

**LARUS: LAGEUNTERSTÜTZUNG BEI SEENOTEINSÄTZEN
DURCH UNBEMANNTEN LUFTFAHRTSYSTEME**



Teilvorhaben:

**„Sichere und robuste Kommunikation sowie
funkbasierte Ortung von Schiffbrüchigen in
Seenotrettungsszenarien“**

TU Dortmund (TUDO)

Schlussbericht



Projektkronym	LARUS
Titel des Verbundvorhabens	Lageunterstützung bei Seenoteinsätzen durch unbemannte Luftfahrtsysteme
FKZ	13N14133
Laufzeit des Vorhabens	15.10.2016 – 31.12.2019
Programm	Bundesministerium für Bildung und Forschung Forschung für die zivile Sicherheit Bekanntmachung: „Zivile Sicherheit – Innovative Rettungs- und Sicherheitssysteme“

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N14133 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Informationen des Zuwendungsempfängers



TU Dortmund
Lehrstuhl für Kommunikationsnetze
Communication Networks Institute (CNI)
Prof. Dr.-Ing. Christian Wietfeld
(Projektkoordinator)
Otto-Hahn-Straße 6
44227 Dortmund
Tel.: 0231-755-2300
E-Mail: christian.wietfeld@tu-dortmund.de

Inhaltsverzeichnis

I. Kurzbericht.....	1
1. Ursprüngliche Aufgabenstellung und wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	1
2. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	1
3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	3
II. Eingehende Darstellung.....	4
1 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ergebnisse.....	4
1.1 Arbeitspaket 1: Systementwurf und Einsatzszenarien	4
1.2 Arbeitspaket 2: UAS-Anpassung für die Seenotrettung.....	9
1.3 Arbeitspaket 3: Automatischer Betrieb & Integration in den zivilen Luftraum..	11
1.4 Arbeitspaket 4: Sichere Long-Range Telemetrie und Videoübertragung.....	14
1.5 Arbeitspaket 5: Unterstützung durch einsatzspezifische Sensorik, Datenanalyse und Benutzerschnittstellen.....	31
1.6 Arbeitspaket 6: Validierung und Pilotversuche.....	38
2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	50
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit	51
4 Voraussichtliche Nutzung.....	52
5 Fortschritte bei anderen Stellen	54
6 Öffentlichkeitsarbeit und Verwertung wissenschaftlicher Ergebnisse	54
6.1 Vorträge auf Fachveranstaltungen.....	54
6.2 Wissenschaftliche Veröffentlichungen und Publikationen.....	56
6.3 Videoproduktion.....	58
6.4 Webauftritt	60
6.5 Medienecho	60
Abkürzungsverzeichnis.....	63

I. Kurzbericht

1. Ursprüngliche Aufgabenstellung und wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Ziel des LARUS-Projekts war die Entwicklung und Evaluierung eines unbemannten Luftfahrtsystems (*Unmanned Aerial System*, UAS), dessen Einsatz Lageunterstützung bei der Seenotrettung ermöglicht. Mögliche Unterstützungsfunktionen des Systems sind dabei

- die (auch funkbasierte) Lokalisierung von Schiffbrüchigen und Gegenständen,
- die Identifikation und Beobachtung der Lage durch Live-Sensordaten, sowie
- die Reichweitenerhöhung der Kommunikationsverbindung für den Einsatz von Telemedizin (Mobile Relaisstation).

Die technisch-wissenschaftlichen Aufgabenstellungen des Projekts gliederten sich in vier Hauptgesichtspunkte: wetterverträgliches Flugsystem, autonomer Betrieb und Integration in den Luftraum, einsatzspezifische Sensorik und Datenverarbeitung und zuverlässige Langreichweiten-Kommunikation.

Das Teilvorhaben der TU Dortmund setzte Schwerpunkte in der Kommunikation und Aufgabenplanung. Neben der Realisierung einer spezifischen, mobilen LTE Basisstation sollte auch die nahtlose Kombination mehrerer LTE-Kommunikationsverbindungen zu einem Multi-Link zur Erhöhung der Zuverlässigkeit untersucht werden. Weiterhin sollte erforscht werden, wie Funksignale einer vermissten Person, beispielsweise ausgesendet durch ein Mobiltelefon, zur Lokalisierung genutzt werden können.

2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Konsortium setzte sich aus sechs Partnern aus Wirtschaft sowie Wissenschaft und Forschung zusammen. Die Laufzeit des Projektes war 3 Jahre (zuzüglich einer zweieinhalbmonatigen Verlängerung). Die rettungsfachliche Koordination hatte die Deutsche Gesellschaft zur Rettung Schiffbrüchiger inne. Die Rolle der Konsortialführung wurde durch die TU Dortmund ausgefüllt.

Wie im Folgenden dargestellt, gliederte sich das Projekt in sechs Arbeitspakete (AP). Die TU Dortmund war in allen Arbeitspaketen aktiv.

Das **Arbeitspaket 1** diente der grundlegenden Spezifizierung und Analyse der Anforderungen unbemannter Luftfahrtsysteme zur Lageunterstützung in der Seenotrettung. Die TU Dortmund hat hier neben der Koordination des AP insbesondere die Zusammenstellung der Gesamtarchitektur und Schnittstellendefinition des Systems beigetragen und so früh eine effiziente Zusammenarbeit der Partner gesi-

chert. Das **Arbeitspaket 2** behandelte primär die Anpassung und Ausrüstung des Fluggerätes. Hier hat die TU Dortmund mit dem Communication Gateway eine zentrale Bordkomponente beigesteuert, über die alle Nutzlastmodule an den Datenlink angebunden wurden. Sowohl die Entwicklung des Kommunikations-Gateways als auch die Integration mit den Nutzlastkomponenten auf Hardware- und Softwareebene standen im Fokus der Arbeiten. Ziel von **Arbeitspaket 3** war die Erhöhung des Automatisierungsgrades des Systems und die Integration in den Luftraum durch Maßnahmen zur Kollisionsvermeidung. Um die Kollisionsvermeidung zu unterstützen hat die TU Dortmund hier eine Schnittstelle zur Abfrage von ADS-B Daten im Missionsgebiet bereitgestellt. Im Bereich der Aufgabenplanung lag der Fokus darüber hinaus auf der Definition von Suchstrategien gemeinsam mit der DGzRS sowie der Umsetzung dieser in einem Trajektorienplaner durch die TU Dortmund. Damit Pläne während eines Einsatzes an das Fluggerät übertragen werden können wurde eine entsprechende Schnittstelle zum Autopilotensystem von Hanseatic Aviation Solutions geschaffen. **Arbeitspaket 4** hatte die Entwicklung von zuverlässigen Kommunikationsverbindungen zum Ziel. Hier hat die TU Dortmund eine eigene, mobile LTE Basisstation entwickelt, die in der Bodenstation installiert werden kann. Die Verbindung über das eigene LTE-Netz kombiniert mit den Netzen öffentlicher Anbieter zur Erhöhung der Kapazität und Robustheit wurde an Hand eines Multi-Link-Konzeptes implementiert und evaluiert. Weiterhin wurde eine miniaturisierte LTE-Basisstation auf Software-Defined Radio (SDR) Basis entwickelt, die in der Spitze des UAV transportiert werden, und somit zusätzliche Kommunikationsinfrastruktur im Einsatzgebiet bereitstellen kann. Sensorik und Anwenderschnittstellen waren Schwerpunkte in **Arbeitspaket 5**). Hier hat die TU Dortmund sowohl die Benutzeroberfläche als auch die Server-Software der verteilten Lagedarstellung implementiert. Die Benutzeroberfläche konnte neben der Bodenstation auch an externen Stellen (z.B. MRCC Bremen) genutzt werden um unter anderem die Mission des UAS auf einer Kartenansicht und als Live-Video zu verfolgen sowie Suchaufträge zu planen und an das Flugsystem zu übermitteln. Die Serverseite des Systems übernahm die Verteilung von Zustands- und Videodaten an alle Instanzen der Benutzeroberfläche in Echtzeit. Ein weiterer Fokus der lag auf der funkbasierten Ortung. Das hier von der TU Dortmund erforschte System ist in der Lage, Funksender unter Berücksichtigung eines maritimen Kanalmodells effektiv zu lokalisieren. Das **Arbeitspaket 6** validierte Aktivitäten im Projekt und sicherte die Vorstellung von Ergebnissen für eine breite Fachöffentlichkeit. Als Konsortialführer hat die TU Dortmund hier die DGzRS bei der rettungsfachlichen Koordination und Planung von zahlreichen Integrationstreffen und umfangreichen Validierungstests unterstützt. In aufwändig geplanten und dokumentierten *Early* und *Final Demonstrator* Präsentationen konnten sich Stakeholder zum Stand der Forschung in LARUS informieren und Feedback hierzu einbringen. Weiterhin hat die TU Dortmund das Projekt auf Fachtagungen, und im Rahmen wissenschaftlicher Veröffentlichungen auf neun internationalen Konferenzen, in einem Journal und in einem Fachmagazin vorgestellt.

Projektjahr	1				2				3				4	Personenmonate (TU Dortmund/ Konsortium)
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	
AP1: Systementwurf und Einsatzszenarien	■	■	■			■					■	■		7 / 29
AP2: UAS-Anpassung für die Seenotrettung			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		4 / 62
AP3: Automatischer Betrieb & Integration in den zivilen Luftraum		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		24 / 89
AP4: Sichere Long-Range Telemetrie und Videoübertragung			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		28 / 59
AP5: Unterstützung durch einsatzspezifische Sensoren, Datenanalyse und Benutzerschnittstelle			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		18 / 67
AP6: Validierung und Pilotversuche			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	17 / 80

Abbildung 1: Gantt-Plan zur Darstellung des Ablaufs des LARUS Projekts.

