszenario festgelegt. Hierzu werden der Satellit, die Fahrbahn- und Fahrzeugdaten, die Wetterdaten und die GPS- und Magnetfeldmodelle ausgewählt. Außerdem lassen sich auch die Modellierungstiefen der einzelnen Komponenten abweichend von den Standardwerten der Parameterdateien festlegen.

Zur vereinfachten Erzeugung derartiger Steuerskripte wurde eine Benutzeroberfläche entworfen und implementiert, in der sich die wesentlichen Einstellungen treffen lassen. Die Konfigurationsdateien lassen sich fortan mit deren Hilfe automatisch generieren (siehe Abbildung 67 und Abbildung 68).

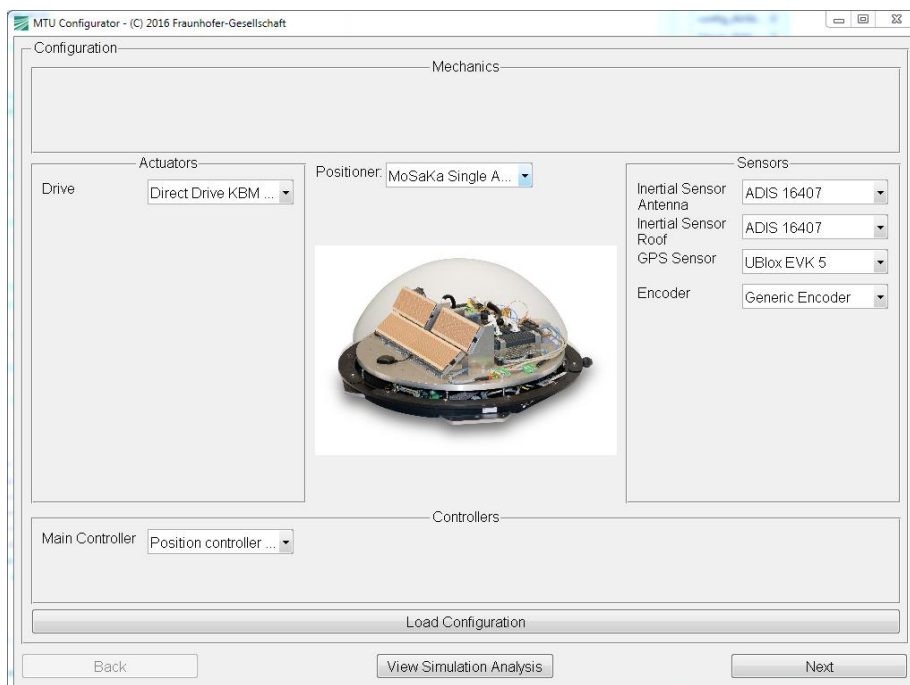


Abbildung 67: Benutzeroberfläche zur Wahl der Soft- und Hardwarekonfiguration



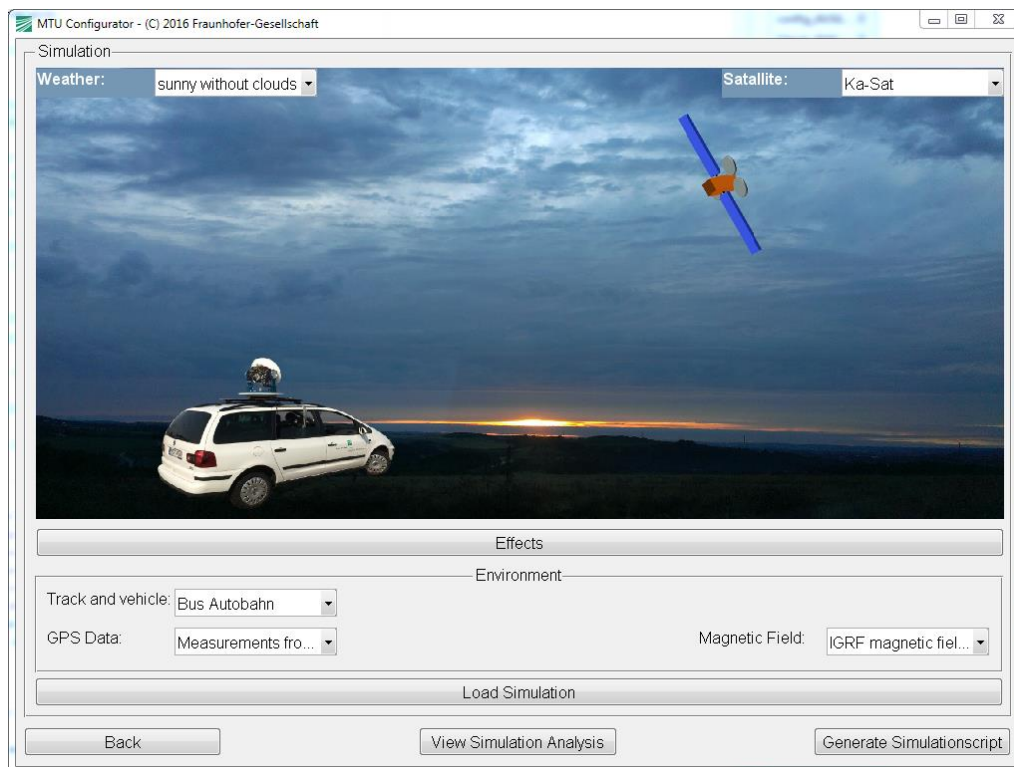


Abbildung 68: Benutzeroberfläche zur Festlegung des Simulationsszenarios

Die Benutzeroberfläche umfasst auch ein Auswertungswerkzeug, in dem sich diverse Güteindikatoren verschiedener Simulationsläufe und ausgewählte Parameter der genutzten Hardwarekonfigurationen vergleichen lassen. Abbildung 69 zeigt die Benutzeroberfläche für zwei ausgewählte Konfigurationen. Hierzu wurden entsprechende Güteindikatoren festgelegt und entsprechende Auswerteskripte implementiert.

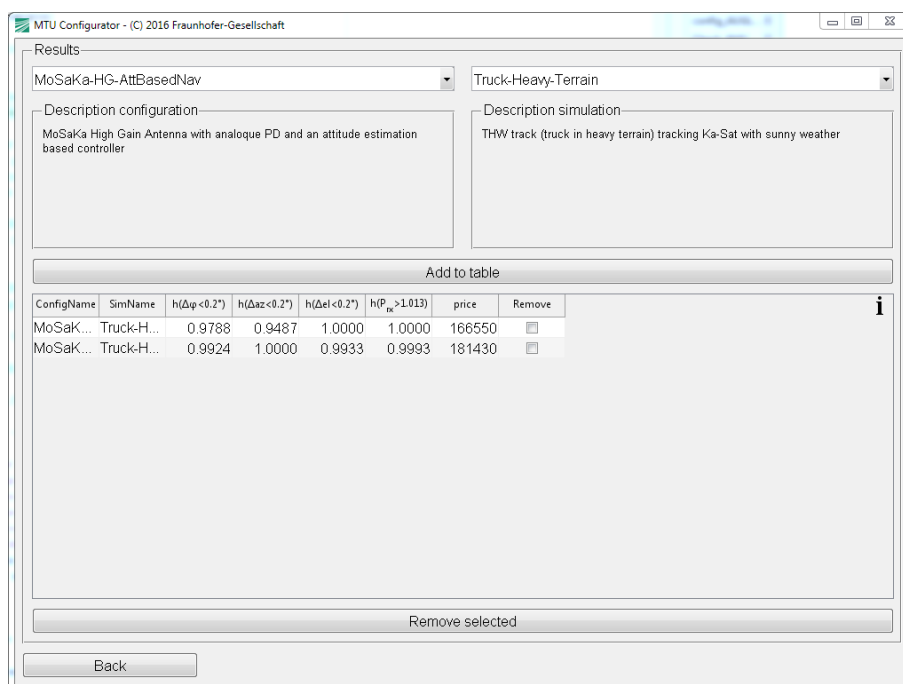


Abbildung 69: Benutzeroberfläche des Auswertewerkzeugs

## Regelalgorithmik für die HG Rev #B

Für die zweite Projekthälfte wurde planmäßig eine neue Controller-Hardware beschafft und in Betrieb genommen. Grund hierfür waren die Beschränkungen der bisher eingesetzten Hardware und der notwendige, hohe Implementierungsaufwand. Zum Einsatz kam ein leistungsstarkes Controllerboard, das eine effiziente und modellgetriebene Entwicklung von Algorithmen im Sinne des Rapid-Control-Prototyping ermöglicht. In Simulink entworfene und am Modell erprobte Algorithmen lassen sich auf diese Weise durch den Einsatz der Code-Export-Funktionalität direkt auf den Controller bringen und deren Funktionalität auf einem Steuerungsrechner mit Hilfe vorgefertigter grafischer Elemente beeinflussen und beobachten.

Zu Beginn der zweiten Projekthälfte erfolgte außerdem die Montage der neu entwickelten Hochfrequenztechnik (HF-Technik) durch den Projektpartner HMT. Dadurch konnte die gesamte HF-Einheit kompakter gestaltet werden. Zudem verschwand die Controllerplatine von der Antennenplattform, wodurch die einzelnen Komponenten auf der Antennenplattform neu positioniert werden konnten, mit dem Ziel, die bisherige Unwucht der Antenne zu verringern. Hierdurch wurde konstruktiv eine weitgehende Entkopplung der rotatorischen Bewegung von den auftretenden translatorischen Beschleunigungen erzielt. Die einwirkenden Störungen bei der Antennenausrichtung konnten damit deutlich reduziert werden.

Aus Sicht der Algorithmen entstanden zwei grundsätzlich verschiedene Regelungskonzepte. Zunächst wurde eine direkte Satellitenregelung implementiert, die – ähnlich der bereits vorhandenen Regelung auf der alten Controller-Hardware – ohne eine explizite Lageschätzung auskommt. Im Unterschied zur bisher vorhandenen Regelung auf Basis der alten Controller-Hardware wurde nun die Geschwindigkeitsregelung der Achsantriebe genutzt, um höhere Stellgeschwindigkeiten zu erzielen. Wie schon bei der Regelung gemäß Rev #A wirkt sich die hier fehlende Lageschätzung jedoch nachteilig aus, wenn beispielsweise durch Drifteffekte während einer längeren Abschattungsphase das Satellitensignal nicht mehr empfangen werden kann. Ohne eine erneute Satellitensuche ist es dann nicht möglich, den Satelliten wiederzufinden.

Aus diesem Grund wurde eine neue Regelung entworfen, implementiert und getestet, die die Antenne entsprechend einer aktuellen Lageschätzung nachführt. Damit bestand zunächst die Aufgabe, eine Lageschätzung zu entwickeln, zu parametrisieren und zu erproben, die unter Einbeziehung aller aktuell verfügbaren Sensorinformationen entsprechend deren aktueller Güte eine bestmögliche Schätzung für die rotatorische Lage der Antenne berechnet. Umgesetzt wurde die Lageschätzung mithilfe eines adaptiven, erweiterten Kalman-Filters, das auf der Grundlage von Quaternionen die rotatorische Lage der Antenne schätzt. Problematisch zeigten sich für die Schätzung vor allem die Messwerte der Magnetfeldsensorik, die aufgrund zahlreicher Störeinflüsse keine zufriedenstellenden Messergebnisse lieferten. Um dennoch eine Lageschätzung auch bei Verlust des Satellitensignals sicherstellen zu können, wurde ein GPS-Empfänger integriert und in das Filter mit eingebunden. Mit diesem Regelungskonzept ist es daher prinzipiell möglich, auch nach einer längeren Abschattung, den Satelliten während der Fahrt wieder zu finden.

Die innerhalb des Projektes entworfenen Regelungsverfahren wurden auf der Testanlage FORTE und auf einem PKW mit dem Satelliten „Eutelsat KA-SAT 9A“ getestet und in Teilen bei der Abschlussdemonstration präsentiert. Bei den Versuchen wurde aufgrund des deutlich höheren hardwaretechnischen sowie organisatorischen Aufwands zugunsten des analogen Phasendiskriminators auf die Nutzung des digitalen Phasendiskriminators (siehe Abschnitt zur Integrierung der IDU-Signale) verzichtet.

Für den Einsatz am realen Satelliten mussten zuvor die angesprochenen Regelungsverfahren um einfache Achsregelungen und um eine Satellitensuche erweitert werden, um den Satelliten auch bei weitgehend beliebiger Fahrzeuglage initial finden zu können. Des Weiteren traten bei den durchgeführten Testfahrten auch bei der Regelung mit Lageschätzung teilweise Probleme auf,

den Satelliten direkt nach einer Abschattung wiederzufinden. Es wurde daher ein weiterer Suchalgorithmus entwickelt und implementiert, der das Wiederfinden des Satelliten deutlich erleichterte.