3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

In LARUS wurden neben der DGzRS auch potenzielle Anwender aus dem Kreis der assoziierten Partner bei Konsortialtreffen und Demonstrationen in die Diskussion einbezogen (z.B. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie). Im regulatorischen Bereich hatte das LARUS-Projekt unter Anderem Schnittstellen zur Bundesnetzagentur (MMSI und Frequenzzuteilung LTE), dem BMVI (Sperrzone für Flug außer Sicht) und der Landesluftfahrtbehörde Mecklenburg-Vorpommern (Aufstiegserlaubnis). Der assoziierte Partner Deutsche Telekom überließ dem Verbund LTE-Frequenzen während der Validierungsphase. Die Firma Weatherdock stellte ein angepasstes AIS-Modul in einem UAV-tauglichen Formfaktor zur Verfügung. Die Firma Droniq stellte einen Transponder für das UAV zur Verfügung und einen Zugang zu ihrem „Unmanned Traffic Management“ System, über das in der Bodenstation Informationen über Luftraumteilnehmer von der Deutschen Flugsicherung angezeigt werden konnten.

Weiterhin haben die Betreiber der Flugplätze Rotenburg-Wümmen und Peenemünde das Forschungsprojekt wohlwollend durch die Bereitschaft der Eingliederung des LARUS-UAS in den Flugbetrieb vor Ort, und durch die Bereitstellung von Infrastruktur unterstützt

II. Eingehende Darstellung

1 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ergebnisse

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse des Teilprojekts anhand der einzelnen Arbeitspakete (AP) aufgeführt. Dabei ist zu beachten, dass die TU Dortmund in alle Arbeitspakete des LARUS Projektes eingebunden war.

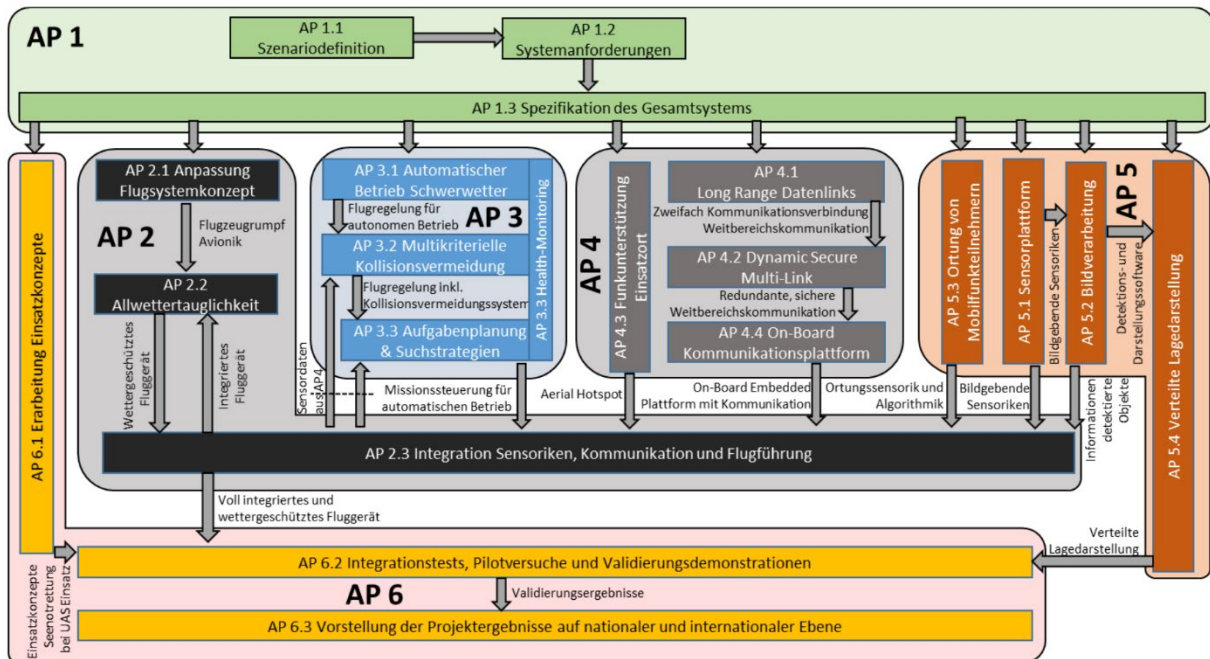


Abbildung 2: Übersicht der Arbeitspakete in LARUS.

1.1 Arbeitspaket 1: Systementwurf und Einsatzszenarien

Zur Erarbeitung der Systemarchitektur unter Leitung der TU Dortmund wurden zunächst Einsatzszenarien und technische Anforderungen definiert. Anhand der Szenariobeschreibungen wurden spezifische Kriterien identifiziert, aus denen sich erforderliche Fähigkeiten des Systems ableiten lassen.

Unbemannte Luftfahrtsysteme weisen Unterstützungspotenzial für Rettungseinsätze sowohl in der Reaktions- als auch der Such- und Rettungsphase auf. Dieses Spektrum von Unterstützungsfunktionen wurde in eine Reihe technischer Merkmale überführt, die die übergeordneten technischen Entwicklungsziele des LARUS-Systems darstellen.

- **Automatischer Flugbetrieb** – das UAS kann autonom starten und zum Einsatzort fliegen.
- **Automatische Suche** – durch intelligente Aufgabenplanung und Suchstrategien wird eine selbstständige Suche ermöglicht.

- **Echtzeit-Datenübertragung** – eine Langstrecken-Verbindung zum Land gewährleistet die Übertragung von Echtzeitdaten.
- **Multisensor-Lokalisierung** – an Bord des Flugsystems befindet sich eine Suite von (teils neuartiger) Sensorik: Kamera, Wärmebildkameras, Laserbeleuchtung, Funklokalisierung, AIS.
- **Automatische Lokalisierung** – das UAS nimmt eine initiale Klassifikation der Sensordaten vor und leitet potenzielle Positionen von Vermissten weiter.
- **Kommunikationsrelais** – ein Aerial Hotspot an Bord des Fluggeräts ermöglicht Kontaktaufnahme zu Schiffbrüchigen sowie die Versorgung von Rettern mit einer Datenverbindung.

Um den sicheren Betrieb des Fluggerätes zu ermöglichen, musste eine weitere, kritische Funktion erfüllt werden: die **Integration in den zivilen Luftraum** mittels:

- Selbstüberwachung und Notfallverhalten und
- Automatischer Kollisionsvermeidung.

Die TU Dortmund hat hier insbesondere zu den kommunikationstechnischen Aspekten des Gesamtsystems Beiträge geleistet. Diese sind in zwei Funktionen des Systems besonders stark verzahnt:

- Als **Kommunikationsrelais** kann das System zusätzliche Kommunikationsressourcen am Einsatzort bereitstellen. Diese können die Koordination vor Ort während Suche und Rettung erleichtern, sowie zur Kontaktierung von Havaristen oder zur Übertragung telemedizinischer Daten genutzt werden.
- Eine **Echtzeit-Datenübertragung** verbindet das unbemannte Flugsystem mit seiner Bodenstation. Sie stellt einerseits den Anknüpfungspunkt für das Kommunikationsrelais dar, ermöglicht aber auch die Darstellung von Bildern und Videos in der Bodenstation mit geringer Verzögerung. Gemeinsam mit der schnellen Mobilisierung des Systems wird so die Zeitspanne minimiert, innerhalb der den Seenotrettern ein erstes Bild der Lage vor Ort vorliegt. Bei der Rettung von Schiffbrüchigen steht zudem die Luftperspektive als zusätzliche Option für die Lagebeobachtung zur Verfügung.

Physikalisch ist das Gesamtsystem in drei Segmente unterteilt: **Luft** (das UAV), **Boden** (die Bodenstation) und **Backhaul** (MRCC Bremen und weitere Stakeholder). Die nachfolgende Abbildung 3 zeigt die Architektur und die Subsysteme im Überblick während die Tabelle 1 die Definition der Komponenten mit den Verantwortlichkeiten der Umsetzung im Gesamtprojekt aufzeigt.

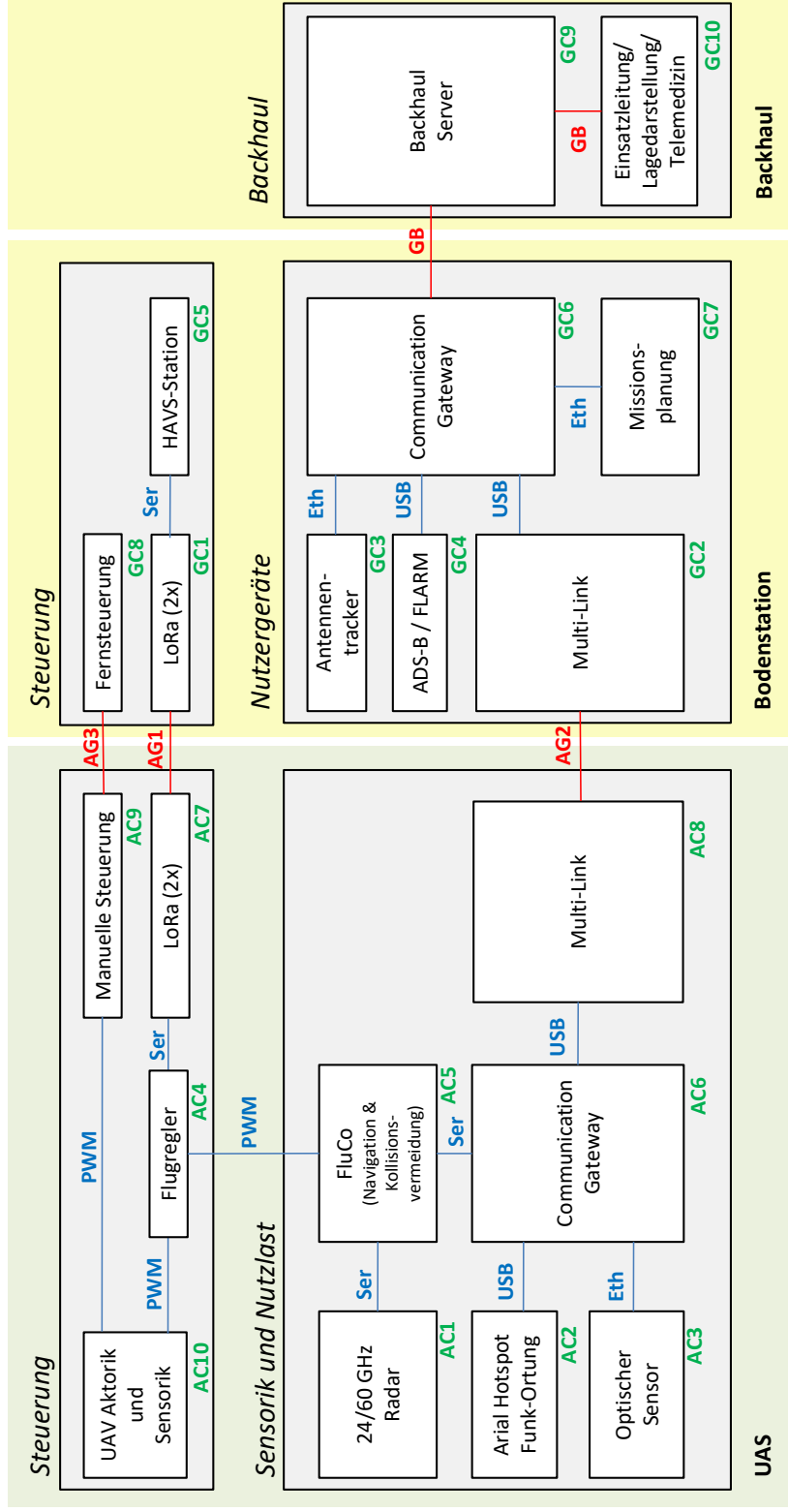
Die Luft- und Bodensegmente sind dabei jeweils in zwei Bereiche unterteilt, deren Subsysteme zur Erhöhung der Robustheit weitgehend voneinander isoliert sind.