Nachfolgend wird exemplarisch der Aufbau des Regelungskonzeptes mit Lageschätzung eingehend beschrieben. Abbildung 70 zeigt den vollständigen Regelkreis mit allen Aktuatoren, Sensoren und Verarbeitungseinheiten. Der auf einem beweglichen Fahrzeug angebrachte Positionierer

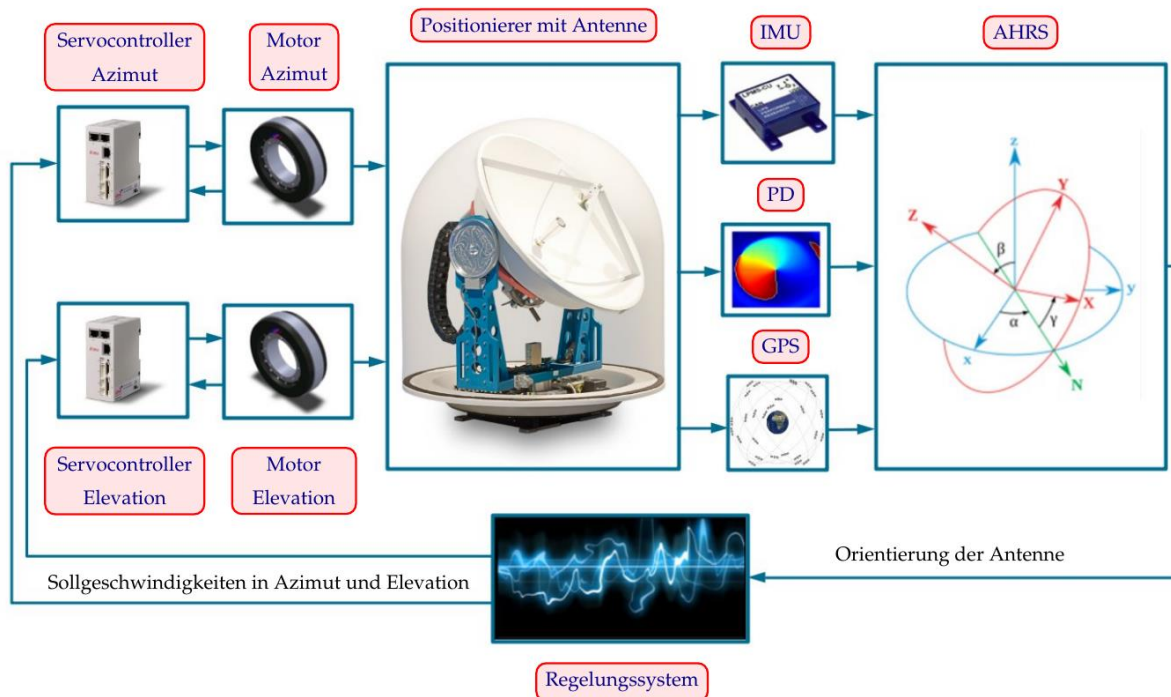


Abbildung 70: Vollständiger Regelkreis mit allen Aktuatoren, Sensoren (IMU - Trägheitsmesseinheit, PD - Phasendiskriminator, GPS – Globales Positionsbestimmungssystem) und Verarbeitungseinheiten wie dem Regelungssystem und dem Attitude and Heading Reference System (AHRS)

mit der dort befestigten Antenne stellt die eigentliche Regelstrecke dar. Der Positionierer kann die Ausrichtung der Antenne in den zwei Freiheitsgraden Azimut und Elevation manipulieren. Mit Hilfe dieser Freiheitsgrade kann die Antenne zum Satelliten ausgerichtet werden und damit zur sogenannten Sichtlinie (Line-of-Sight) deckungsgleich gebracht werden. Zum Aktuieren beider Freiheitsgrade werden zwei bürstenlose Gleichstrommotoren verwendet. Teil der Aktorik sind ebenfalls die verbauten Servocontroller, welche mit Hilfe der Sensorinformationen aus beiden Encodern den Positionierer in beiden Freiheitsgraden regeln und kommandierte Sollgeschwindigkeiten realisieren. Diese unterlagerte Regelung läuft mit einer Taktrate von 16 kHz und ermöglicht somit die schnelle Realisierung von Sollgeschwindigkeiten, die vom Regelungssystem zur Nachführung kommandiert werden. Mit Hilfe des Attitude-Heading-Reference-Systems wird die Ausrichtung der Antenne zum Satelliten geschätzt. Dazu müssen die zuvor dargestellten Sensoren (IMU, Phasendiskriminator, GPS) geeignet kombiniert werden (Sensorfusion), um jeweils ihre Schwächen ausgleichen und Fehler kompensieren zu können. Das AHRS ist ein Beobachter zur Bestimmung der Ausrichtung der Antenne, da diese nicht direkt gemessen werden kann, sondern lediglich teilweise über die Messgrößen erfasst wird. Das Regelungssystem ist dafür zuständig, eine geeignete Rückführung basierend auf den Informationen über die aktuelle Ausrichtung der Antenne aus dem AHRS zu bestimmen. Diese Rückführung muss dafür

sorgen, dass die Antenne bei einer vorgegebenen Sollausrichtung stabilisiert wird. Bei der Bestimmung der dafür erforderlichen Soll Drehraten des Positionierers in Azimut und Elevation müssen dessen kinematische Beziehungen berücksichtigt werden.

Darüber hinaus wurde eine Störkompensation auf Grundlage der gemessenen Drehraten (aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht in Abbildung 70 mit enthalten) realisiert. Da die Antenne im nachgeführten Idealfall keine rotatorischen Bewegungen ausführen sollte, können die gemessenen Drehraten als Störungen interpretiert werden, die durch Bewegung des Positionierers exakt kompensiert werden können. Hierfür ist es notwendig die kinematische Beziehung zwischen Aktordrehraten des Positionierers und den körperfesten Drehraten der Antenne (gemessen durch die Gyroskope) zu bestimmen und zu invertieren. Diese kinematische Beziehung ergibt sich in Abhängigkeit vom verwendeten Positionierer aus der Kinematikgleichung für Rotationsmatrizen

$$\dot{R}(q, \dot{q}) = \omega \times R(q)$$

wobei  $q$  die Aktorwinkel des Positioniers sind und  $R(q)$  die Rotationsmatrix, welche die Ausrichtung der Antenne in Abhängigkeit von den Aktorwinkeln beschreibt. Die körperfesten Drehraten  $\omega$  lassen sich direkt mittels der Gyroskope messen. Da  $\dot{R}(q, \dot{q})$  linear in  $\dot{q}$  ist, kann diese Gleichung wie folgt nach  $\omega$  umgestellt werden

$$\omega = J(q)\dot{q}$$

Dies bedeutet, dass die körperfesten Drehraten der Antenne sich aus einer konfigurationsabhängigen Linearkombination der Stellwinkelgeschwindigkeiten ergeben. Demnach kann ein gemessenes  $\omega$  mittels der Inversen von  $J(q)$  im nicht-singulären Fall durch den Positionierer kompensiert werden.

### Inbetriebnahme der dreiachsigen HG Rev #B

Zur Inbetriebnahme der dreiachsigen HG-Antenne, welche leider erst zum Projektende zur Verfügung stand, konnte auf die Rapid-Control-Prototyping Plattform, welche schon für die zweiachsige HG-Antenne beschafft wurde, zurückgegriffen werden. Dies ermöglichte die schnelle Integration des Gesamtsystem, sodass die zuvor beschriebenen Regelungskonzepte der zweiachsigen HG-Antenne nur angepasst und erweitert werden mussten, um sie für die dreiachsige HG-Antenne zu verwenden. Zur Erprobung dieser Implementierungen wurde die dreiachsige HG-Antenne auf den Bewegungsimulator montiert und ein maritimes Manöver abgespielt. Zur Bestimmung der absoluten Ausrichtung der Antenne wurden die Stellwinkel des Bewegungsimulators und des Positionierers aufgezeichnet und kinematisch verrechnet.

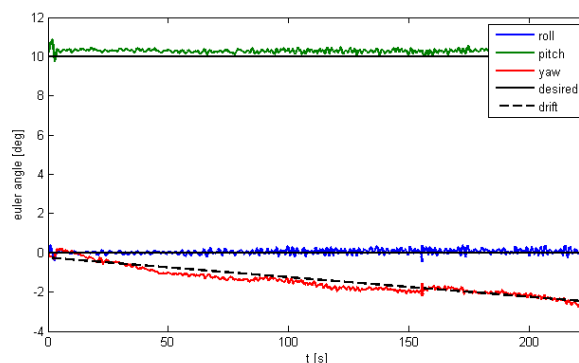


Abbildung 71: Ausrichtung der Antenne in Eulerwinkeln während eines maritimen Manövers

Abbildung 71 zeigt die Ausrichtung der Antenne in Eulerwinkeln, wobei die gewünschte Sollausrichtung bei 10 Grad in Elevation festgelegt wurde. Da konstruktionsbedingt bei der dreiachsigen HG-Antenne der analoge Phasendiskriminator nicht verwendet werden konnte und der digitale Phasendiskriminator nicht bereit stand, basiert die Lageschätzung lediglich auf den Messwerten der Beschleunigungssensoren und Gyroskope. Dies hat zur Folge, dass ein absolutes Offset der Ausrichtung (verursacht zum Beispiel durch leichte Verdrehung bei der Montage der IMU) nicht kompensiert werden kann. Darüber hinaus steht in Azimutrichtung kein Stützvektor zur Verfügung, der es ermöglichen würde den Offset der Gyroskope zu bestimmen. Dies hat zur Folge, dass die Ausrichtung der Antenne in Azimutrichtung mit der Zeit wegläuft. Die kinematischen Beziehungen zur Störkompensation lassen sich aus den oben stehenden Ausführungen für die dreiachsige HG-Antenne ableiten.

### Regelalgorithmik für die LP Rev #B

Darauf aufbauend erfolgte der Entwurf und die simulative Erprobung einer verbesserten Regelstrategie für die Nachführung der Low-Profile-Antenne. Auch hier kommt eine Kaskadenregelung zum Einsatz. Auf unterster Ebene befinden sich die Strom- und Achsdrehgeschwindigkeitsregelung des Azimut-Antriebs. Darauf aufsetzend wurde eine Regelung der inertialen Drehgeschwindigkeit implementiert (open-loop-Modus), die durch eine Positionsregelung ergänzt wird (closed-loop-Modus). Für die Nachführung gibt es zwei Betriebsmodi. Im open-loop-Betrieb nutzt die Nachführung nur die Antriebsregelungen und die inertielle Geschwindigkeitsregelung. Im closed-loop-Betrieb greift sie hingegen auf alle Regelkreise zurück.

Da die Antenne selbst – im Gegensatz zur High-Gain-Antenne – kein Signal für die Abweichung der Antennenausrichtung zur Verfügung stellt, musste ein zusätzliches Scanverfahren implementiert werden. Hierzu wurde der Antennenregelung auf Geschwindigkeitsebene eine sinusförmige Schwenkbewegung überlagert, mithilfe derer die Antennenposition relativ zur Satellitenposition geschätzt werden kann. Ist die Empfangsstärke über einen gewissen Zeitraum ausreichend hoch, wird die überlagerte Schwenkbewegung abgeschaltet und in den open-loop Modus gewechselt bis die Signalstärke (beispielsweise durch das Wegdriften der Antennenposition) unter einen entsprechenden Schwellwert absinkt. Erst dann wird der closed-loop-Betrieb wieder aufgenommen. In Abbildung 72 ist das verwendete Simulink-Modell des MoSaKa-LP-Demonstrators dargestellt.

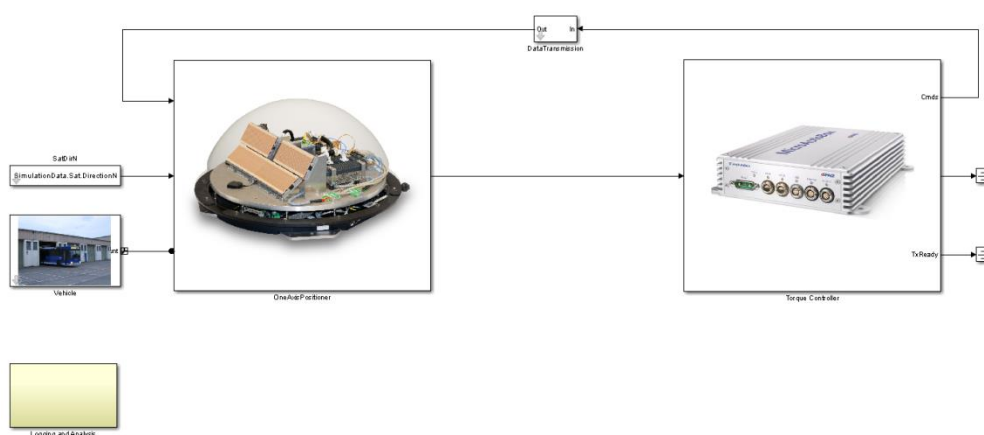


Abbildung 72: Simulink-Modell des MoSaKa-LP-Demonstrators mit Regler auf dem THW-Bus

Abbildung 73 zeigt beispielhaft die Abweichung der Antennenausrichtung in Azimutrichtung für eine Simulation der Low-Profile-Antenne auf dem Dach eines Busses bei der Fahrt auf einer Autobahn.



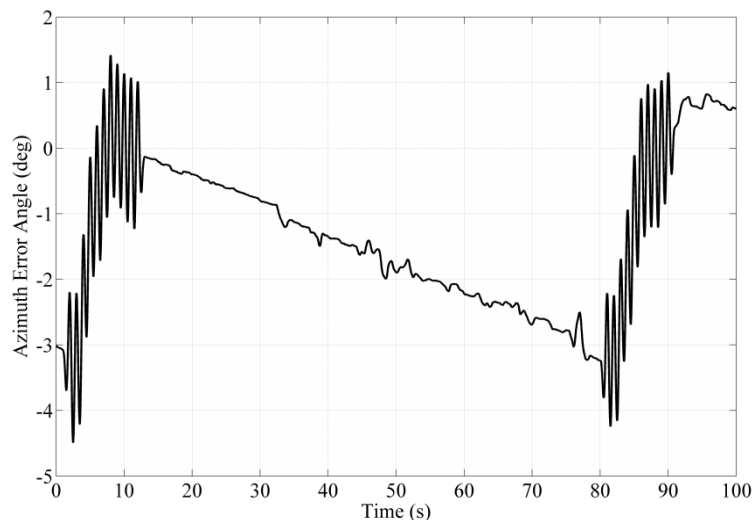


Abbildung 73: Simulierter Regelfehler der Low-Profile-Antenne bei einer Autobahnfahrt auf einem Bus und einer initialen Fehlausrichtung von  $3^\circ$

Die Umsetzung auf dem MoSaKa-LP-Demonstrator (Rev #1) konnte innerhalb des Projektes nicht durchgeführt werden, da die entsprechenden Signale zur Messung der Empfangsstärke (beispielsweise SNR-Schätzung) nicht in ausreichend guter Qualität durch die IDU zur Verfügung gestellt werden konnten.