Die Komponenten im Bereich **Steuerung** sind unmittelbar für die Funktionsfähigkeit des Flugsystems zuständig. Sie enthalten im Luftsegment Aktorik, Sensorik und Avi-

onik und im Bodensegment die Kontrollstation sowie die manuelle Steuerung für kritische Manöver. Komponenten im Bereich **Nutzlast** erfüllen rettungstechnische Funktionen und unterstützen beim sicheren Betrieb durch zusätzliche Selbstüberwachung und Kollisionsvermeidung.

Die Bodenstation und das Fluggerät sind über mehrere Funkverbindungen miteinander vernetzt, siehe AG-Schnittstellen in Abbildung 3. AG1 ist ein redundant ausgeführter LoRa-Link für betriebskritische Kommunikation zwischen Autopiloten und UAV-Bodenstation. Die Echtzeit-Datenschnittstelle AG2 ist für Nutzerdaten vorgesehen. Die Kommunikation erfolgt wahlweise über LTE, WLAN oder weitere Technologien, die zu einem Multi-Link aggregiert werden können. AG3 kann genutzt werden, um das UAS manuell zu steuern und somit jederzeit vom Boden die Kontrolle zu übernehmen. Die Bodenstation ist per LTE an das Internet angebunden und somit mit Subsystemen im Backhaul vernetzt. Für den Datenaustausch stehen Webtechnologien wie HTTP und WebSockets zur Verfügung.

Die frühe Fertigstellung der Systemarchitektur hatte eine positive Auswirkung auf die Koordination und Kooperation innerhalb des Verbundes. Durch die Separation der Felder Steuerung und Nutzlast wurden schon in der Konzeptionierungsphase Voraussetzungen zur Entkopplung von Nutzlast und UAV-Plattform geschaffen, was dezentrale Integrationsarbeiten ermöglichte. Weiterhin wurde die Echtzeit-Datenübertragung transparent gestaltet und somit weitere Abhängigkeiten aufgelöst. Diese Architektur-bedingte Modularität hat die Integrationsarbeiten der Partner im Verlauf des Projektes stark erleichtert und zur Robustheit des Gesamtsystems beigetragen, sowie den Grundstein für eine flexible Weiterverwertung der Ergebnisse gelegt.



Legende AC—Komponente Luft GC—Komponente Boden PWM—Pulsweitenmodulation Ser—Serielle Schnittstelle USB—USB-Verbindung
 Eth—Ethernet AG—Luft-zu-Boden-(Air-to-Ground)-Kommunikation GB—Backhaul-Kommunikation

Abbildung 3: Subsysteme in den Segmenten Luft, Boden und Backhaul, sowie deren Schnittstellen.

Funktionale Definition der Komponenten

Luftsegment

	Name	Partner	Funktionen
AC1	20/40 GHz Radar	IMST	AK
AC2	Aerial Hotspot, funkba- sierte Ortung	TUDO	AL, KR, ML
AC3	Optisches Sensorsystem	OP	AL, ML
AC4	Flugregler	HAVS	SN
AC5	FluCo	RWTH	AF, AK, SN
AC6	Communication Gateway	TUDO	ED
AC7	Lora Modul (x2)	IMST	ED
AC8	Multi-Link	TUDO	ED
AC9	Manuelle Steuerung	HAVS	SN
AC10	UAV-Steuerung	HAVS	SN

Bodensegment

	Name	Partner	Funktionen
GC1	LoRa Modul (x2)	IMST	ED
GC2	Multi-Link	TUDO	ED
GC3	Antennen-Montierung	TUDO	ED
GC4	ADS-B / FLARM	IMST	AK
GC5	Bodenstation	HAVS	SN
GC6	Communication Gateway	TUDO	ED
GC7	Missionsplanung	TUDO	AF, AK, AS, SN
GC8	Fernsteuerung	HAVS	SN
GC9	Backhaul-Server	TUDO	Nutzerschnittstelle
GC10	Backhaul-Client	DGzRS	Nutzerschnittstelle

Abkürzungen	AF —Automatischer Flugbetrieb	AK —Automatische Kollisionsvermeidung
	AL —Automatische Lokalisierung	AS —Automatische Suche
	ED —Echtzeit-Datenübertragung	KR —Kommunikationsrelais
	ML —Multisensor-Lokalisierung	SN —Selbstüberwachung und Notfallverhalten

Tabelle 1: Definition der Komponenten des Systems.

1.2 Arbeitspaket 2: UAS-Anpassung für die Seenotrettung

Die Entwicklung von Funktionsmustern spielte im LARUS-Projekt eine zentrale Rolle. Hierzu mussten Komponenten im Hinblick auf die Systemspezifikation ausgewählt, miniaturisiert und integriert werden. Alle vorgesehenen Funktionen konnten im Rahmen einer umfangreichen Nutzlastplanung unter Berücksichtigung von Gewicht, Abmessungen und Energiebedarf an Bord des LARUS-UAS untergebracht werden. Einschränkungen für die Auslegung der Komponenten waren insbesondere in den Dimensionen Bauraum, Versorgungsspannung und Leistungsaufnahme gegeben.

Die Integrationsarbeiten der TU Dortmund bezogen sich hauptsächlich auf die Komponenten aus den Arbeitspaketen 4 und 5 (siehe Abschnitte 1.4 und 1.5). Die Komponenten *Communication Gateway* und *Multi-Link* aus der Gesamtarchitektur wurden als eine kompakte Baugruppe mit Hilfe einer eigens entwickelten Platine realisiert (siehe Abbildung 4). Diese ermöglichte den platzsparenden Anschluss von zwei commercial-off-the-shelf (COTS) LTE-Modems. Da das Gateway eine Reihe von Schnittstellen und Protokollen unterstützen musste, wurde ein leistungsstarker Embedded-PC als Kernkomponente ausgewählt (ODROID-XU4). Auf dem Bordrechner kommt ein Linux Betriebssystem zum Einsatz, welches bereits Treiber für gängige Protokolle (Video, TCP/IP, Seriell, ...) enthält. Zusätzlich implementierte Dienste, erlauben den vollständigen Zugriff und damit die Kontrolle aus der Ferne und im laufenden Betrieb.

Nutzlast	Schnittstelle	Protokoll	Aufgabe
FPV Kamera	USB	USB-Video	Echtzeitvideo, First Person View
LTE Modem (x2)	PCIe	Seriell	Multi-Link (öffentliches Netz)
LTE Modem	USB	Seriell	Multi-Link (eigenes Netz)
FluCo Controller (RWTH Aachen)	USB	Seriell	Erfassung von Zustandsdaten für Healthmonitoring
Gimbal (OptoPrecision)	Ethernet	TCP	Optisches Sensorsystem, Detektion von Personen und Objekten
GNSS Modul	USB	Seriell	Quelle für Georeferenzierung der Nutzlastdaten
Einzelbildkamera	WLAN	HTTP	Hochauflösende Lagebilder

Tabelle 2: Mit dem Communication-Gateway interagierende Nutzlasten.

Die Aufteilung des Gesamtsystems in Steuerung und Nutzlast (vgl. Abschnitt 1.1) wurde konstruktiv weitergeführt, indem alle Nutzlastkomponenten in der Spitze des UAV platziert wurden. Die Spitze wurde über dedizierte Stromkreise und einen Re-

serve-Akku mit Leistung versorgt und konnte als Einheit im Batteriebetrieb auch unabhängig vom Rest des Systems getestet werden. Weiterhin wurde sie gegen Eindringen von Wasser isoliert, und diente damit als geschützter Einbauraum für die Nutzlastkomponenten.