Bei dem neu angeschafften LP-Demonstrator (entsprechend Rev #2) kam ein Riemenantrieb in Verbindung mit einem bürstenlosen Gleichstrommotor zum Einsatz. Für die Umsetzung der Regelungsalgorithmen wurde eine Controller-Hardware geplant, beschafft und in Betrieb genommen. Aus Kostengründen und aufgrund des geringen freien Bauraums wurde hierbei eine mikrocontrollerbasierte Lösung angestrebt, für die innerhalb des Projektes eine Software-Umgebung geschaffen wurde, die es ebenfalls erlaubt im Sinne des Rapid-Control-Prototyping-Ansatzes die Möglichkeiten des Matlab-Code-Exportes zu nutzen. Zudem wurde ein Steuerprogramm implementiert, mit dem Kommandos an den Positionierer gesendet und Messwerte während des Betriebs dargestellt und überwacht werden können. Als prinzipieller Funktionsnachweis wurde beispielhaft eine lokale Positionsregelung auf der Grundlage der Encoderwerte implementiert und bei der Abschlussdemonstration dem Projektträger präsentiert.

### 2.1.8 AP3100 - Entwicklung von Testverfahren NWE-Rev #1

Die Testanlage für mobile Satellitenkommunikationsterminals auf der Fraunhofer Facility for Over-the-Air Research and Testing – FORTE, die zum Teil im Projekt MoSaKa errichtet wurde, sollte von den bisher durchführbaren Einzeltest hin zu einer umfassenden Testanlage zur kompletten Evaluierung von Terminals und Satellitennetzwerken in Form eines Netzwerkevaluators (NWE) erweitert werden.

Als erster Schritt wurden in Rev#1 die Einzeltest zu einem kompletten Testverfahren zusammengeführt. Dazu wurden die Messgrößen die auf der Testanlage erhoben werden können hinsichtlich ihrer Aussagekraft und Anwendbarkeit auf verschiedene Systeme untersucht. Als Anhaltspunkt wurden hierbei die bisher existierenden Normen und Standards für Tests von mobilen Terminals im Ku- und Ka-Band (z.B. [40], [41]) genutzt und daraus Testfälle für FORTE generiert. Die vorhandenen Standards spezifizieren allerdings nur die Grenzwerte die eingehalten werden müssen, so dass die Evaluierung selbst nicht spezifiziert ist.



Die Testverfahren für die Umgebungsvariablen und die Messeinrichtungen auf Hardwareebene wurden an der „Facility for Over-the-Air Research and Testing“ (FORTE) in der sogenannten VogelherdApp implementiert. So können komplexe Tests von Satelliten Kommunikationssystemen mit reproduzierbarer Umgebung und Konfigurationen verwaltet werden. Zur Spezifikation der Schnittstellen zwischen der Datenbank und den gerätespezifischen Konfigurations- und Monitoringtreibern (CMT) wird von der VogelherdApp das Netzwerkprotokoll Simple Object Access Protocol (SOAP) verwendet. Hierzu wurde mit Hilfe von Web Services Description Language (WSDL) der Beschreibungssprache für auf SOAP-basierte Schnittstellen, mehrere gerätespezifische Konfigurationsprotokolle definiert. Wodurch eine synchrone Ansteuerung der verschiedenen Emulatoren (Bewegungsemulator, Kanalemulator und GPS-Emulator) ermöglicht wurde.

Über die Terminaltests hinaus wurde die Software KASYMOSA-spezifisch erweitert, durch eine SNMP Schnittstelle die Zustandsdaten der unterschiedlichen Layer zeitsynchron abfragen und speichern konnte. Diese Schnittstelle wurde genutzt um den Systemzustand der beteiligten Modems sehr detailliert mitloggen zu können. Als Gegenstelle wurden die Teile der IDU ebenfalls mit einer SNMP-Schnittstelle versehen und eine entsprechende Management Information Base (MIB) spezifiziert.

Um weitere Daten zum Verhalten der Nachführung der Antenne zu erhalten wurde in der Pointing-Akquisition-and-Tracking Hardware (PAT) aus AP2300 welche zur Regelung der Nachführung verwendet wird, eine Schnittstelle zur Ansteuerung und Datenakquise umgesetzt. Hierbei wurde die Ansteuerung und Konfiguration über ein Telnet-Protokoll realisiert. Die Datenakquise der Sensorwerte erfolgte per UDP Datenstrom. Für diesen seriellen Datenstrom wurde ein Datenformat mit Hilfe der Schnittstellen-Beschreibungssprache Protocol Buffers (protobuf) entwickelt. Die erfassten Daten bestanden aus den Winkelbeschleunigungen, Lage, Richtung und Position sowie Phaseninformation und Signalstärke des empfangenen Signals.

Für die Konfigurationsdaten wurde XML oder, im Falle der PAT, ein Text-basiertes Dateiformat spezifiziert. Die notwendigen Profile für die Umweltemulationen wurden in einer jeweils gerätespezifischen Datenbank hinterlegt und die zeitliche Synchronisierung erfolgte über einen NTP-Server, der eine Synchronität von 1 ms auf der gesamten Anlage ermöglichte. Die Speicherung der Daten wurde in aggregierter Form mit MatLab realisiert. Hiermit wurden auch Auswertungsmodule umgesetzt.

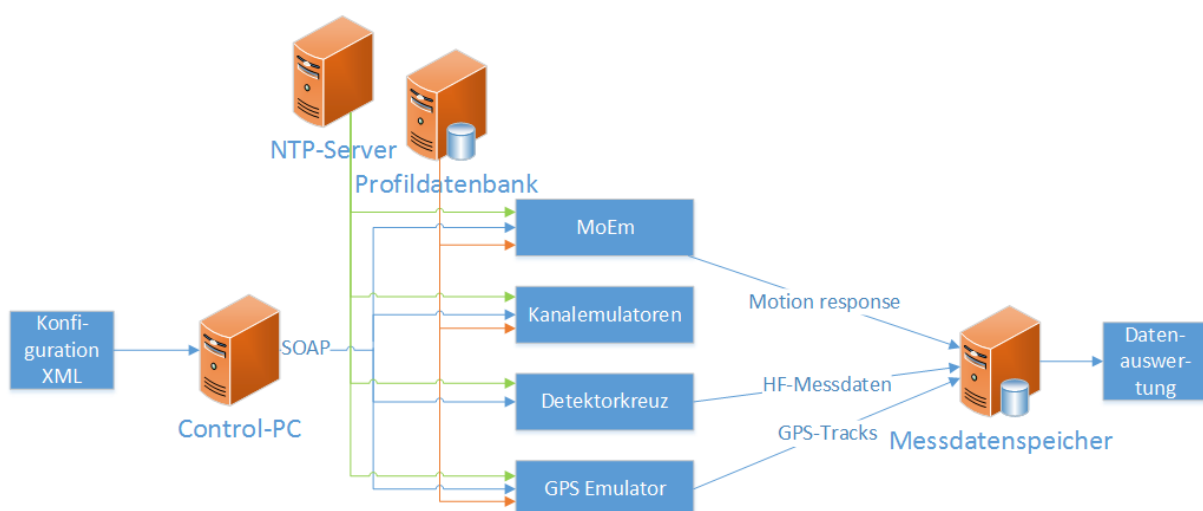


Abbildung 74: Darstellung der Ansteuerung und Datenverarbeitung in den Kernkomponenten des NWE Rev #1

Am Ende des Arbeitspakets stand eine funktionsfähige Software zur synchronisierten Ansteuerung aller Emulatoren und Messgeräte an FORTE zur Verfügung welche diverse Testszenarien mit unterschiedlich hohen Anforderungen an die Terminals umsetzen konnte und KASYMOSA-spezifische Schnittstellen deren Messgrößen vor allem für die Weiterentwicklung der einzelnen Systemteile von Relevanz waren.

### 2.1.9 AP3200 - Entwicklung von Testverfahren NWE Rev #2 – erweitertes Systemkonzept

Im AP3200 wurden die Testcases um Ende-zu-Ende Kommunikation auf der Applikationsebene ausgedehnt. Durch Einbinden von Traffic Generators and Analyzers (TGA) wurden die Messmöglichkeiten dahin gehend erweitert dass die in AP3300 untersuchten und definierten Metriken für vollständige end-to-end Tests in die Testszenarien aufgenommen werden konnten.

Die TGAs können Delay, Jitter und Throughput auf Paketebene messen. Die Applikationen der TGAs sind IPv6 fähig und können mit dem spezifizierten Ressourcenreservierungsprotokoll die QoS-Fähigkeiten des KASYMOSA-Systems verwenden. Dadurch konnten in der Rev #2 nicht nur die physikalischen Parameter der Antenne und die Leistungsfähigkeit der Nachführung untersucht werden, sondern auch gesamtsystemspezifische Parameter wie die Ressourcenallokation und die Auswirkungen bis zur Applikationsebene.

Mit einbinden der TGAs zeigten sich allerdings die Schwächen des SOAP-basierten Protokolls, welches zu langsam und ineffizient war. Um die Konfigurationen und Datenströme besser zu managen wurden Apache Zookeeper und Apache Kafka in der Anlage implementiert. Diese Lösungen sind aus dem Big-Data Umfeld bekannt und werden für das Konfigurationsmanagement (Zookeeper) vieler Einzelsysteme und die Weiterleitung der anfallenden Messdaten (Apache Kafka) verwendet (siehe Abbildung 75). Beide Softwaresysteme sind auf Fehlertoleranz und Skalierbarkeit ausgelegt welches bei langen und komplexen Gesamtsystemtests von großem Nutzen ist.

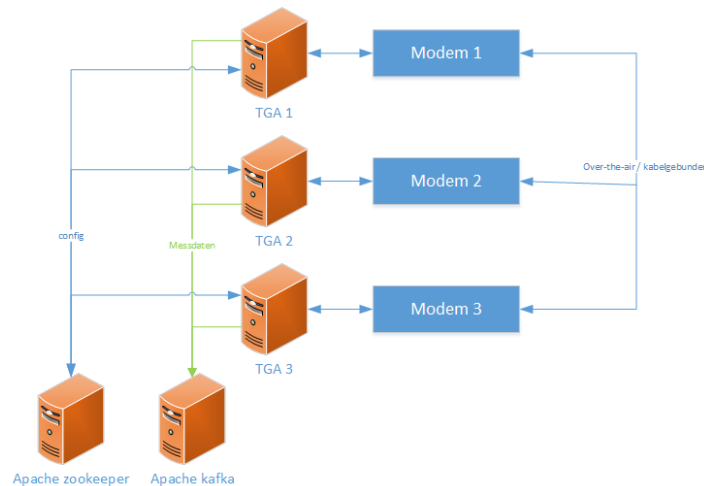


Abbildung 75: Konfigurationsmanagement und Datenhandling im NWE Rev #2

Die in den TGAs verwendeten Teststimuli und Metriken werden ausführlich im AP3300 beschrieben.

### 2.1.10 AP3300 - Entwicklung von QoS-Testverfahren und Metriken (end-to-end Test)

Im Rahmen einer Bachelorarbeit wurden Konzepte zur Messmetrik für QoS-Testverfahren aufgestellt. Dabei wurden zunächst die Auswirkungen des Datenverkehrs auf die einzelnen Kommunikationsschichten betrachtet und untersucht welche Einflüsse die Komponenten eines Kommunikationssystems auf die zu messenden und zu bewertenden Parameter haben. Am Beispiel in Abbildung 76 werden die Einflussfaktoren auf die Delay Variation gezeigt.

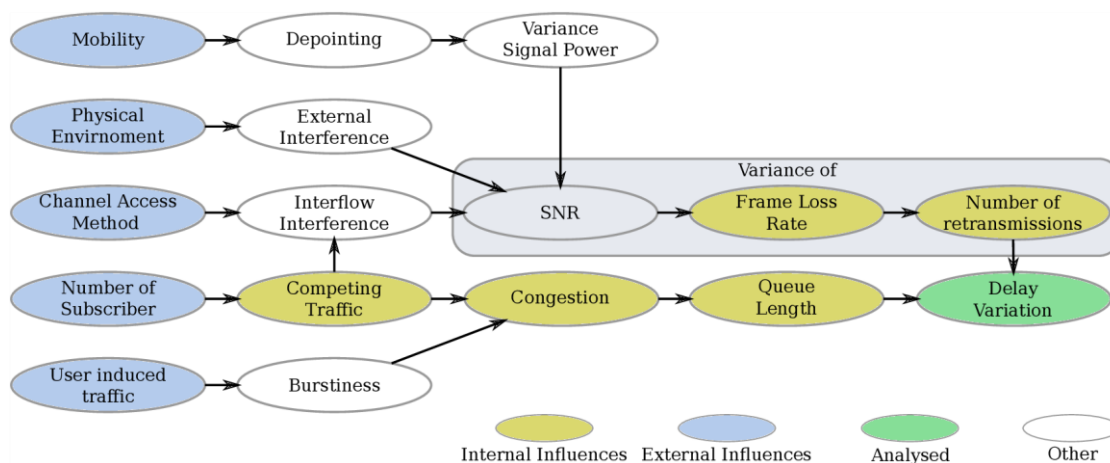


Abbildung 76: Einflussfaktoren auf Delay Variation

Bei der Vielzahl der möglichen Einflussfaktoren ist eine gezielte Betrachtung einzelner Metriken im Gesamtsystem wenig sinnvoll. Vielmehr muss die Leistungsfähigkeit des Systems aus Sicht des Nutzers definiert werden. Die Interaktion des Nutzers geschieht durch Applikationen, so dass nur eine realitätsnahe Emulation von Applikationen einen Einblick gewährt wie gut oder schlecht das System für den entsprechenden Nutzer ist. Basierend auf dieser Erkenntnis wurde ein Konzept erstellt das eben diesen nutzerzentrierten Ansatz verfolgt.

In diesem Konzept werden Gruppen von Applikationen (Application Sets) für einen Test definiert. Diese Applikationsgruppen spiegeln eine Aufgabe und Umgebung wieder, für welches das Kommunikationssystem verwendet werden soll. Jede Applikation in der Gruppe nutzt ihr Kommunikationsprotokoll mit der KASYMOSA-Erweiterung zur Ressourcenreservierung. Auf den Traffic-Pattern-Generatoren (TPG) welche mehrfach im Netzwerk vorhanden sind, werden die Applikationsgruppen gestartet und von einem zentralen Kernel mit Hilfe von Kontrolldaten gesteuert. Auf diese Weise werden die Applikationen zeitgesteuert untereinander über das Netzwerk kommunizieren und dadurch Datenverkehrsmuster (Traffic-Pattern) erzeugen. Durch die Spezifikation des Ablaufes, der Applikationen und der Anzahl der Kommunikationsteilnehmer kann Vergleichbarkeit verschiedener Kommunikationssysteme für entsprechende Nutzergruppen erreicht werden.

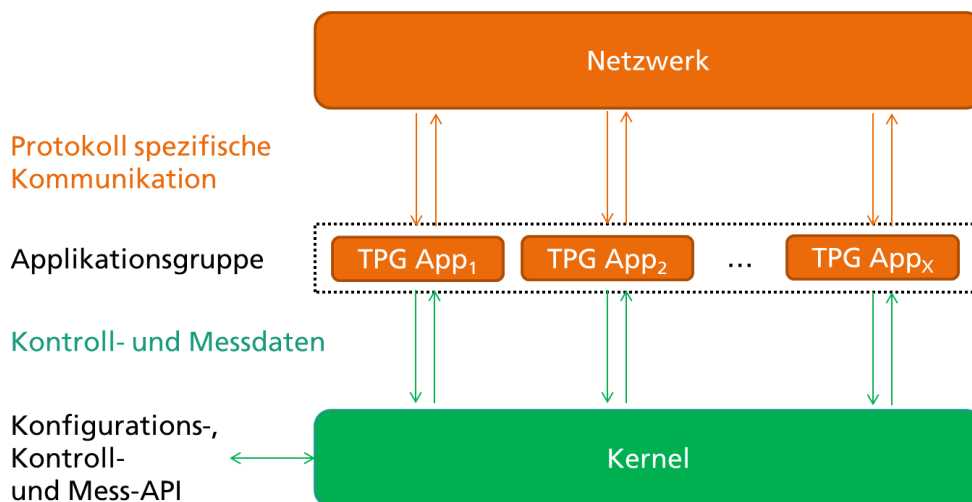


Abbildung 77: Integration der Traffic-Pattern-Generatoren

Die Bewertung der Leistungsfähigkeit erfolgt über ein Punktesystem in welchem die spezifizierten Eigenschaften einer Applikation mit einer Priorität multipliziert werden.

In einem Beispielttest würde Audio zum Beispiel mit dem Mean-Opinion-Score und die Datenübertragung via HTTP mit dem Datendurchsatz in Kilobytes pro Sekunde bewertet. Die Priorität des Audio ist höher als die von HTTP und wird dadurch mit einem größeren Faktor multipliziert als der Datendurchsatz via HTTP. So wäre ein angenommenes Kommunikationssystem A welches hohe Datenübertragungen ermöglicht aber bei Audio einen schlechten Mean-Opinion-Score erhält, einem angenommenen Kommunikationssystem B welches einen guten Mean-Opinion-Score aber schlechten Datendurchsatz erreicht, unterlegen.

Als Testcases wurden das HTTP-Protokoll und das SMTP-Protokoll sowie Datendurchsatztests mit UDP umgesetzt. Die Protokolle bestehen jeweils aus einem Client und einem Server. Jeder TPG kann Client und/oder Server sein. Ein Teil der Messung wird realisiert indem an jedem TPG der Datenverkehr aufgezeichnet und von jedem Datenpaket mit einem HASH-Verfahren ein Fingerabdruck erzeugt wird. Dieser Fingerabdruck wird mit dem Zeitstempel und weiteren Metadaten zur Analyse an den Kernel weitergereicht. Diese Methode ermöglicht die Zusammenführung und Analyse aller Datenpakete im Netzwerk. So lässt sich die Reihenfolge der Pakete an der Ausgangsseite der Reihenfolge an der Eingangsseite gegenüberstellen und eine Aussage über die QoS-Eigenschaften des Netzwerks treffen. Aber auch einfache Daten lassen sich so extrahieren wie:

- Latenz
- Latenz-Variation
- Datendurchsatz
- Paket-Fehlerrate

Fehlverhalten des Netzwerks kann so detektiert werden, wenn zum Beispiel ein Paket zum falschen Adressaten übermittelt wird. Ein Verhalten welches aus Ethernet-basierten Netzwerken bei Überlastung bekannt ist.

In einem weiteren Modus kann das System durch Fingerabdrücke des Paketinhalts mögliche Proxy-Dienste oder Fragmentierung im Netzwerk durchdringen und auch hier eine weitere Analyse ermöglichen.

---

Durch den nutzerzentrierten Ansatz können beliebige Kommunikationssysteme auf ihre Leistungsfähigkeit in Hinblick auf den potentiellen Nutzerkreis vergleichbar getestet werden.

### 2.1.11 AP4100 - Integration und Evaluierung Rev#1

Im AP 4100 wurde die Integration aller Layer und Tests der einzelnen Komponenten sowie anschließend des gesamten Terminals Rev#1 durchgeführt.

Für den PHY wurde ein automatisiertes Testsystem erstellt, das es erlaubt, eine Reihe von Messungen ohne Nutzereingriff und reproduzierbar durchführen zu können.

Im Fokus stand vor allem das Zusammenspiel der Layer in verschiedenen Betriebssituationen. Es wurden variierende Datenraten, exklusive sowie viele parallele Verbindungen über den Satellitenlink wie auch aus Sicht höherer Protokollebenen unidirektionale (z.B. UDP für Videoübertragungen), als auch bidirektionale (z.B. TCP für Datenübertragungen) Verbindungen getestet. Weiterhin wurden über einen längeren Zeitraum bestehende Verbindungen wie auch periodisch auf- und abgebaute Verbindungen in Kombinationen getestet. Neben der Funktionsfähigkeit des Terminals gaben diese Tests auch Aufschluss über die Reaktionen der höheren Netzwerkprotokolle auf die sichtbar hohe Latenz und Roundtrip-Zeit der Übertragung.

Im Zuge von Lasttests erwies sich die Kopplung des PHY und MAC-Layers über synchronisierte Uhren als problematisch, da auf temporäre Überlastsituationen im PHY nicht adäquat reagiert werden konnte. Diese Problematik wurde durch Einführung eines neuen Protokolls zwischen diesen beiden Schichten gelöst, der MAC wurde an die Verarbeitung des PHYs direkt gekoppelt (siehe dazu AP1110).

Weiterhin wurde das Systemverhalten bei kurzen und längeren Ausfall einzelner Verbindungen getestet. Hierbei wurde ein Testsystem entwickelt, das die Up- und Downlinks einzelner Terminals synchronisiert unterbrechen kann um somit die sogenannten Shadowing-Situationen emulieren zu können. Hierdurch konnte das Verhalten des Systems in den verschiedenen Ausfallszenarien reproduzierbar getestet werden.

Nach der erfolgreichen Integration wurde das KASYMOSA Rev#1 System ausgiebig auf seine Gesamteigenschaften getestet. Das System konnte mit beliebigen Rekonfigurationen umgehen und lief stabil. Die Datenlatenz wurde mit ca. 2 Sekunden vermessen, was schon eine deutliche Steigerung gegenüber MoSaKa war (ca. 5 Sekunden) jedoch noch über dem gesteckten Ziel von 250 ms. Die Reduktion ist vor allem auf die reduzierten Puffergrößen und das Flow-Control Protokoll zurückzuführen. Der große Sendepuffer konnte allerdings aufgrund des geringeren Leistungsfähigkeit des alten DT4000, der in Rev#1 zu Einsatz kam nicht reduziert werden. Dieser musste den Jitter der Software-Datenverarbeitung ausgleichen, und dieser Jitter erhöht sich mit der Auslastung der CPU.

Weiterhin wurden Datenraten von 300kbit/s (netto) erreicht. Hierbei stelle maßgeblich die CPU und die Last durch den Turbo-Decoder die Begrenzung dar, über die Luftschnittstelle ist prinzipiell noch mehr möglich gewesen.

Die Rekonfigurationszeiten waren auch noch recht hoch. Dies hängt damit zusammen, dass die Ressourcen Anfragen ebenfalls über den Satellit geschickt werden müssen und damit der Datenlatenz unterliegen. Typischerweise waren diese Zeiten 4 Sekunden. Diese langen Zeiten hatten jedoch den positiven Effekt, dass die höheren Layer gezwungen waren damit umzugehen und hierdurch auch einige Verbesserungen für die Rev#2 entstanden sind.

Die Einbindung mehrere Terminals in den NWE Rev#1 verlief problemlos und konnte nach einigen Anpassungen als realitätsnahe Testplattform für die IDUs und ODUs genutzt werden.

Den Abschluss dieses Arbeitspakets bildete die Rev#1 Funktionsdemonstration im Oktober 2014 in der FORTE Anlage in Ilmenau.

### 2.1.12 AP4200 - Messkampagne Antenne und Nachführung Rev #A mit realem SAT

Zur Validierung der Nachführung für die zweiachsige HG-Antenne wurde diese auf dem Dach des Testfahrzeugs montiert und auf einen realen Satelliten (Eutelsat KA-SAT 9A) ausgerichtet. Anschließend wurde eine Testfahrt auf dem Gelände durchgeführt. Abbildung 78 zeigt die durchgeführte Testfahrt auf dem Testgelände des Fraunhofer IIS. In Abbildung 79 sind die Ergebnisse diese Messfahrt dargestellt. Der grün dargestellt Verlauf zeigt den geschätzten Fehler in der Ausrichtung der Antenne. Die blauen Bereiche markieren die Zeiten in denen eine Satellitenkommunikation gewährleistet werden konnte. Aufgrund von Abschattungen oder zu großen Störungen kommt es zeitweise zu Ausfällen. Es ist deutlich zu erkennen wie es der Antenne mehrfach gelingt nach Satellitenverlust diesen wiederzufinden.



Abbildung 78: Testfahrt auf der Anlage des Fraunhofer IIS



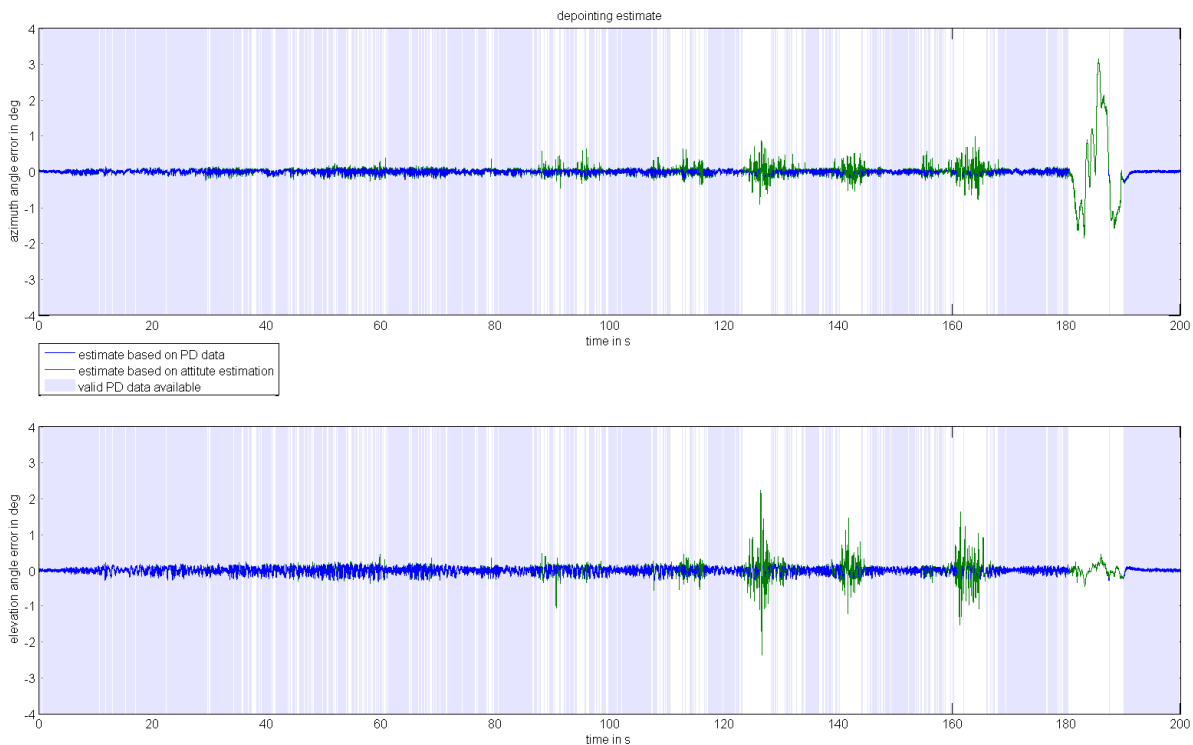


Abbildung 79: Ergebnisse des Nachführttest mit der zweiachsigen HG-Antenne - die blauen und grünen Verläufe zeigen den geschätzten Ausrichtungsfehler – die blauen Bereiche stellen die Zeiten einer optimalen Ausrichtung dar

### 2.1.13 AP4300 - Integration und Evaluierung Rev#2

Im Zuge der Integration der verschiedenen Layer (Physical Layer, Mac Layer, L3) wurde zuerst die Funktionalität des portierten Phy Ressourcen Management des Physical Layers (Phy) einzeln getestet und hergestellt, bevor danach die weiteren Layer verbunden wurden. Diese Integration wurde teils vor Ort, oftmals jedoch über einen Fernzugang auf die Geräten im FORTE durchgeführt.

Durch die Integration wurden noch Schwachstellen aufgedeckt, die im Verlauf weitestgehend behoben wurden. Im Phy Layer war dies vor allem der Sendepuffer im FPGA, der sich aufgrund von Einflüssen des Betriebssystems und der erhöhten Last als zu gering erwies, so dass die Übertragung öfters abbrach. Durch Vergrößerung des Puffers sowie durch die exklusive Nutzung eines Prozessorkerns durch die Datenübertragung an den FPGA wurde dieses Problem allerdings weitgehend behoben. Nichts desto trotz bleibt dieser Punkt immer kritisch wenn es um die Datenübertragung von Software nach Hardware geht, da ein vergrößerter Puffer gleichzeitig eine Latenzvergrößerung bedeutet.