Die meisten Hardwaremodule waren bereits herstellerseitig EMV-geschirmt. Dennoch ist bei einem internen Einbau des GPS-Moduls zu beach-

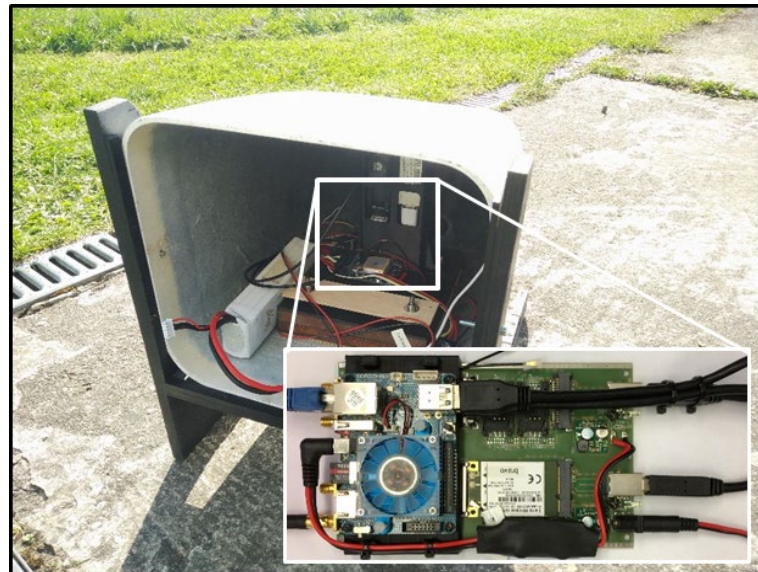


Abbildung 4: In UAV-Spitze integriertes Kommunikationsmodul und Embedded Computer.

ten, dass die empfangenen Signale durch die Glasfaser Spitze gedämpft werden und schon kleinste Störungen in den GPS-Frequenzbändern den Empfang beeinträchtigen können. Hier wurden im Labor der TU Dortmund Emissionen am Embedded-Rechner beim Betrieb von USB 3.0 gemessen, weshalb die entsprechenden Komponenten mit USB 2.0 angebunden wurden.

Insgesamt konnte die Systemarchitektur (vgl. Abschnitt 1.1) ohne größere Änderungen hardware- und integrationstechnisch umgesetzt werden. Die Nutzung von USB als Schnittstelle zu vier von acht Komponenten erlaubte den Einsatz von kommerziell verfügbaren Hardwaremodulen. Dieser Faktor war für die Entwicklung eines Funktionsmusters im Forschungsprojekt unabdingbar, da es für entsprechende Module oft vielfältige Auswahlmöglichkeiten gibt und sie kurzfristig lieferbar sind. Für weitere Entwicklungsschritte sollte beachtet werden, dass sich die mechanische Auslegung von USB-Steckern nicht uneingeschränkt für den Flugbetrieb eignet. Um ein Lösen der Stecker durch Vibrationen zu verhindern, wurden alle Verbindungen zusätzlich gesichert. Weiterhin ist zu beachten, dass der Einsatz von USB-Hubs insbesondere für Komponenten, die über USB mit Strom versorgt werden, zusätzliche Komplexität erzeugt. Der Einsatz eines vollwertigen Linux-Rechners für die Anbindung von Nutzlasten hat sich bewährt. Hier konnte einerseits auf die Leistungsfähigkeit des Linux-Kernels im Bereich der Schnittstellen und Protokolle zurückgegriffen werden und andererseits gewährleisteten Funktionen des Betriebssystems wie die robuste Orchestrierung eigener Dienste sowie die Konfiguration und Beobachtung des Systems „over-the-air“ Transparenz und Flexibilität auf der Softwareebene.

1.3 Arbeitspaket 3: Automatischer Betrieb & Integration in den zivilen Luftraum

Das unbemannte LARUS-System muss für den Einsatz in der Seenotrettung unter anderem in der Lage sein, definierte Suchmuster in großer Distanz zur Bodenstation abzufliegen. Solche Missionen finden zum großen Teil außerhalb der Sichtweite der Station und damit außer Reichweite der manuellen Steuerung statt, was die Kontrolle des Flugsystems durch einen Autopiloten erfordert. Dieser war zu Beginn des Projekts bereits Teil der Plattform und ist mit grundlegenden Fähigkeiten wie dem Abarbeiten eines am Boden vordefinierten Flugplans und Sicherheitsmaßnahmen im Fehlerfall, beispielsweise einer selbstständigen Rückkehr zum Startgebiet bei Verlust der Telemetrier Verbindung, ausgestattet.

Für den Einsatz in den LARUS-Szenarien wurde die Plattform um eine Schnittstelle erweitert, über die im Flug per Telemetrieprotokoll Trajektorien an den Autopiloten übertragen werden können. Diese wurde genutzt, um möglichen Hindernissen im Luftraum mit angepassten Trajektorien auszuweichen, sowie um Suchstrategien aus der Seenotrettung automatisiert umzusetzen.

Zur Erfüllung der Anforderungen für automatische Kollisionsvermeidung wurden im ersten Schritt on-board Sender und Empfänger für das maritime Automatic Identification System (AIS) sowie für den

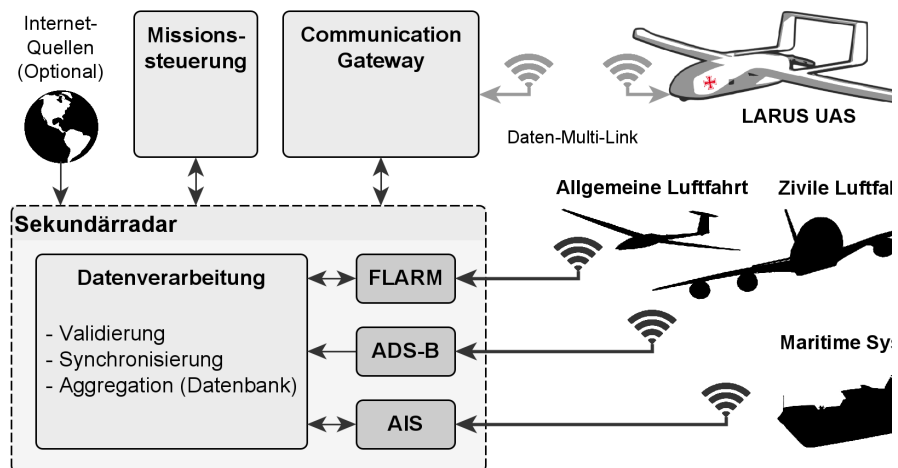


Abbildung 5: Konzept des intelligenten Sekundärradarsystems.

aeronautischen Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) in die Gesamtarchitektur integriert sowie entsprechende Hardware ausgewählt. Die Integration von AIS ist dabei auch für den Rettungsbetrieb besonders wertvoll, da sich damit das Fluggerät als fliegende Sucheinheit (SAR Aircraft) direkt für Stellen in der Umgebung identifizieren kann. Für vorausschauende Kollisionsvermeidung wurde ein System zur Bereitstellung von Hindernisdaten implementiert. Dessen aggregierte Informationen aus AIS und ADS-B können genutzt werden, um Luftraumteilnehmern, die entsprechende Signale aussenden, großflächig auszuweichen. Dabei ermöglicht eine Zeitserien-Datenbank die Auswertung von Positionshistorien, was die Sekundärradar-Kollisionsvermeidung um eine prädiktive Komponente erweiterbar macht, siehe Abbildung 5.

Parallel zur Vorbereitung der Validierung des Final Demonstrators ergab sich eine neue Entwicklung in der UAV-Regulation. Während der Erarbeitung der Aufstiegserlaubnis im Projektverlauf kam die Nutzung eines kommerziellen Sekundärradarsystems der Firma Droniq GmbH als Auflage für den Flugbetrieb hinzu. Dieses System greift auf Daten der Deutschen Flugsicherung (DFS) zu und konnte damit zusätzlich passive Luftraumteilnehmer erkennen, die durch Radarstationen der DFS erfasst wurden.

Um die automatische Suche zu ermöglichen, wurden die von DGzRS bereitgestellten maritimen Suchstrategien in parametrische Trajektoriengeneratoren überführt. Basierend auf bekannten Parametern, beispielsweise Suchgebiet und Suchstreifenbreite, können somit durch die Missionssteuerung entsprechende Suchmuster erstellt werden und an das Flugsystem übermittelt werden. Zusätzlich wurde die Möglichkeit geschaffen feinere Anpassungen am Missionsablauf vorzunehmen wie beispielsweise eine Änderung der Flughöhe oder die Pausierung und Wiederaufnahme einer Suche für Ausweichvorgänge. Um Planung und Durchführung von Missionen zu unterstützen werden zudem Distanz und Flugzeit der verbleibenden Mission sowie zum Landeplatz geschätzt und laufend aktualisiert. Das Ensemble aus Trajektoriengeneration, Missionssteuerung, Autopilot und Lagedarstellung ist in Abbildung 6 schematisch dargestellt und wird in Abschnitt 1.5 noch einmal aufgegriffen.

Als zentraler Zugriffspunkt für Daten des Gesamtsystems wurde das Robot Operating System (ROS) als Middleware im Bodensegment genutzt.