Der messbare Erfolg der Umstellung auf die neue Hardware und auf das integrierte Ressourcen-Management zeigte sich bei der End-to-End Systemevalutierung mit allen Layern. Einerseits ist dies in einer sehr kurzen Übertragungslatenz sichtbar. Ein Ping misst einen Roundtrip im Bereich von 500 ms, wobei hier der Hin- und Rückpfad zu Buche schlägt. Eine Übertragung von einem Terminal zu einem anderen ist somit in ca. 250 ms möglich. Die Sendepuffer tragen bei obiger Messung etwa 100 – 120 ms bei (auf einem Weg). Weitere Beiträge liefern noch die Paketierungslatenzen, der Interleaver im Physical Layer sowie der Scheduler im Mac-Layer. Das tatsächliche Satelliten-Delay ist dabei zu 0 gesetzt. Aber so kann wie in einem realen Satellitensystem

getestet werden, da das Systemdelay im Bereiche des tatsächlichen Satellitendelays liegt, welches das Ziel war.

Des Weiteren wurden die Rekonfigurationszeiten auf 3 Frames (à 250 ms) zuzüglich einer einfachen Übertragungstrecke festgelegt bzw. vermessen. Hierbei ist die Zeit angegeben, die von der Anforderung einer neuen Übertragungsressource im L3 bis zu deren Aktivierung auf dem Übertragungskanal vergeht. Diese Zeit beträgt somit ca. 1 Sekunde und kann ggf. noch auf 2 Frames plus das Delay einer Übertragungstrecke reduziert werden, im Optimalfall wären dies dann ca. 750 ms. Für den Demonstrator wurden 3 Frames Latenz gewählt, um mehr Stabilität zu gewährleisten, da z.B. kein Realtime-Betriebssystem verwendet wird.

Im Zug der Integration wurde ein Terminal mit abgesetzter ODU (Out-Door-Unit) aufgebaut. Dabei verblieb der IDU (In-Door-Unit)-Teil (PC-basiert) im Kontrollraum, der ODU-Teil (FPGA-Evaluation-Board mit 2-Kanal-Transceiver) wurde direkt auf die Antenne montiert. Die Verbindung zwischen IDU und ODU erfolgt über lediglich eine Glasfaser. Bei diesem Test konnten erfolgreich Daten gesendet und empfangen werden, es ergab sich kein Unterschied zwischen der örtlich getrennten (IDU und ODU) und der zusammen in einem Gerät verbauten Version.

#### **2.1.14 AP4400 - Demonstration und Abschlusspräsentation**

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde eine Demonstration der in KASYMOSA entwickelten Systeme geplant und organisiert.

Die zweigeteilte Demonstration fand am 31.08.2016 statt und im ersten Teil wurden in Konferenzart die Ergebnisse der Arbeitspakete durch die einzelnen Partner vorgestellt.

Im Zweiten Teil konnten dann in mehreren Teildemonstrationen erfolgreich die Funktionalität der verschiedenen Systeme demonstriert werden. Zum einen wurden die entwickelten und angepassten Applikationen auf einem Testsystem vorgeführt und anschließend das gesamte Szenario auf die Modems übertragen die über die LP Rev#1 über die Luftschnittstelle verbunden waren. Abschließend wurde die Trackingfähigkeit der HG Rev#1 auf einem Fahrzeug mit realem Satelliten und in Verbindung mit der Anlage vorgeführt.

Von der HG Rev#2 konnte leider nur die Antenne einzeln gezeigt werden, da zum Zeitpunkt der Demonstration der Positionierer noch nicht geliefert war.

#### **2.1.15 Zusammenfassung**

Der weiterhin ungebrochene und sogar steigende Bedarf an schnell verfügbaren, unabhängigen und breitbandigen Kommunikationsmitteln für Krisenreaktionskräfte ist immer noch nicht erschöpfend gedeckt. Einzelne Lösungen aus dem terrestrischen Mobilfunk bedienen diesen Bedarf zwar, aber sind oftmals nicht mehr funktionsfähig bei großen Ereignissen. Durch die vermehrt verfügbaren Kapazitäten in der Ka-Band Satellitenkommunikation, bietet sich diese an, um an den speziellen Bedarf angepasst zu werden.

Deshalb wurden im Projekt „KASYMOSA“ die Ansätze aus dem Projekt „MoSaKa“ konsequent weiterentwickelt um den Nutzen und die Systemfähigkeit der Technologien in der mobilen Satellitenkommunikation zu erhöhen. Dabei wurden in allen Schichten von den Antennen bis zur Applikationsebene in allen Bereiche Untersuchungen und Entwicklungen durchgeführt.

Im Bereich der Antennen wurden nicht nur Verbesserungen an den bisherigen Typen vorgenommen sondern auch zwei neue Ansätze verfolgt, die eine Reduzierung der Größe und des Gewichts ermöglichten und das bei nur geringen Einbußen der Leistungsfähigkeit.

Für die High-Gain-Antennen wurden neue leiterplattenbasierte Speisesysteme entwickelt die eine deutliche Reduzierung der Baugröße und des Gewichts im Vergleich zu klassischen Hohlleiterspeisungen erreicht. Zusätzlich konnte durch veränderte Fertigungsprozesse eine stabile kleinere Form der Schüssel erreicht werden. Bei der Low-Profile-Antenne konnten die Antennenpa-

neele so angepasst werden, dass für Senden und Empfang, trotz der großen Frequenzunterschiede im Ka-Band, nur ein einzelnes Paneel notwendig ist. Dadurch wurde in Verbindung mit einem neuen Antriebskonzept bei der Nachführung die Aufbauhöhe deutlich reduziert. Auch bei der High-Gain-Antenne wurde das Nachführsystem geändert. So konnte die Problematik des Gimbal-Lock, das bei zweiachsigen Positionierern immer besteht und die Nutzung auf bestimmte geographische Regionen beschränkt, durch Nutzung einer dritten Achse reduziert werden. Eine umfassende Untersuchung der verschiedenen Nachführkonzepte führte zu einem generischen Modell, dass in Zukunft für die Simulation und Abschätzung der Leistungsfähigkeit von verschiedenen Nachführsystemen bereits vor der Fertigung eines Prototypen genutzt werden kann.

Die in MoSaKa entwickelten Modemtechnologien wurden weiter auf die Herausforderungen im mobilen Einsatz angepasst. Der Phy-Layer wurde komplett neu gestaltet um die Anbindung der out-door-unit über eine einzelne Glasfaser zu ermöglichen. Realisiert wurde das durch die Verwendung einer unabhängigen FPGA-Einheit, die in Verbindung mit einem Tuner-Board bereits direkt auf der Antenne montiert werden kann und anschließend die Vorverarbeiteten Datenpakete über eine optische Schnittstelle an die in-door-unit überträgt. Die in-door-unit wurde stärker integriert und auf einer gemeinsamen Plattform (Industrie-PC mit Linux Betriebssystem) umgesetzt.

Im MAC-Layer wurde durch die engere Kopplung der Schichten auf einer gemeinsamen Plattform und die Verwendung besserer Algorithmen zur Abschattungsdetektion und der Berechnung von Ressourcenanforderungen in Abhängigkeit von Kanalbedingungen, Lastzustand und systemweiten Abschattungsdaten eine stabilere und effizientere Steuerung und Datenübertragung erreicht.

Im QoS-System wurde ein komplett neuer Ansatz verfolgt indem ein Relationenmodell nicht nur die einzelnen Verbindungen abbildet sondern die Beziehung zwischen den Datenpfaden ebenfalls. So konnten die Fehlreservierungen auf Grund von fehlenden Rückpfaden stark reduziert werden und damit die gesamte Leistungsfähigkeit des Systems erhöht werden.

Neben den Systementwicklungen war ein weiteres Ziel des Projekts die Entwicklung von umfassenden Testsystemen und Testfällen für die Evaluierung der Leistungsfähigkeit eines mobilen Satellitenkommunikationssystems. Die bereits teilweise in MoSaKa entwickelte Testanlage des Fraunhofer IIS wurde dahingehend weiterentwickelt um automatisiert Tests zur Gesamtevaluierung von Antennen und Nachführsystemen durchzuführen. Darüber hinaus wurde auch ein System zur nutzerorientierten Bewertung für Kommunikationssysteme entwickelt, welches nicht nur eine Applikationsbasierte Anregung des Systems sondern auch eine differenzierte Auswertung der Messdaten erlaubt. Das entwickelte Testsystem ist auch anpassbar auf verschiedene QoS-Systeme und wurde beispielhaft für das KASYMOSA-System implementiert.

## 2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Folgenden werden die wesentlichsten Positionen des Verwendungsnachweises dargestellt.

Die bewilligten Mittel wurden zweckgebunden für das KASYMOSA-Projekt eingesetzt. Neben den Kosten für das wissenschaftlich-technische Personal wurden als wesentliche Investitionen die nachfolgend erläuterten Positionen beschafft.

---

## 2.2.1 TU Ilmenau - Fachgebiet HMT

### Azimut-Positionierer für die LP-Antenne mit Radomen

Für die Entwicklung neuartiger Antennenansätze geringer Bauhöhe für die Ka-Band Satellitenkommunikation wurde eine geeignete Trägerplattform benötigt. Dieser auf die Anwendung zugeschnittenen mechanischen Positionierer kann die LP-Terminalantenne dynamisch im Azimut ausrichten. Es handelt sich um einen optimierten und für den Außeneinsatz geeigneten Positionierer, welcher eine deutlich leichtere und kompaktere Bauweise, geringere Leistungsaufnahme und eine deutlich geringere Aufbauhöhe berücksichtigt. Die Plattform wurde mit einer optischen Drehkupplung ausgestattet, deren Einsatz für das gleichzeitige Übertragen mehrerer Empfangs- und Sendekanäle bei einer gleichzeitigen Reduzierung des Platzbedarfs vorgesehen ist. Es wurden ein Ka-Band-spezifiziertes Radom und ein transparentes Radom zu Demonstrationszwecken als Sonderanfertigung beschafft.

### HG Antennenreflektor und Speisestruktur

Ein Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkt in KASYMOSA stellte die Minimierung der geometrischen Dimensionen der Außeneinheiten der Satelliten-Terminals dar. Zu diesem Zwecke wurde eine Optimierung der Reflektorgröße der HG-Antenne unter Berücksichtigung systemspezifischer Aspekte und ohne Link-Budget-relevante Einbußen bei den elektrischen Antennenkenngrößen vorgenommen werden. Ein individueller Reflektor mit einer gewichtsoptimierten Rückseitengeometrie, der gesamten Speisekette inklusive einem Modenkoppler als weiteres Speiseelement, konnte nach Eigenentwicklung und Simulation durch die Beauftragung komplexer CNC-Fräsverfahren realisiert werden.

### Simulationssoftware CST

Die Optimierung von Antennenstrukturen stellte ein zentrales Element des Vorhabens dar. Für die Berechnung des Strahlungsverhaltens werden spezielle elektromagnetische Simulationsprogramme benötigt. Es wurden befristete Lizenzen der deutschen Firma CST erworben.

## 2.2.2 TU Ilmenau - Fachgebiet ICS

### Server

Da die unterschiedlichen Fortschritte und Versionen der Softwarekomponenten insbesondere bei unterschiedlichen Ansätzen ein erhöhtes Management und eine ordentliche Versionskontrolle erfordern, wurde ein Server beschafft, der eben diese Punkte zentralisiert durchführt. Gleichzeitig diente dieser Server auch zur zentralen automatisierten Kompilierung der einzelnen Softwarekomponenten.

## 2.2.3 IABG

Im Rahmen der Arbeitspakete 1240 und 1400 fanden durch die IABG nur Beschaffungen statt wie sie im Antrag auf Gewährung einer Bundeszuwendung an Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft unter Position 0813 ausgewiesen wurden. Im Konkreten handelte es sich dabei um folgende Positionen.

### MATLAB Lizenz

- 1x MATLAB
- 1x Simulink
- 1x Communications System Toolbox
- 1x DSP System Toolbox
- 1x Signal Processing Toolbox

### Entwicklungs- / Demo- Hardware

- 4x Notebooks Guru Fire IV
  - Prozessor: Intel Core i7-3630QM 2,4 – 3,4 GHz 6MB Level3 Cache
  - Grafik: NVIDIA GeForce GTX670MX mit 3072MB GDDR5 RAM
  - Display: 15,6" FullHD LED TFT 1920 x 1080 Pix NonGlare
  - Arbeitsspeicher: 16 GB DDR3 1500MHz
  - Festplatte: Toshiba 1TB 5400u/Minute
  - Optisches Laufwerk: BlueRay lesen DVD RW

## 2.2.4 Fraunhofer IIS

### Software MKS-Tool Alaska

Zur initialen Simulation der unterschiedlichen Positionierer und deren mechanischen Eigenschaften wurde eine Software benötigt, die speziell die Anforderungen an ein entsprechendes System abbilden kann. Zu diesem Zweck wurde das MKS-Tool alaska vom Institut für Mechatronik in Chemnitz beschafft.

### Satellitenkanalemulator

Zur Erweiterung der Testanlage auf die in der Demonstration vorgesehenen drei Terminals des KASYMOSA-Systems wurden Kanalsimulatoren für zwei weitere Kanäle benötigt. Um vorhandene selbst entwickelte Software weiter nutzen zu können wurde eine synchronisierte Kombination aus C3040 Kanalsimulatoren der Firma IZT beschafft.

### HG-Antennennachführsystem

Um nicht nur die Entwicklung der Antennentechnik voranzutreiben, sondern auch im Bereich der Nachführung weitere Möglichkeiten zu untersuchen wurde für die neu entwickelte High-Gain-Antenne ein Nachführsystem mit drei Achsen beschafft. Damit ergeben sich Möglichkeiten die Nachführung anzupassen, so dass der sogenannte Gimbal-Lock umgangen werden kann bzw. auch die Nachführung in der Polarisationsachse betrachtet werden kann.

### Nomadisches FlyAway Ka-Band-System

Das im Projekt MoSaKa vorgeschlagene System sah ein Terminal mit hohem Gewinn vor. Um dieses Setup zu vervollständigen und somit den vollen Umfang der geplanten H2Sat-Experimente in Zukunft durchführen zu können wurde eine Antenne mit hohem Gewinn benötigt. Da die Vorgehensweise in den zukünftigen Experimenten noch nicht vollständig geplant ist wurde aus Gründen der Flexibilität sich für eine leicht auf- und abbaubare Fly-Away-Antenne entschieden und diese in Form einer 1,2 Meter großen Schüssel beschafft.

### Spezielles PC System und Messeinrichtung

Das Testen von Nachführalgorithmen und die schnelle Anpassung der Regelparameter sind Voraussetzung für die effiziente Entwicklung von Nachführsystemen. Um dies zu ermöglichen und eine direkte Überwachungsmöglichkeit zu schaffen wurde eine Rapid-Prototyping-Plattform für

Regelungen in Form einer dSPACE Autobox inklusive Peripherie, passender Software und entsprechender PC-Technik zur Bedienung beschafft und zur Entwicklung genutzt.

#### Spezielles PC System und Messeinrichtung

Da das in der vorherigen Position angegebene Rapid-Prototyping-System schnell an seine Grenzen gebracht werden konnte wurde ergänzend ein PC-basiertes System inklusive entsprechender IO-PCI-Karte und Adaptern beschafft.

#### HF-Komponenten für vier Terminals

Die Verfügbarkeit von vier Terminals im KASYMOSA/MoSaKa-System erforderte eine Erweiterung der vorhandenen Kapazitäten sowohl direkt an den Antennen als auch für die Testanlage FORTE. Aus diesem Grund wurden folgende Dinge beschafft:

- Leistungsteiler für das Ka-Band
- Hochwertige Messkabel (< 40GHz)
- Zwischenverstärker für L/S-band-Signale
- Leistungs-Detektoren für das Ka-Band
- Schaltmatrix für die Zwischenfrequenzsignale

### **2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit**

Wie im Projektantrag beschrieben, bestand (und besteht) notwendiger Forschungsbedarf.

Die zu erwartende steigende Verbreitung von mobilen Diensten im Ka-Band hat einen steigenden Frequenzbedarf zur Folge. Die Situation der Frequenzbelegung in anderen Satellitenbändern hat sich während der Projektlaufzeit verschärft und wird sich weiter verschärfen. Das Ka-Band stellt dabei besondere Herausforderungen an sendefähige Antennen, da Up- und Downlink-Frequenzbereich einen signifikanten Frequenzabstand aufweisen und die Baugröße bzw. das Gewicht bei der Fahrzeugmontage einen erheblichen Aufwand bedeuten.

Selbst die Grundanwendung des mobilen Satellitenfunks ist derzeit nur schwach verbreitet. Die verwendeten Terminals sind entsprechend groß und teuer, oder auf niedrigbitratige Dienste beschränkt. Deshalb ist insbesondere die Reduzierung von Größe, Gewicht und Kosten ein wesentlicher Schritt hin zu einer breiten Anwendung für die mobile Satellitenkommunikation. KASYMOSA legt dafür erste Bausteine in Form von Simulationsmodellen und effiziente Testverfahren.

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.

Reservierungsbasierte Systeme, welche auf Anforderung bestimmte Übertragungsparameter zeitlich begrenzt zusichern, können diese Überlastung vermeiden. Im Kontext mobiler Satellitenkommunikation macht die extrem lange Übertragungsverzögerung Interaktionen mit dem reservierenden Endsystem kostspielig. Muss das QoS-System also auf Änderungen in den Umgebungsbedingungen reagieren, so ist eine lokale Reaktion deutlich im Vorteil. Existierende Lösungen bieten die Möglichkeit zur Reservierung einzelner Netzwerkpfade. Protokolle höherer Schichten, wie bspw. TCP, bestehen allerdings aus mehreren verbundenen Pfaden in einer Ab-



hängigkeitsbeziehung. Eine Nichtbeachtung dieser Beziehungen führt speziell in Überlastsituation zu einer ineffizienten Verteilung der bereits begrenzten Ressourcen und senkt somit die Nutzerzufriedenheit. Hier setzt KASYMOSA an, indem es Endanwendungen die Möglichkeit bietet, Abhängigkeiten zwischen reservierten Pfaden zu modellieren und so eine optimale Ressourcenverteilung zu gewährleisten.

SatCom kann beabsichtigt oder unbeabsichtigt gestört werden. Die beabsichtigte Störung geschieht meist auf dem Uplink durch terrestrische Jammer. Eine Störung des Downlinks geschieht dagegen meist von luft- oder raumgestützten Einheiten aus. Bei hohen Antennennebenkeulen der Bodenstation kann eine Störung aber auch mittels terrestrischer Jammer geschehen. Da die KASYMOSA-Signalstruktur keine Maßnahmen zur Unterdrückung von Jammern beinhaltet, ist ein Jamming der Signale ohne großen Aufwand möglich. Bereits eine Abstrahlleistung des Jammers von 10 mW kann zu einer Unterbrechung der Kommunikation führen. Die durchgeführten Simulationen sollen Anregungen für eine zukünftige Weiterentwicklung des KASYMOSA-Systems geben. Darüber hinaus können die Erkenntnisse z.T. auch auf andere Systeme übertragen werden und bieten somit eine Basis für die Erhöhung der Robustheit gegenüber Jammern.

Im Umfeld der standardisierten WebServices von OASIS findet sich derzeit keine Spezifikation zur Implementierung einer QoS betriebenen Servicenutzung. Die durch KASYMOSA geschaffene Implementierung bildet somit eine ideale Grundlage um in die Diskussion der WS-QoS Servicestandardisierung einzusteigen. Bei der Untersuchung wurden drei unterschiedliche Ansätze untersucht.

- Interceptor Einschub
- Eigenständige Protokollentwicklung
- Proxy basierte Lösung

Für die reale Umsetzung in KASYMOSA haben wir uns für die Proxy basierte Variante entschieden, da sie den Vorteil völliger Transparenz aus Sicht der Anwendung mit sich bringt.

Zusammengefasst war die Durchführung des Vorhabens daher sowohl notwendig als auch angemessen. Im Übrigen wird auf die Zwischenberichte sowie die erzielten guten Ergebnisse verwiesen.

## 2.4 Voraussichtlicher Nutzen im Sinne des Verwertungsplanes

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

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 lizensierbares geistiges Eigentum, sondern insbesondere auch die Entwicklung von Systemtestverfahren. Diese Verfahren bieten insbesondere deutschen Unternehmen signifikante Vorteile bei Entwicklung und Test ihrer Terminals. Diesbezügliche Nutzungen durch Unternehmen sind zwischenzeitlich des Öfteren 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 2.6 aufgeführt.

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

Viele der für Kasymosa entwickelten Bausteine können auch in anderen Projekten wiederverwendet werden, darunter viele der für die neue Hardware entwickelten Module, wie:

- Die flusskontrollierten Hardware- und Softwaremodule („Hörstchen“) zur Software-Hardware-Kommunikation
- Das Interface zum neuen Tuner und dessen Ansteuerungsroutinen
- Die Erstellung der spezifisch angepassten Linux-Images für den Zynq-Arm-Prozessor
- Die Verbesserung der Monitoring & Control – Funktionalität (RegChain)
- Die Hardware-Implementierung des Turbo-Dekoders als mögliche Alternative zum langsameren Software-Dekoder

Die Erkenntnisse innerhalb des KASYMOSA-Projekts dienen auch als Basis für weitere Forschungsprojekte bzw. sind bereits über diese in die Standardisierung eingeflossen. Konkret wurde im Rahmen eines ESA-Projektes in Zusammenarbeit mit dem Global VSAT Forum die Vorgehensweise der Evaluation von Trackingsystemen in dem Dokument „GVF-105“ verankert, welches als Standard dienen soll für verschiedene Satellitenbetreiber.

Die im Rahmen von KASYMOSA durchgeführten Jamming-Simulation für SatCom bildeten für die IABG die Grundlage sich mit dem Thema Jamming für Satellitennavigation zu beschäftigen. Dabei wurden ebenfalls verschiedenen Jammer in einer Simulationsumgebung nachgebildet. Anschließend wurde auf Basis der Simulationsergebnisse ein zunächst auf einem SDR und später einem DVB-T Stick basierendes Messsystem für SatNav-Jammer entwickelt und erprobt. Weiterhin wurde ein „Verfahren und Anordnung zur Erfassung eines Navigationssystems- oder Mobilfunk Störsenders in einem Fahrzeug“ durch die IABG patentiert.

Im Rahmen von begleitenden Studien und Projekten (RuDi, CoNSIS, Midnet) stellte die erzielte QoS-Umsetzung in KASYMOSA eine weitere Referenz zur Servicenutzung im Sinne der WS\* Standards von OASIS in unterbrechungsbehafteten Netzen dar. Somit konnte ein weiteres Mal die Flexibilität der zu Grunde liegenden Architektur (SOA) nachgewiesen werden. Fokus hierbei lag auf möglichst geringe Einflüsse auf die einzelnen Fachdienste da das Management einer QoS der Middleware sprich dem Enterprise Service Bus zugeschrieben werden sollte.

## 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 KASYMOSA komplementären Ansatz (Elektronisches Beamforming) verwendete. Sowie das ESA geförderte Projekt LOCOMO (Low cost and compact Ka-band mobile satcom terminal) [42]. Der verfolgte Ansatz ähnelt dem von der Low Profile Antenne Rev#1, nähere Details sind aber auf Grund der geringen Anzahl an Veröffentlichungen nicht bekannt.

Im Bereich der Notfall- und Krisenkommunikation wurde 2011 die Initiative emergency.lu [43] 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 [44]). 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 Mobilen 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 KASYMOSA System dennoch von dieser Lösung ab.

In 2012 wurden einige Terminals des Systems weltweit zum Einsatz gebracht. Seitdem ist aber keine weitere Entwicklung oder Nutzung bekannt.

## 2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

- [1] Krauss, H. Bayer, R. Stephan, M.A. Hein,  
**„Low-profile tracking antenna for Ka-band satellite communications“**,  
in Proc. IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications, Turin, Italien, 2013.
- [2] H. Bayer, A. Krauss, R. Stephan and M. A. Hein,  
**„Land-mobile Ka-band satcom tracking antenna employing a printed circuit board based multimode monopulse feed“**,  
in Proc. IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications, Palm Beach, Aruba, 2014.
- [3] Krauss, H. Bayer, R. Stephan, and M.A. Hein,  
**„A Single-Ka-Band Antenna Aperture for TX and RX Operation Applying a Dual-Layer Partially Reflective Surface“**,  
in Proc. EuCAP'2015, Lissabon, Portugal, 2015.
- [4] H. Bayer, A. Krauss, R. Stephan, and M.A. Hein,  
**„A Compact Planar Feed Structure for Ka-Band Satcom-on-the-Move Tracking Antennas“**,  
in Proc. EuCAP'2015, Lissabon, Portugal, 2015.
- [5] H. Bayer, A. Krauss, T. Zaiczek, R. Stephan, O. Enge-Rosenblatt and M. A. Hein,  
**„Ka-Band User Terminal Antennas for Satellite Communications [Antenna Applications Corner]“**,  
in IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 58, no. 1, pp. 76-88, Feb. 2016.

- [6] H. Bayer, A. Krauss, R. Stephan and M. A. Hein,  
**„Compact Ka-Band Cassegrain Antenna with Multimode Monopulse Tracking Feed for Satcom-on-the-Move Applications“**,  
in Proc. EuCAP'2016, Davos, Schweiz, 2016.
- [7] Krauss, H. Bayer, R. Stephan and M. A. Hein,  
**„Dual-Band Leaky-Wave Antenna Based on a Dual-Layer Frequency Selective Surface for Bi-Directional Satcom-on-the-Move in Ka-band“**,  
2016 International Workshop on Antenna Technology (iWAT), Cocoa Beach, FL, USA, 2016.
- [8] Krauss, H. Bayer, R. Stephan and M. A. Hein,  
**„ A Leaky-Wave Antenna Based on a Dual-Layer Frequency Selective Surface for Mobile Satellite Communications in Ka-Band“**,  
3rd International Scientific Symposium “Sense. Enable. SPITSE.” 2016, National Research University “MPEI”, Moscow – Smolensk, Russia, 2016.
- [9] M. Brückner, P. Drieß, M. Osdoba, A. Mitschele-Thiel,  
**“A Dependency-Aware QoS-System for Mobile Satellite Communication”**  
IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2016), Doha, April 2016
- [10] Andreas Wolf, Hartmut Brandt, Rainer Hildinger, and Stefan Lipp,  
**"On Distributed Resource Allocation in Fully Meshed Satellite Networks"**,  
31st AIAA International Communications Satellite Systems Conference, International Communications Satellite Systems Conferences (ICSSC), (AIAA 2013-5680)

Das Projekt wurde in Form von Vorträgen auf folgenden Veranstaltungen präsentiert:

- Vortrag, DeSK e.V. Zukunfts-Workshop, 2013
- Vortrag, German Microwave Conference (GEMIC), Aachen, 10.03.2014
- Vortrag, Konferenz „Angewandte Forschung für Verteidigung und Sicherheit in Deutschland“, Berlin, 03.-05. Februar 2014
- Vortrag, Nationale Konferenz für behördliche Satellitenkommunikation (GOSATCOM), Neubiberg, 13.10.2015

Am 31.08.2016 wurde das Gesamtprojekt neben dem DLR auch interessierten Vertretern der Wirtschaft und der Anwender vorgestellt.