Informationsflüsse der einzelnen Komponenten wurden angebunden indem sie entweder auf vordefinierte

Datenstrukturen aus ROS (z.B. GPS Koordinaten) abgebildet, oder als LARUS-spezifische neu definierte

Datenstrukturen (z.B. Suchparameter) formatiert wurden. So sind im Netzwerk der Bodenstation sowohl

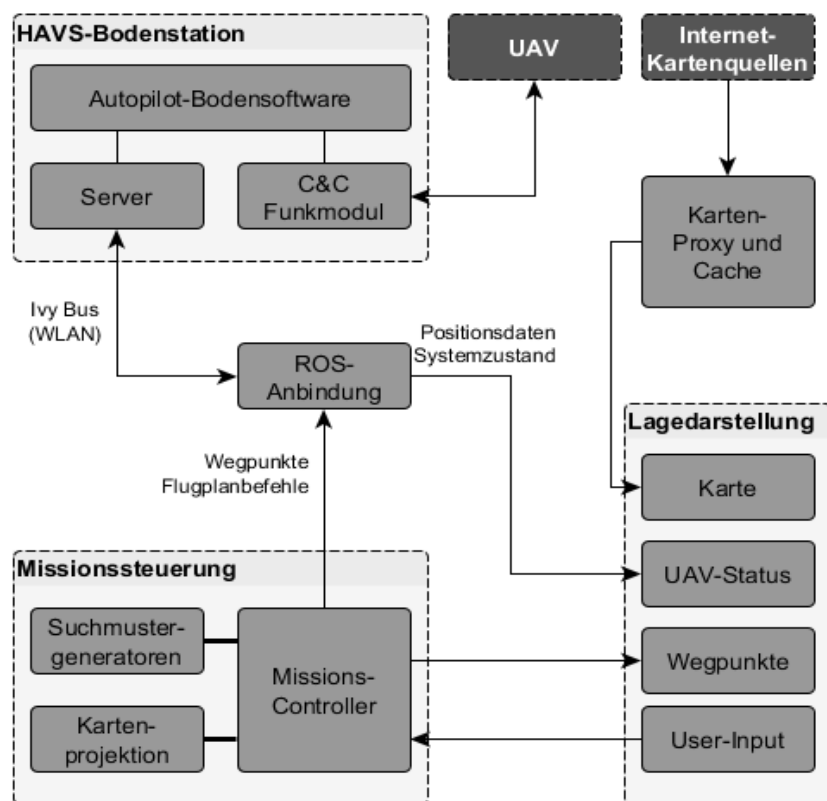


Abbildung 6: Blockschaubild des Missionsmanagementsystems.

die Zustandsdaten des UAS (empfangen über den Telemetrielink), als auch Nutzlastdaten (empfangen über den Datenlink), und Bodensegmentdaten wie der Status des Antennentracker als ROS-Datenfluss verfügbar. Eine Übersicht der in standardisierten Schnittstellen verfügbaren Informationen ist in Tabelle 3 gegeben.

Die Funktionalität der integrierten Flugführung wurde im Frühjahr 2018 in Rotenburg (Wümme) erstmalig erfolgreich getestet und im Rahmen des Early Demonstrators präsentiert (vgl. Abschnitt 1.6.2). Der Kern der Missionssteuerung wurde bis zur Validierungsphase fortlaufend erweitert und abgehärtet, und schließlich in Flugtests sowie im Final Demonstrator zur Planung und Durchführung von Suchmissionen über See genutzt.

Information	Link	Quelle	Format
Missionsplan	LAN	Bodenstation	ROS (eigene Definition)
Orientierung Antennentracker	LAN	Bodenstation	ROS (tf/tfMessage)
Suchparameter	LAN	Bodenstation	ROS (eigene Definition)
AIS-Detektionen	Multi-Link	Nutzlast	ROS (eigene Definition)
Bilddaten	Multi-Link	Nutzlast	Protobuf (eigene Definition)
FluCo-Daten	Multi-Link	Nutzlast	FluCo (eigenes Protokoll)
FPV-Stream	Multi-Link	Nutzlast	RTMP
Hochauflösende Einzelbilder	Multi-Link	Nutzlast	JPEG
LTE Systeminformationen	Multi-Link	Nutzlast	ROS (eigene Definition)
Nutzlast GNSS	Multi-Link	Nutzlast	ROS (sensor_msgs/NavSatFix)
Missionsstatus	Telemetrie	Autopilot	ROS (std_msgs/UInt16)
Modus Autopilot	Telemetrie	Autopilot	ROS (std_msgs/String)
Navigationspunkt	Telemetrie	Autopilot	ROS (geometry_msgs/Point)
Telemetrielink-Status	Telemetrie	Autopilot	ROS (std_msgs/String)
UAV-Akkuspannung	Telemetrie	Autopilot	ROS (sensor_msgs/BatteryState)
UAV-Geschwindigkeitsvektor	Telemetrie	Autopilot	ROS (geometry_msgs/TwistStamped)
UAV-GNSS-Position	Telemetrie	Autopilot	ROS (sensor_msgs/NavSatFix)
UAV-Heartbeat	Telemetrie	Autopilot	ROS (std_msgs/Time)
UAV-Lage	Telemetrie	Autopilot	ROS (geometry_msgs/Quaternion)

Tabelle 3: Übersicht der im Bodennetzwerk zur Verfügung stehenden Informationen.

1.4 Arbeitspaket 4: Sichere Long-Range Telemetrie und Videoübertragung

Eine wesentliche Herausforderung für den Einsatz unbemannter Luftfahrtsysteme in der Seenotrettung ist die Kommunikation über große Distanzen. Insbesondere die Übermittlung von Lagebildern erfordert dabei zusätzlich hohe Datenraten. Im Zeitraum des LARUS-Projekts waren keine technischen Lösungen auf dem Markt verfügbar, die ohne zusätzlichen Entwicklungsaufwand in der Lage waren, Videodatenströme und Telemetrie mit einer Reichweite von mehr als 20-30 km zu übertragen. Gleichzeitig musste zur Erhöhung der Ausfallsicherheit beim Flug außer Sicht eine redundante Kommunikationsverbindung für kritische Telemetriedaten implementiert werden. In diesem Arbeitspaket hat die TU Dortmund eine Reihe substanzieller Ziele erreicht, die im Folgenden einzeln erläutert und detailliert beschrieben werden:

- Charakterisierung und Optimierung von LTE Kommunikationsverbindungen für UAS im maritimen Umfeld (Abschnitt 1.4.1)
- Implementierung und Validierung einer zuverlässigen Datenverbindung, die mehrere Netzwerke gleichzeitig nutzt (Multi-Link) (Abschnitt 1.4.2)
- Realisierung einer an Bord des UAS mitführbaren Basisstation zur Bereitstellung von Mobilfunkressourcen über See für Retter und Schiffbrüchige (Abschnitt 1.4.3)

1.4.1 Kommunikationsverbindung: angepasste LTE Basisstation

Der Mobilfunkstandard LTE weist eine Vielzahl von Eigenschaften auf, die ihn zu einer relevanten Technologie für UAS-Datenverbindungen machen. Die LTE-Spezifikation deckt einen großen Raum von Konfigurationsmöglichkeiten für Frequenz, Bandbreite und Robustheit der Kommunikation ab. Weiterhin können LTE-Zellen für die Kompensation von Ausbreitungsverzögerungen der Funksignale über bis zu 100 km parametrisiert werden. Da der Standard Mindestanforderungen an die Empfangssensitivität und Senderqualität von Basisstationen und Endgeräten einschließt und LTE weltweit als Mobilfunktechnologie genutzt wird, ist zudem eine große Auswahl an hochwertiger Hardware auf dem Markt verfügbar. Da Mobilfunk in der Regel zur Versorgung von Nutzern am Boden und über Land eingesetzt wird, wurden im Rahmen des LARUS Projekts offene Fragestellungen für die Versorgung von Fluggeräten über See, insbesondere über große Distanzen, behandelt. Im Rahmen der Arbeiten wurden die Ausbreitungseigenschaften von Funkwellen über See in einem maritimen Funkkanalmodell charakterisiert, sowie eine für den Einsatzfall angepasste Basisstation entwickelt.

Um eine robuste und unterbrechungsfreie Kommunikation zwischen UAV und Bodenstation sicherzustellen, wurden zunächst Messungen durchgeführt, um die Eigenschaften des Funkkanals über Gewässern zu bestimmen. Bei einem im Frühjahr 2017 in der Schlei bei Schleswig durchgeführten, ersten Feldversuch wurde die

Empfangssignalstärke (Received Signal Strength, RSS) in Abhängigkeit der Entfernung zwischen Sender und Empfänger aufgezeichnet, um die distanzabhängige Dämpfung des Funkkanals initial zu charakterisieren. Die Experimente wurden mit der lizenzfrei nutzbaren LoRa-Technik in einem mit LTE verwandten Frequenzbereich durchgeführt (bei 868 MHz).

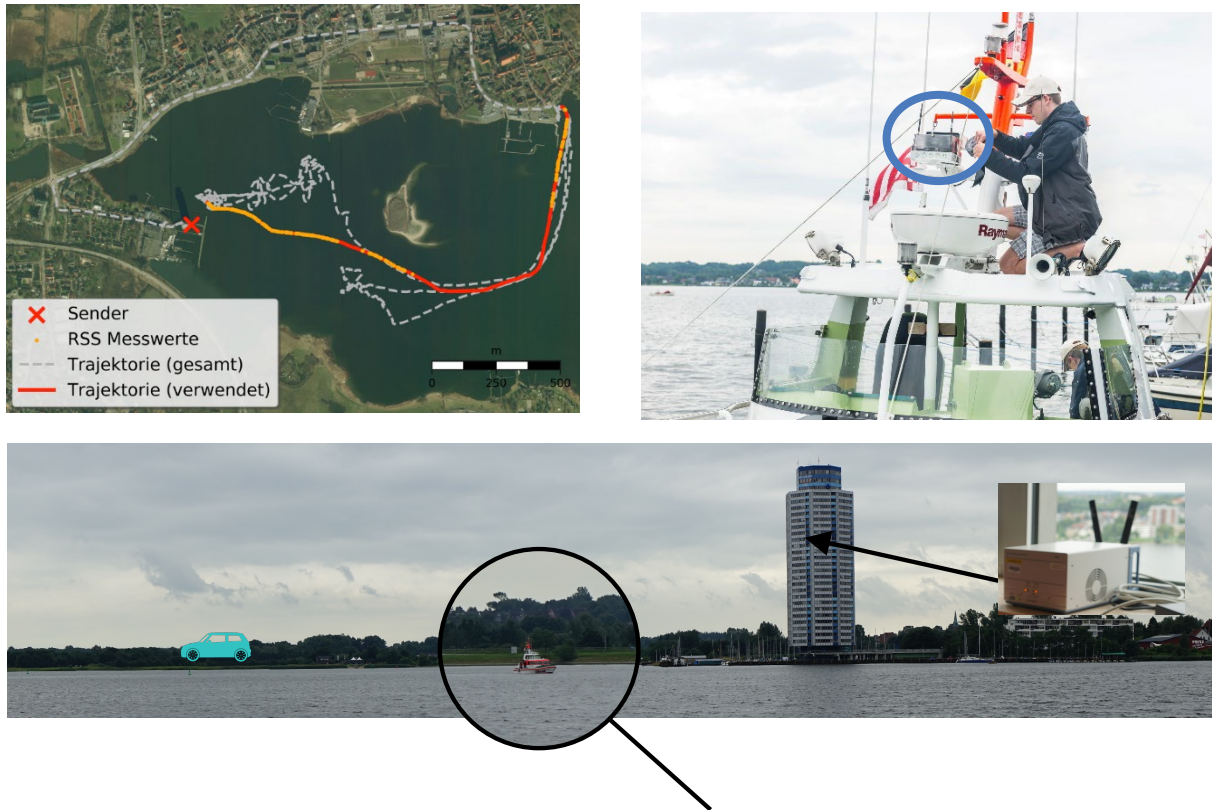


Abbildung 7: Feldversuch in Schleswig.

Links oben: Luftbild mit Messfahrtverlauf, rechts oben: Installation des Empfängers auf Rettungsboot
Unten: Wiking-Turm und sendendes Funksystem in einer oberen Etage des Gebäudes.

Bei der Funkausbreitung über Wasser überlagern sich direkte Pfade und von der Wasseroberfläche reflektierte Pfade. Da diese Überlagerung stark vom Höhenunterschied zwischen Sender und Empfänger abhängt, wurde im Feldversuch der Sender auf einem Hochhaus direkt am Wasser positioniert, während der Empfänger auf einem Rettungsboot montiert war, siehe Abbildung 7. Die gewonnenen Messergebnisse bestätigten, dass die Interferenz zwischen direktem Pfad und Reflektion an der Wasseroberfläche einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Signalqualität hat. Abbildung 8 zeigt, dass destruktive Interferenzen der beiden

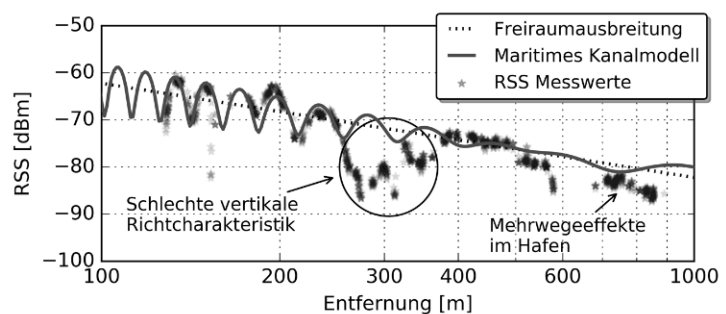


Abbildung 8: Kanalmessung im ersten Feldversuch.

Pfade eine Abweichung von bis zu etwa 8 dB von der zu erwartenden Freiraumdämpfung verursacht. Dennoch lässt sich das Interferenzmuster gut durch ein analytisches Modell annähern und somit präzisieren.

Abbildung 9 stellt die Ergebnisse weiterer Messreihen, bei denen zudem die Höhe des UAS variiert wurde, im Vergleich zu einem analytischen Modell mit Reflektionen an der Wasseroberfläche dar. Hierbei sind neben dem analytischen maritimen Kanalmodell und den rohen Messwerten RSS_{Raw} auch bereinigte Messwerte $\langle RSS_{\theta} \rangle_{10}$ dargestellt, bei denen die Antennencharakteristik und Streueffekte kompensiert wurden. Das analytische Modell beschreibt den Verlauf der erhobenen Messdaten in guter Näherung auch bei Variation der Flughöhe und bildet somit die Grundlage für Kanalmodellierung in weiteren simulativen Betrachtungen.

Für weiterführende Laboruntersuchungen unter Verwendung eines Kanalemulators mussten die identifizierten Modelle zusätzlich als *Tapped Delay Line* (TDL)-Modell mit genauer Repräsentation der verschiedenen Signalausbreitungspfade dargestellt werden. Das erarbeitete TDL-Modell wurde im Kontext der spezifischen Szenarien des Projektes, insbesondere mit Hinsicht auf die UAV-Flughöhe variabel parametrisiert und untersucht. Für die

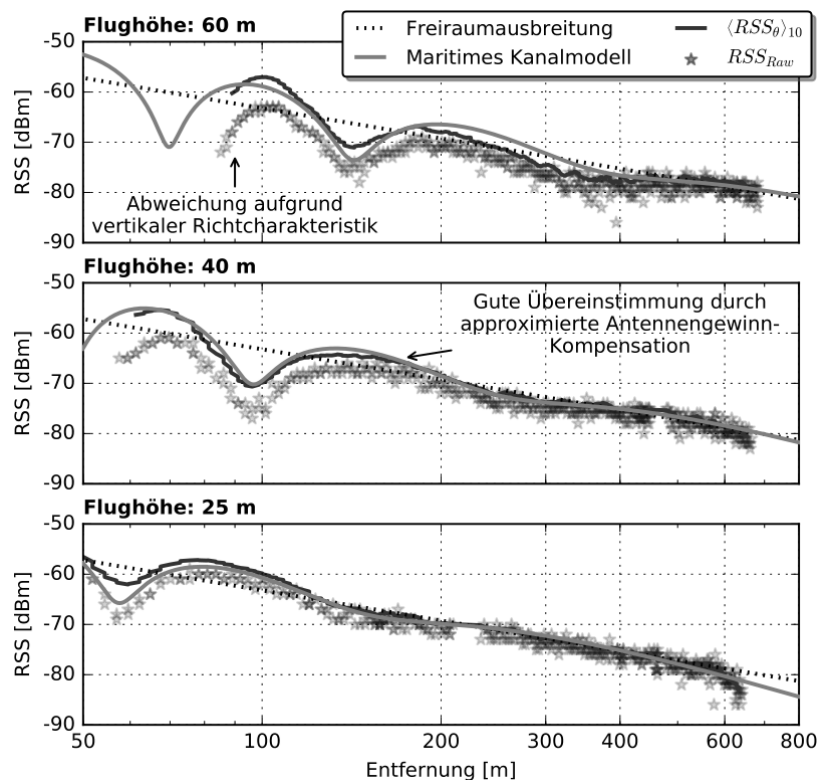


Abbildung 9: Experimentelle Evaluierung des maritimen Kanalmodells [10].

Verwendbarkeit des Modells zur Evaluierung der *Long-Range* Kommunikation ist darüber hinaus die genaue Beschreibung von Sende- und Empfangsantennen von großer Bedeutung, weshalb das Kanalmodell um diese Komponenten erweitert wurde. Weiterhin stellt die Beschaffenheit der Wasseroberfläche einen bedeutenden Umwelteinfluss dar. Die Rauheit der Oberfläche bestimmt Dämpfung und Streuung der reflektierten Signalfade. Über existierende ozeanografische Modelle, die Windstärke mit der Topografie der Meeresoberfläche verknüpfen, wurde das Kanalmodell um den Parameter Windstärke ergänzt. Abbildung 10 zeigt beispielhaft, dass stärker-

rer Wind und damit eine rauere See die Ausbreitungseigenschaften über Wasser begünstigen.

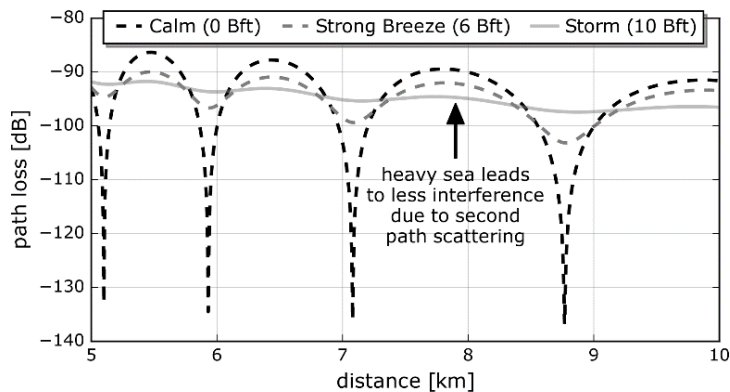


Abbildung 10: Pfadverlust im maritimen Kanalmodell in Abhängigkeit der Windstärke [1].

Das resultierende Kanalmodell ermöglichte die Eignungsbewertung verschiedener LTE-Frequenzen und dazu kompatiblen Antennentypen und -charakteristiken [1].

Neben den wissenschaftlichen Erkenntnissen lieferten die beschriebenen Untersuchungen zusätzlichen Informationsgewinn in Bezug auf die Anforderungen der im realen System einzusetzenden Hardware. Tabelle 4 zeigt ein Link-Budget, in das die LARUS-Anforderungen an Reichweite und Datenrate, sowie Vorgabewerte aus der LTE Spezifikation und das maritime Kanalmodell einfließen. Weiterhin bildet die Kanalmodellierung die Grundlage für simulative Evaluation des Multi-Links, die in Abschnitt 1.4.2 weiter unten dargestellt ist.

20 dBm	Sendeleistung UAV
+ 3 dBi	Sender-Antennengewinn
- 125 dB	Pfadverlust bei 30 km
- 18 dB	Interferenz-Margin reflektierter Pfad
+ 24 dBi	Empfänger-Antennengewinn
- -101 dBm	Empfängersensitivität Basisstation 10 MHz, MCS=5, 4.4 Mbit/s
5 dB	Link Margin

Tabelle 4: Beispielhaftes Link-Budget für eine maritime LTE-Langstreckenverbindung.

Basierend auf Betrachtungen zum Link-Budget konnten zum einen geeignete Leistungsverstärker und Frequenzfilter für die SDR-basierte Basisstation (siehe Abbildung 11) beschafft und dimensioniert werden. Zum anderen konnten für den im Projekt vorgesehenen Einsatzradius geeignete Antennen ausgewählt werden. Insbesondere stellte sich heraus, dass die gewünschte Leistungsfähigkeit des LTE-Links nur mit einer nachführenden Antenne mit starker Richtwirkung erreicht werden kann, auf deren Entwicklung weiter unten im Detail eingegangen wird.