## 3 Anhang

### 3.1 Abkürzungsverzeichnis

A/D, ADC	Analog-Digital Converter
AGC	Automatic Gain Control
AP	Arbeitspaket
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)
CG	channel group
D/A, DAC	Digital-Analog-Converter
(DE)MUX	(De-)Multiplexer
EIRP	Sendeleistung (Effective Isotropic Radiated Power)
ESB	Enterprise Service Bus
FDM(A)	Zugriffsverfahren (Frequency Division Multiple (Access))
FEC	Kanalkodierung (Forward Error Correction)
FPGA	Field Programmable Gate Array
FW	Firmware
GIS	Geografisches Informationssystem
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
HG	High Gain Terminal
HW	Hardware
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
LLC	Link Layer Control
LLR	Logarithmic Likelihood ratio
LNB	Low Noise Block Converter
LO	Local Oscillator
LP	Low Profile Terminal
MAC	Media Access Control
MPLS	Multi Protocol Layer Switching
ODU	Outdoor Unit

(O)FDM	Modulationsverfahren (Orthogonal) Frequency Division Multiple (Access)
OPL	Outer Physical Layer
PHY	Physikalische Schicht
PPS	Pulse-Per-Second
QoS	Quality of Service
RX	Empfänger (Receiver)
SATA	Datenschnittstelle (Serial Advanced technology Assessment)
SatCom	Satellite Communication
SC-FDMA	Modulationsverfahren Single-Carrier Frequency Division Multiple Access
SOA	Service Orientierte Architektur
S/P	Seriell/Parallel
SW	Software
TDM(A)	Zugriffsverfahren (Time Division Multiple (Access))
TCP	Transmission Control Protocol
THW	Technisches Hilfswerk
TX	Sender (Transmitter)
UDP	User Datagram Protocol
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



## 3.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Darstellung der Interferenzproblematik zu Nachbarsatelliten für „SatCom on the move“ Systeme	15
Abbildung 2:	Vorgeschlagenes Testverfahren GVF-105 vom Global VSAT Forum [31].	15
Abbildung 3:	Schematische Darstellung des Testsystems der United States Army Communications-Electronics Research, Development and Engineering Center (Cerdec) [32].	16
Abbildung 4:	Optimale spektrale Ordnung des Sendespektrums für zwei Szenarien mit jeweils zwei festen Anteilen (Signaling-Kanal und der Spektralblock eines abgeschatteten Terminals a) freie CG Frames mit niedrigerer Leitungsdichte, b) CG frames mit ähnlicher Leistungsdichte wie die der festen Blöcke	25
Abbildung 5:	Das KaSyMoSa System im Schichtenmodell	26
Abbildung 6:	Partitionierung IDU und ODU für KaSyMoSa Rev#2	26
Abbildung 7:	Gesamtmodell zur Nachbildung des Standards DVB-S2.	29
Abbildung 8:	Single Tone Jammer- HG-Antenne.	31
Abbildung 9:	Single Tone Jammer- LP-Antenne.	32
Abbildung 10:	IDU Rev#2 basierend auf neuester Generation des DT4000	33
Abbildung 11:	Xilinx Zynq Evaluation Board ZC706	33
Abbildung 12:	AD-FMCOMMS3-EBZ (Ansicht der Ober- und Unterseite)	34
Abbildung 13:	Schnittstelle und Datenfluss zwischen IDU und ODU	37
Abbildung 14:	KASYMOSA-protobuf-schema Projektstruktur	38
Abbildung 15:	kasymosa-client-api Struktur	38
Abbildung 16:	ScreenPresentation-Sender	39
Abbildung 17:	Screen area selection	40
Abbildung 18:	ImageVisualization-Receiver	41
Abbildung 19:	DummyRouter	41
Abbildung 20:	ImageVisualization Results	42
Abbildung 21:	Übersicht der Logging Service Architektur	43
Abbildung 22:	SAM-Architektur in RuDi (ESB-Stub & Infrastruktur)	43
Abbildung 23:	Protokollierte REQ-OUT SOAP Message	44
Abbildung 24:	Szenario Servicenutzung via Satellitenlink	44
Abbildung 25:	Servicenutzung mit QoS settings	45
Abbildung 26:	Reliable Messaging zwischen NT-Services	47
Abbildung 27:	Demonstrationsszenar	48
Abbildung 28:	Gemessener Fehlervektor in Amplitude (links) und Winkel (rechts)	49
Abbildung 29:	Explosionsdarstellung des PCB-basierten TM01 Modenkopplers für Sende- und Empfangsbetrieb im Ka-Band	49
Abbildung 30:	CAD-Modell des Rillenhorns mit den Abmessungen 47mm x 89 mm ( $\varnothing$ x L) passend zur 40 cm Cassegrain Antenne in Verbindung mit dem PCB-basierten Koppler	50
Abbildung 31:	Messaufbau zur Charakterisierung des PCB-basierten Modenkopplers im Antennenmesslabor der TU Ilmenau. Der Messaufbau besteht aus einem Rillenhorn (1), dem Koppler (2) und einem Antennenpositionierer (3).	50
Abbildung 32:	Messaufbau im Antennenmesslabor der TU Ilmenau zur Charakterisierung der 40 cm Parabolantenne, welche durch den PCB-basierten Modenkoppler gespeist wird.	51
Abbildung 33:	Richtdiagramme der 40 cm Parabolantenne für die Speisung im TE11 Mode mit LHCP (schwarz) und für die Speisung im TM01 Mode (rot gestrichelt) bei 20 GHz.	52
Abbildung 34:	Richtdiagramme der 40 cm Parabolantenne für die Speisung mit RHCP bei 30 GHz.	52
Abbildung 35:	Kompaktes LNB Modul mit der Möglichkeit der Synchronisierung der Lokaloszillatoren bei 25 MHz	52
Abbildung 36:	Polarisationsreinheit XPD einer elliptisch geformten Parabolantenne mit einem horizontalen Durchmesser von $D_h = 400$ mm für verschiedene vertikale Durchmesser sowie zwei verschiedene Fokusslängen F	54

Abbildung 37: CST-Modell eines $TE_{21}$ -Modenkopplers für den Frequenzbereich um 20 GHz	54
Abbildung 38: CST-Simulationsmodell des Ku-Band Kopplers als perspektivische und seitliche Ansicht bestehend aus einem Rundhohlleiterübergang (blau transparent) und den gedruckten Strukturen zur Signaleinspeisung im Ku-Band und den zugehörigen Anschlüssen auf Mikrostreifenleitungsebene.	56
Abbildung 39: Anpassung (schwarz) der Koppelstruktur am 17,5 mm-Rundhohlleiter für den $TE_{11}$ Mode im Ku-Band sowie die Transmission (rot) für den Grundmode im Rundhohlleiter zum PCB-basierten Anschluss nach dem zugehörigen Speisernetzwerk. Der Frequenzbereich mit einer Anpassung von besser als -10 dB ist weiß gekennzeichnet (11,3-12,4 GHz).	56
Abbildung 40: Anpassung (schwarz) für die Speisung des $TE_{11}$ Modes im 17,5 mm-Rundhohlleiter sowie die Transmission (rot) zwischen 17,5 mm- und 14 mm-Rundhohlleiter im Ka-Band. Die beiden Ka-Band-Frequenzbereiche, welche in KASYMOSA verwendet werden (19,7-20,2 GHz und 29,5-30 GHz), sind weiß gekennzeichnet.	57
Abbildung 41: Anpassung am 17,5 mm Rundhohlleiter (schwarz) und Transmission zwischen beiden Rundhohlleitern (rot) des Kopplers im Ka-Band-Empfangsfrequenzbereich für den $TM_{01}$ Mode.	57
Abbildung 42: Aufgeschnittenes CST_Modell eines Rillenhorns für die Speisung von Parabolantennen zur Verwendung mit den PCB-basierten Kopplern für das Ka- und das Ku-Band	58
Abbildung 43: Ka-Band Terminal-Außeneinheit der LP-Referenzimplementierung 1.0	59
Abbildung 44: Blockschaltbild des LP-Terminals mit Maximum Ratio Combining (MRC) für die Elevationsnachführung und dem Monopulsverfahren für die Azimutnachführung; (BUC – Block Up-Converter; LNB – Low-Noise Block; TRX/RX – Sende-/Empfänger; DAC/ADC – Digital-Analog-Converter; DigFE – Digital Frontend; SW – Software)	60
Abbildung 45: Links: Simulationsmodell eines Leckwellenantennenpanels mit einer Rechteckhohlleiterspeisung im Up- und Downlinkband und einer Fläche von 70 mm x 100 mm; rechts: Verteilung zirkular polarisierter Schlitzstrahler auf der Oberseite des Rechteckhohlleiter-Speisernetzwerkes für die Anregung des Leckwellenantennenpanels	61
Abbildung 46: Links: Simulationsergebnis für die Antennendirektivität über dem Elevationswinkel (rote Kurve) und über dem Azimutwinkel (blaue Kurve) bei 20,2 GHz Rechts: Simulationsergebnis für die Antennendirektivität über dem Elevationswinkel (rote Kurve) und über dem Azimutwinkel (blaue Kurve) bei 29,8 GHz	61
Abbildung 47: CAD Modell der dualbandigen Speisestruktur des Ka-Band Antennenpanels (Vorder- und Rückseitenansicht); Bestandteile: Metallplatte mit 20 und 30 GHz Schlitzstrahlergruppe (1), 20 GHz (2) und 30 GHz (3) Rechteckhohlleiter-Speisernetzwerk, Hohlleiterbiegungen zur Paneelrückseite (4), Rechteckhohlleiternetzwerk mit verschiedenen E- und H-Biegungen für die Zusammenführung zu einem gemeinsamen 20 GHz Flansch (5), 30 GHz Hohlleiterflansch mit Iris (6).	62
Abbildung 48: Dualbandiges Antennenpaneel für die LP-Antennenaußeneinheit bestehend aus einer Grundmetallplatte mit einer 20 und 30 GHz Hohlleiterspeisestruktur (1), einer Schlitzstrahlergruppe als Anregung für das Downlink- und Uplink-Satellitenband (2) gelegen unterhalb einer zweilagigen PRS (Partially Reflective Surface) mit einer Apertur von 70 mm x 200 mm (3).	63
Abbildung 49: Messergebnisse des co- und des kreuzpolarisierten realisierten Gewinns über dem Frequenzbereich des Downlink-Bandes eines dualbandigen Antennenpanels mit einer Apertur von 70 mm x 200 mm	64
Abbildung 50: Messergebnisse des co- und des kreuzpolarisierten realisierten Gewinns über dem Frequenzbereich des Uplink-Bandes eines dualbandigen Antennenpanels mit einer Apertur von 70 mm x 200 mm	64
Abbildung 51: Vergleich des simulierten und gemessenen Gewinn-Richtdiagrammes (LHCP-linkshändig zirkulare Polarisation) bei 19,7 GHz in der Elevationsebene eines dualbandigen Antennenpanels mit einer Apertur von 70 mm x 200 mm	65

Abbildung 52: Vergleich des simulierten und gemessenen Gewinn-Richtdiagrammes (LHCP-linkshändig zirkulare Polarisation) bei 19,7 GHz in der Azimutebene eines dualbandigen Antennenpaneels mit einer Apertur von 70 mm x 200 mm	65
Abbildung 53: Vergleich des simulierten und gemessenen Gewinn-Richtdiagrammes (RHCP-rechtshändig zirkulare Polarisation) bei 30,0 GHz in der Elevationsebene eines dualbandigen Antennenpaneels mit einer Apertur von 70 mm x 200 mm	66
Abbildung 54: Vergleich des simulierten und gemessenen Gewinn-Richtdiagrammes (RHCP-rechtshändig zirkulare Polarisation) bei 30,0 GHz in der Azimutebene eines dualbandigen Antennenpaneels mit einer Apertur von 70 mm x 200 mm	66
Abbildung 55: 3D CAD Konstruktion der KASYMOSA LP Terminal-Außeneinheit mit Radom (transparente Darstellung), zwei verschieden großen Antennenpaneelen (ohne Dual-Band PRS dargestellt), bi-direktionalen Ka-Band Frequenzumsetzern (dunkelgrau gefärbte Module), sowie der abgesetzten Antriebseinheit (im hinteren Teil der Abbildung).	68
Abbildung 56: Gefräste Grundmetallplatten für dualbandigen Ka-Band Antennenpaneel mit Antennenaperturen von 70 mm x 300 mm und 70 mm x 350 mm sowie einem Hohlleiterverteilnetzwerk für 20 GHz als Zusatzbauteil für die Rückseitenmontage	69
Abbildung 57: Ka-Band Low-Profile Antennendemonstrator bzw. Außeneinheit des mobilen KASYMOSA-Satellitenterminals (Referenzimplementierung 2.0)	69
Abbildung 58: Messung der Antennenrichtcharakteristik eines 70 mm x 350 mm Paneels. Darstellung der Elevationsebene (blaue Kurve) und der Azimutebene (schwarze Kurve) bei 19,8 GHz	70
Abbildung 59: Messung der Antennenrichtcharakteristik eines 70 mm x 350 mm Paneels. Darstellung der Elevationsebene (blaue Kurve) und der Azimutebene (schwarze Kurve) bei 30,1 GHz.	71
Abbildung 60: Messung des Frequenzganges im Downlink-Band (19,7-20,2 GHz) von Direktivität, Gewinn, Kreuzpolarisationsentkopplung und Verlusten eines 70 mm x 350 mm Paneels	71
Abbildung 61: Messung des Frequenzganges im Uplink-Band (29,5-30,0) von Direktivität, Gewinn, Kreuzpolarisationsentkopplung und Verlusten eines 70 mm x 350 mm Paneels	72
Abbildung 62: Simulationsmodell eines 60 mm x 60 mm Antennenpaneels mit einer verkippten PRS (grün) gegenüber der Antennenmassefläche; in der Massefläche befindet sich ein zirkular polarisierter Schlitzstrahler, der durch einen darunterliegenden Rechteckhohlleiter gespeist wird	72
Abbildung 63: Richtdiagramme bei 20 GHz mit verschiedenen Hauptstrahlrichtungen, erzeugt durch unterschiedliche Verkippungen $\gamma_{PRS}$	73
Abbildung 64: Berechnete, normierte Signalleistungen der Empfangssignale für den TE <sub>11</sub> -Mode (links) und den TM <sub>01</sub> -Mode (rechts)	75
Abbildung 65: Berechneter Fehlervektor in normierter Amplitude (links) und Winkel (rechts)	76
Abbildung 66: Konzept der generischen Modellbibliothek und deren Werkzeuge zur Konfiguration und Analyse	78
Abbildung 67: Benutzeroberfläche zur Wahl der Soft- und Hardwarekonfiguration	78
Abbildung 68: Benutzeroberfläche zur Festlegung des Simulationsszenarios	79
Abbildung 69: Benutzeroberfläche des Auswertewerkzeugs	79
Abbildung 70: Vollständiger Regelkreis mit allen Aktuatoren, Sensoren (IMU - Trägheitsmesseinheit, PD - Phasendiskriminator, GPS – Globales Positionsbestimmungssystem) und Verarbeitungseinheiten wie dem Regelungssystem und dem Attitude and Heading Reference System (AHRS)	81
Abbildung 71: Ausrichtung der Antenne in Eulerwinkeln während eines maritimen Manövers	82
Abbildung 72: Simulink-Modell des MoSaKa-LP-Demonstrators mit Regler auf dem THW-Bus	83
Abbildung 73: Simulierter Regelfehler der Low-Profile-Antenne bei einer Autobahnfahrt auf einem Bus und einer initialen Fehlauseinrichtung von 3°	84
Abbildung 74: Darstellung der Ansteuerung und Datenverarbeitung in den Kernkomponenten des NWE Rev #1	85
Abbildung 75: Konfigurationsmanagement und Datenhandling im NWE Rev #2	86
Abbildung 76: Einflussfaktoren auf Delay Variation	87
Abbildung 77: Integration der Traffic-Pattern-Generatoren	88
Abbildung 78: Testfahrt auf der Anlage des Fraunhofer IIS	90