Zur Realisierung der Long-Range LTE Basisstation wurde eine Software-Defined-Radio (SDR) basierte Lösung erforscht (siehe Abbildung 11). SDRs sind digitale Sende- und Empfangsmodule für Funksignale, welche in einem breiten Spektrum von Frequenzen arbeiten können. Ein Nachteil von SDRs ist ihre niedrige Sendeleistung, weshalb senderseitig Leistungsverstärker eingesetzt wurden. So konnte die Sendeleistung der Basisstation um etwa 44 dB und mit zusätzlichen Empfangsverstärkern ihre Empfangssensitivität um etwa 8 dB erhöht werden. Um einen auf die zugewiesenen Funkfrequenzen beschränkten Betrieb zu gewährleisten und zur Filterung von Empfangssignalen wurden Frequenzweichen (sog. Diplexer) verwendet.

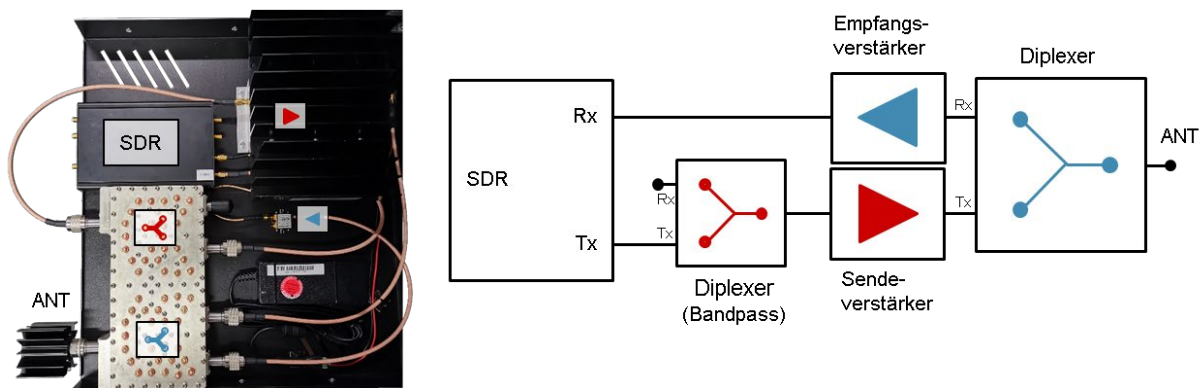


Abbildung 11: Aufbau der Basisstation im 19 Zoll Rack-Format und Blockschaltbild des Frontends.

Für die LTE Software wurden mit srsLTE (<https://www.srslte.com/>, Basisstation) und NextEPC (<https://nextepc.org/>, Kernnetz), quelloffene Implementierungen verwendet. Um die Anforderungen der Long-Range Kommunikation zu erfüllen, wurde die LTE Basisstation für maximale Zuverlässigkeit und hohe Reichweite konfiguriert. Hierbei wurden Zellparameter gewählt, die größtmögliche Ausbreitungsverzögerungen erlauben und ein Algorithmus zur Ressourcenzuweisung mit geringer Latenz entwickelt.

Während die vorhergehenden Betrachtungen zum Link-Budget sich mit dem Pfadverlust über weite Distanzen beschäftigen, muss auch die Ausbreitungsverzögerung der Funksignale berücksichtigt werden. Diese bringt Herausforderungen auf Protokollebene mit sich. Ein Endgerät initiiert die Verbindung zu einer Zelle zu vordefinierten Zeitpunkten, in denen noch unbekannte Sender Nachrichten an die Basisstation übermitteln können (Random Access). Da in diesem Zustand der Abstand zwischen Sender und Empfänger nicht bekannt ist, dies würde eine bidirektionale Umlaufmessung erfordern, müssen die für Random Access reservierten Zeiträume Toleranzen entsprechend des maximal erlaubten Abstands aufweisen (Guard Time). Der entsprechende LTE-Parameter (PRACH Preamble Format) wurde daher für maximale Zellgröße ausgelegt (Format 4: 0.72 ms bzw. 108 km). Im Gegenzug zur Reichweiterehöhung reduziert sich die Anzahl der Endgeräte, die gleichzeitig kollisionsfrei eine Verbindung initiieren können. Dieser Faktor wurde für den Einsatzfall in LARUS als unkritisch eingestuft, da die Nutzung von dedizierten Richtantennen die Wahrscheinlichkeit der Interferenz zwischen zwei Endgeräten bereits drastisch reduziert.

Die oben aufgeführten Betrachtungen zum Link-Budget zeigten, dass stark gerichtete Antennen an der Basisstation eingesetzt werden müssen. Diese erfordern eine genaue Ausrichtungsnachführung in Richtung des UAV. Zu diesem Zwecke wurde ein automatischer Antennentracker entwickelt, welcher sich mit Hilfe eines an der Antenne angebrachten inertialen Messsystems auf vorgegebene Koordinaten (Länge, Breite, Höhe) ausrichten kann. Während des Fluges verfolgt das Antennensystem das UAS basierend auf Positionsdaten, die über den unabhängigen Telemetrielink empfangen werden. Die Architektur der nachführenden Antenne ist in Abbildung 12 dargestellt.

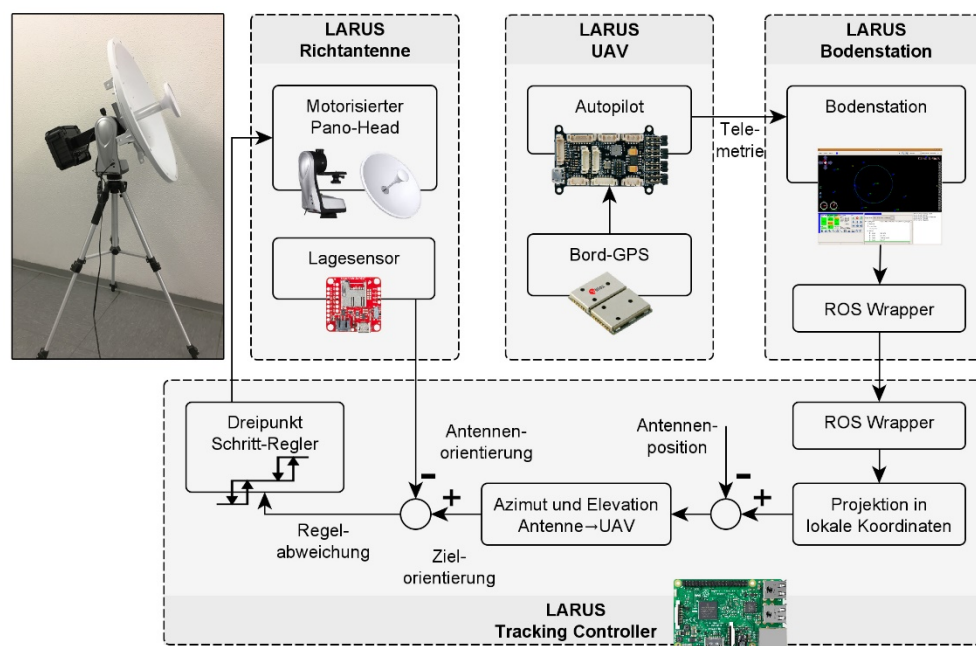


Abbildung 12: LARUS Antennentracker zur Erhöhung der Reichweite.

Während für die praktische Erprobung die entwickelte mechanisch nachführende Antenne genutzt wurde, wurde mit einer mittel- bis langfristigen Perspektive auch der Einsatz von elektronisch gesteuerten, dynamisch nachführenden Antennen erforscht [2], [3]. Hierfür wurde eine am Lehrstuhl bereits verfügbare, sog. Pencil Beam Antenne mit einem frei fliegenden UAV kombiniert. Die durchgeführten Experimente zeigten vielversprechende Ergebnisse: die dynamisch nachführende Antenne war grundsätzlich in der Lage, einer Bewegung eines UAVs zu folgen und so für eine stabile Verbindung mit hohen Datenraten zu sorgen (siehe Abbildung 13). Weiterhin konnte gezeigt werden, dass ein solches System zur Erhöhung der Dienstgüte für spezifische Teilnehmer in existierende Infrastruktur integriert werden kann [4]. In der Zukunft ist es also denkbar, eine Bodenstation eines LARUS-Systems mit einer elektronisch nachführbaren Antenne auszustatten, sobald diese Antennen auch für die für den Weitverkehrseinsatz notwendigen Frequenzbereich und zu annehmbaren kommerziellen Bedingungen zur Verfügung stehen. Für die im LARUS-Projekt durchgeführten Experimente stellte die oben vorgestellte mechanisch nachgeführte Antenne eine kostengünstige wie auch praktikable Lösung dar.

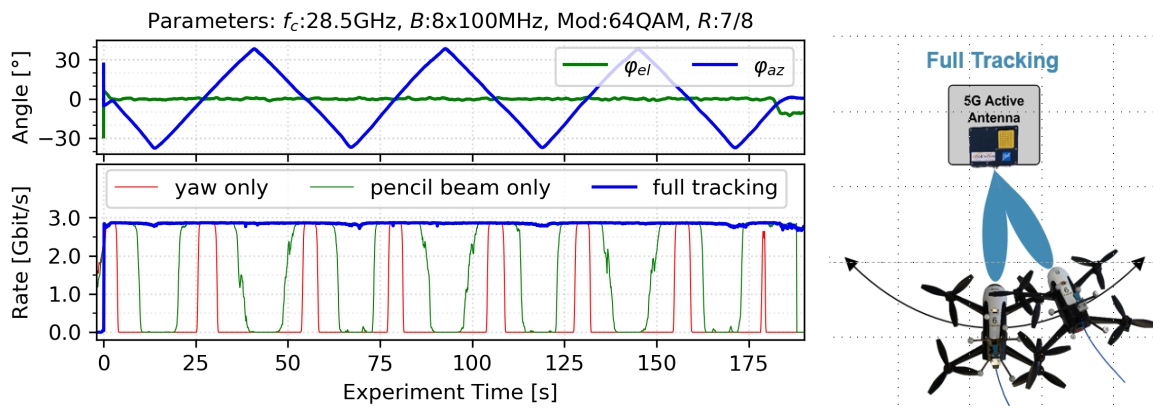


Abbildung 13: Experimentelle Machbarkeitsstudie zum Einsatz einer elektronisch nachführenden Antenne („Pencil Beam“): durch eine symmetrische Nachführung wird trotz Bewegung des UAVs eine stabile Datenraten erzielt (siehe [3]).