---

Abbildung 79: Ergebnisse des Nachführtest mit der zweiachsigen HG-Antenne - die blauen und grünen Verläufe zeigen den geschätzten Ausrichtungsfehler – die blauen Bereiche stellen die Zeiten einer optimalen Ausrichtung dar \_\_\_\_\_ 91

---

### 3.3 Literaturverzeichnis

- [1] KVH Industries, [Online]. Available: <http://www.kvh.com>.
- [2] EPAK, [Online]. Available: [http://www.epak.de/index.php?de\\_premium-line-vsats](http://www.epak.de/index.php?de_premium-line-vsats).
- [3] RaySat, [Online]. Available: <http://www.raysat.com/>.
- [4] NDSatCom, [Online]. Available: <http://www.ndsatcom.com/en>.
- [5] ViaSat, [Online]. Available: <http://www.viasat.com/broadband-networks/surfbeam-2>.
- [6] BAE, [Online]. Available: [http://www.baesystems.com/cs/groups/public/documents/document/mdaw/mdq0/~edisp/baes\\_034258.pdf](http://www.baesystems.com/cs/groups/public/documents/document/mdaw/mdq0/~edisp/baes_034258.pdf).
- [7] em solutions, [Online]. Available: <http://www.emsolutions.com.au/products-and-solutions/satellite-solutions/satcom-on-the-move>.
- [8] P. Kennedy and R. Kennedy, "Direct versus indirect line of sight (LOS) stabilization," *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. 11, no. 1, pp. 3-15, jan 2003.
- [9] KVH Industries, Inc., 2012. [Online]. Available: <http://www.kvh.com/Commercial-and-OEM/Land-Systems/Communications.aspx>. [Zugriff am 01 November 2012].
- [10] EM Solutions Pty Ltd., „Satcom-on-the-move A Terminal Engineered to Sing,“ 2012.
- [11] EM Solutions Pty Ltd., "Field Trials of Mounted Battle Command Ka-band Satcom "On-The-Move", " 2010.
- [12] C. D. Walrath, "Adaptive bearing friction compensation based on recent knowledge of dynamic friction," *Automatica*, vol. 20, no. 6, pp. 717-727, 1984.
- [13] B. Li, D. Hullender and M. DiRenzo, "Nonlinear induced disturbance rejection in inertial stabilization systems," *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. 6, no. 3, pp. 421-427, may 1998.
- [14] D. Schoenwald, U. Ozguner and R. Graham, "Control of gimbal dynamics via sensitivity models for uncertainty in friction parameters," in *Control Applications, 1992., First IEEE Conference on*, 1992.
- [15] T. Fongjun, M. Wongsaisuwan and S. Phoojaruenchanachai, "Stabilization of two-link planar manipulator platform with parallel base motion disturbance using Passivity-Based Adaptive Control," in *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2009. ECTI-CON 2009. 6th International Conference on*, 2009.
- [16] Fraunhofer IIS, „Abschlussbericht MoSaKa,“ 2012.
- [17] A. Kuramoto, T. Yamane and N. Endo, "Mechanically steered tracking antenna for land mobile satellite communications," in *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1988. AP-S. Digest*, 1988.
- [18] A. Densmore and V. Jamnejad, "A satellite-tracking K- and Ka-band mobile vehicle antenna system," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 42, no. 4, pp. 502-513, Nov 1993.
- [19] D. H. Titterton and J. L. Weston, *Strapdown Inertial Navigation Technology*, Second ed., The American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) and The Institution of Electrical Engineers (IEE), 2004.
- [20] J. Wendel, *Integrierte Navigationssysteme: Sensordatenfusion, GPS und Inertiale*



- Navigation, Oldenbourg Verlag, 2007.
- [21] J. R. Wertz, Ed., *Spacecraft Attitude Determination and Control*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [22] Tooway, 2012. [Online]. Available: [www.toowaydirect.com](http://www.toowaydirect.com).
- [23] emergency.lu, 2012. [Online]. Available: [www.toowaydirect.com](http://www.toowaydirect.com).
- [24] R. Hancock und et.al., „Next Steps in Signaling (NSIS): Framework,“ Internet Engineering Task Force, 2005.
- [25] R. Braden, D. Clark und S. Shenker, „Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview,“ Juni 1994. [Online]. Available: <http://www.ietf.org/rfc/rfc1633.txt>.
- [26] R. Hancock, G. Karagiannis, J. Loughney und S. V. den Bosch, „*Next Steps in Signaling (NSIS): Framework*,“ RFC 4080, 2005.
- [27] H. Schulzrinne und R. Hancock, „GIST: General Internet Signalling Transport,“ Internet Engineering Task Force, 2010.
- [28] J. Manner, G. Karagiannis und A. McDonald, „NSIS Signaling Layer Protocol (NSLP) for Quality-of-Service Signaling,“ Internet Engineering Task Force, 2010.
- [29] J. Ø. Aagedal, „Quality of Service Support in Development of Distributed Systems,“ Department of Informatics, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Oslo, Oslo, 2001.
- [30] M. Belshe und R. Peon, „Hypertext Transfer Protocol Version 2 (HTTP/2),“ Internet Engineering Task Force, 2015.
- [31] C. R. T. Shroyer, „PERFORMANCE AND TEST GUIDELINES FOR TYPE APPROVAL OF 'COMMS ON THE MOVE' MOBILE SATELLITE COMMUNICATIONS TERMINALS,“ GVF-105.
- [32] H. ., F. S. Beljour, R. Hoffmann, L. Shamblin, J. Shields, A. Stevens, C. Uhler, E. Carl und M. Eriksson, „Army SATCOM OTM full elevation performance characterization,“ MILITARY COMMUNICATIONS CONFERENCE - MILCOM 2011, 2011.
- [33] Uppsala Universitet, Aalborg Universitet, „UPPAAL,“ 2015. [Online]. Available: <http://www.uppaal.org>.
- [34] Google Inc., „Protocol Buffers,“ 2016. [Online]. Available: <http://developers.google.com/protocol-buffers>.
- [35] C. Granet, „A simple procedure for the design of classical displaced-axis dual-reflector antennas using a set of geometric parameters,“ *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Volume: 41, Issue: 6, pp. 64-72, Dec 1999.
- [36] G. Hawkins, D. Edwards und J. McGeehan, „Tracking systems for satellite communications,“ *Radar and Signal Processing, IEE Proceedings*, vol. 135, pp. 393-407, 1988.
- [37] S. R. Saunders und A. Aragon-Zavala, „Antennas and propagation for wireless communication systems,“ *John Wiley and Sons*, vol. 2, pp. 407-408, 2007.
- [38] A. Heuberger (Koordinator), „Schlussbericht: MoSaKa – Mobile Satellitenkommunikation im Ka-Band (Förderkennzeichen 50YB0913 – 50YB0915),“ Technische Informationsbibliothek (TIB), Hannover, 2012.
- [39] 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.
- [40] ETSI EN 302977 V1.1.2, *Satellite Earth Stations and Systems (SES); Harmonized EN for*



---

*Vehicle-Mounted Earth Stations (VMES) operating in the 14/12 GHz frequency bands covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE directive, 2010-02.*

- [41] ETSI EN 303 978 V1.1.0, *Satellite Earth Stations and Systems (SES); Harmonized EN for Earth Stations on Mobile Platforms (ESOMP) transmitting towards satellites in geostationary orbit in the 27,5 GHz to 30,0 GHz frequency bands covering the essential requirements of article 3.2, 2012-07.*
- [42] M. J. Gonzalez und et al, „Low cost and compact Ka-band mobile satcom terminal,“ in *2014 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2014.
- [43] „emergency.lu,“ [Online]. Available: <http://www.emergency.lu>.
- [44] „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].

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel KASYMOSA – Ka-Band Systeme für die mobile Satellitenkommunikation		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Del Galdo, Giovanni; Hein, Matthias; Mitschele-Thiel, Andreas; Probst, Manuel; <i>et al.</i>	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.10.2016	
	6. Veröffentlichungsdatum 24.03.2017	
	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 1319, 50 YB 1320, 50 YB 1321	
	11. Seitenzahl 100 + 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 44	
	14. Tabellen 2	
	15. Abbildungen 79	
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 Weltweite Kriseneinsätze erfordern zuverlässige und unabhängige Kommunikationsmittel, die schnell verfügbar und von terrestrischen Ereignissen unabhängig sind. Als Lösung bietet sich die mobile Satellitenkommunikation an, insbesondere durch die immer mehr vorhandenen Kapazitäten im Ka-Band, die eine breitbandige Kommunikation mit hohen Datenraten ermöglichen. Die im Projekt entwickelten Technologien verbessern QoS der einzelnen Dienste mit Hilfe eines modularen, agentenbasierten Ressourcenverwaltungssystems, welches ein Relationenmodell zur Berücksichtigung von Pfadbeziehungen zur Grundlage hat. Dabei wird dem mobilen Satellitenkanal Rechnung getragen, indem die Terminals in unterschiedliche Kanalgruppen eingeteilt werden und somit eine unterschiedliche Linkadaption für diese Gruppen möglich wird. Die dynamische Adaption erfolgt bandbreiteneffizient, da ein LTE-ähnliches SC-FDMA-Verfahren als Wellenform eingesetzt wird. Mehrere Bauformen für Nachführsysteme und Antennen wurden untersucht. Dabei wurden unterschiedliche Nachführsysteme für High-Gain-Antennen mit platinenbasierten Speisestrukturen realisiert, sowie eine Low-Profile-Antenne auf Basis einer Leaky-Wave-Antenne realisiert. Diese ist mit einem breitbandigen Paneel, das das gesamte Ka-Band in Sende- und Empfangsrichtung abdecken kann, ausgestattet worden. Von jedem Antennentyp wurde eine Version implementiert, die über eine einzelne Glasfaser mit dem Modem verbunden werden kann. Die Erfahrungen mit unterschiedlichen Nachführsystemen und –algorithmen wurden in ein generisches Modell überführt, welches zur Simulation von diversen Positionierergeometrien mit entsprechender Aktorik und Sensorik genutzt werden kann. Darüber hinaus wurde die Testanlage für mobile Satellitenkommunikationsterminals des Fraunhofer IIS in Ilmenau um automatisierte Tests zur vollständigen Evaluation von einzelnen Terminals erweitert und durch eine Testumgebung ergänzt, die eine nutzerzentrierte Bewertung der Funktionalität von Satellitenkommunikationsnetzwerken erlaubt. Die Ergebnisse des Vorhabens KASYMOSA 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, fiber to the antenna, FTTA		
20. Verlag	21. Preis	

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title KASYMOSA – Ka-Band Systeme für die mobile Satellitenkommunikation	
4. author(s) (family name, first name(s)) Del Galdo, Giovanni; Hein, Matthias; Mitschele-Thiel, Andreas; Probst, Manuel; <i>et al.</i>	5. end of project 2016/10/31
	6. publication date 2017/03/24
	7. form of publication Printed and electronic
8. performing organization(s) (name, address) Ilmenau University of Technology 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 1319, 50 YB 1320, 50 YB 1321
	11. no. of pages 100 + annex
12. sponsoring agency (name, address) Raumfahrt-Agentur des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. Königswinterer Str. 522-524 53227 Bonn	13. no. of references 44
	14. no. of tables 2
	15. no. of figures 79
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 Main topic of the project KASYMOSA was the investigation and development of technologies for mobile satellite communication systems in the Ka band. Worldwide emergency response missions proof the need for reliable communication systems. Satellite communication provides a solution for this need because of its independency from terrestrial disasters and quick availability. Especially more and more Ka band satellite capacity enables communication with higher bandwidth and data rates. The developed technologies enhance QoS for services on the basis of a modular, agent based resource management system that uses a model for path relations. All connected terminals are divided into channel groups to encounter the changing conditions of a mobile satellite channel by different link adaptations. These dynamic adaptations work bandwidth efficient because a SC-FDMA based waveform is used. Several designs for tracking systems were investigated. Tracking systems with different numbers of moveable axes were used for high gain antennas with a new developed printed circuit based feed system and a leaky wave based panel antenna was realized. The panel of this antenna is able to handle the whole bandwidth of the Ka band in receive and transmit direction. One version of each antenna type was realized with a single optical fiber to connect with the modem. The experience with the different tracking systems was used to implement a generic model for simulation of tracking systems with different designs, sensors and actuators. Furthermore the Fraunhofer testrange for mobile satellite communication terminals in Ilmenau was expanded to perform tests for an automatized complete evaluation process. Additionally the test range's portfolio was completed by a testing environment for user centered evaluation and rating of the functionality of whole satellite networks. The results of the project KASYMOSA will contribute to developments for better mobile terminals and to enable mobile satellite communication at Ka band in consideration of emergency responder's needs in catastrophic situations.	
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, fiber to the antenna, FTTA	
20. publisher	21. price