Zur Optimierung der Funkhardware wurden weiterhin Anpassungen am LTE Software Stack durchgeführt. So wurde ein Algorithmus zur Ressourcenzuweisung (Scheduler) entwickelt, welcher sicherheitskritischen Kommunikationspartnern wie dem UAS im Kanalzugriff garantierte Ressourcen reserviert [5]. Da in LTE Ressourcen durch die Basisstation zugeteilt werden, wird das Volumen an zu sendenden Daten im Regelfall durch die Endgeräte signalisiert. Dieser Vorgang erfordert drei Schritte: eine periodische Nachricht (*sind Daten vorhanden?*), eine Ressourcenzuweisung gefolgt von einer Signalisierungsnachricht (*wie viele Daten sind vorhanden?*) und eine zweite Ressourcenzuweisung gefolgt von den zu sendenden Daten (siehe Abbildung 14 links). Auf diese Weise wird es der Basisstation ermöglicht, benötigte Ressourcen zu ermitteln und dynamisch zuzuweisen. Allerdings erhöht sich die Latenz vom Eintreffen der Daten am Endgerät zum Eintreffen der Daten an der Basisstation durch den zusätzlichen Signalisierungsaufwand. Da die Kommunikation von Steuerdaten mit unbemannten Systemen hohe Anforderungen an Zuverlässigkeit und Latenz stellt, wurde in LARUS eine priorisierte und garantierte periodische Zuweisung von Ressourcen durch die Basisstation implementiert und evaluiert (siehe Abbildung 14 rechts).

Da Telemetrie- und Steuerdaten in der Regel in konstanten Abständen gesendet werden, lässt sich der benötigte mittlere Durchsatz im Voraus ermitteln. Der erzeugte Datenverkehr ist jedoch nicht ideal regulär: unterschiedlich große Nachrichten können in unterschiedlichen Intervallen generiert werden, die sich zum Teil so überlagern, dass kurzzeitig ein Durchsatz weit über dem Mittelwert erfordert wird.

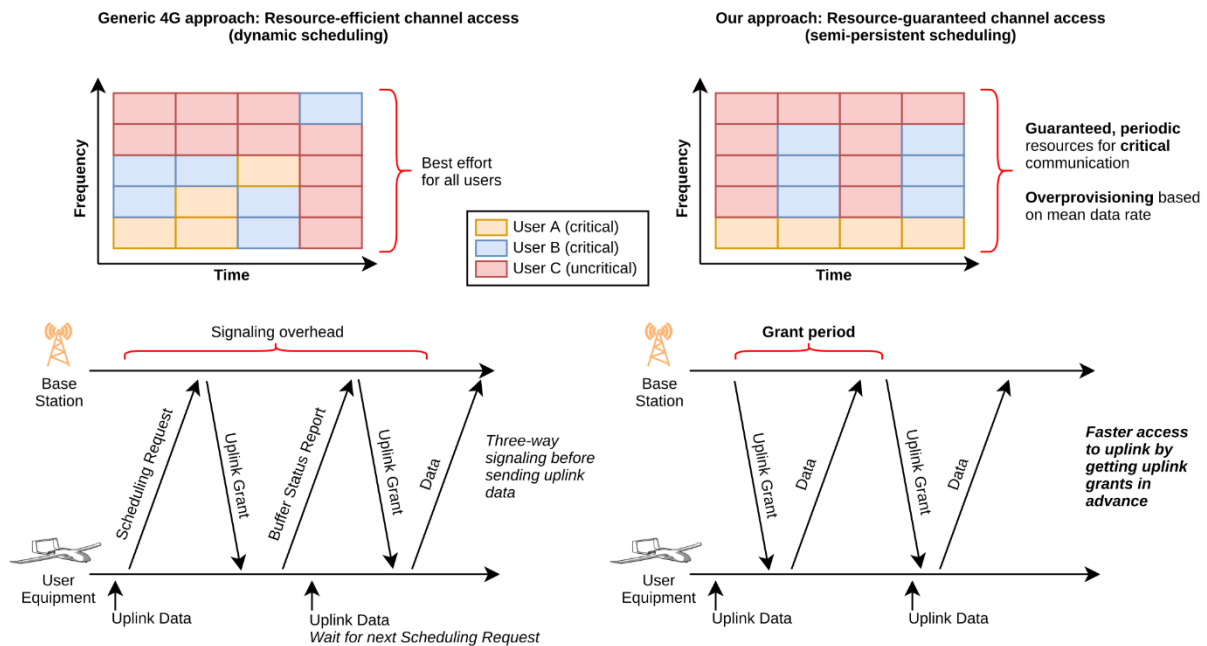


Abbildung 14: Optimierung der Ressourcenzuweisung für zuverlässigen Zugriff mit geringer Latenz [5].

Daher berücksichtigt der entwickelte Algorithmus die mittlere Datenrate und einen Faktor, der bestimmt, wie viele zusätzliche Ressourcen bereitgestellt werden, um Spitzen in der Datenrate abzufangen (Over Provisioning). Im Experiment konnte gezeigt werden, dass dieser Ansatz selbst in voll ausgelasteten Zellen Latenzen garantiert, die die Anforderungen an Telemetrie- und Steuerdatenverkehr erfüllen (siehe Abbildung 15). Bei Zuweisung der doppelten mittleren Datenrate, kann im Mittel die ideale Latenz einer halben Zuweisungsperiode erreicht werden, während Nachrichten im 99,9%-Perzentil in unter zwei Perioden zugestellt werden.

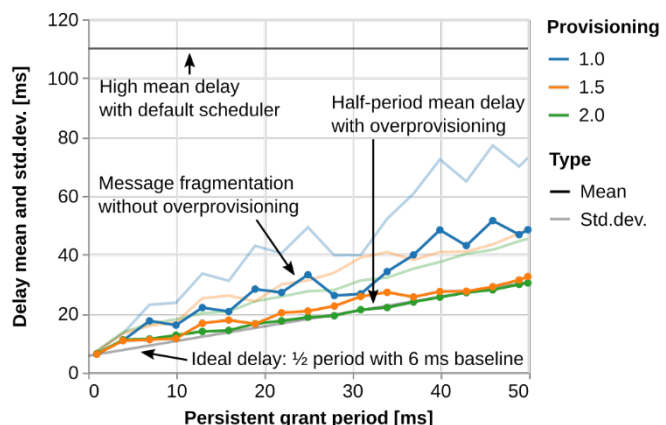


Abbildung 15: Reduzierte Latenz durch angepassten LTE Scheduler (ausgelastete Zelle) [5].

Als finaler Schritt vor der geplanten, umfangreichen Felderprobung des Kommunikationssystems wurden detaillierte Leistungsbewertungen des Gesamtsystems im Labor unter Verwendung eines Spektrumanalysators und einer im Rahmen des Projekts beschafften Kanalmatrix zur Abbildung der Signalausbreitung durchgeführt (siehe Abbildung 16). Hier wurde insbesondere die Leistungsregelung und Sensitivität von Modems und Basisstation sowie die maximale Reichweite der Verbindung unter Verwendung unterschiedlicher Modulations- und Codierungsverfahren (Modulation and Coding Schemes, MCS) evaluiert. Weiterhin wurde die Ausgangsleistung SDR-

Module beim Betrieb des Datenlinks genau charakterisiert und für maximale Leistung bei minimaler Verzerrung auf den Ausgangsverstärker angepasst.

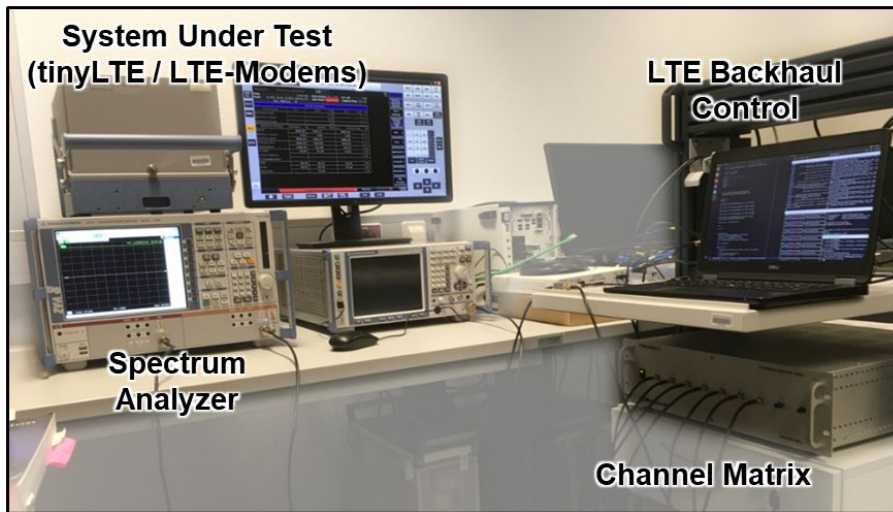


Abbildung 16: Foto des Hardware-in-the-Loop Experimentalaufbaus für die angepasste Basisstation.

1.4.2 Heterogener Multi-Link für verkehrstypsensitive Flussteuerung

Für den robusten und effektiven Betrieb eines unbemannten Flugsystem ist die zuverlässige Übertragung verschiedener Datenflüsse unerlässlich. In diesem Arbeitspaket wurde auf Basis der Anforderungen aus AP 1.2 ein Multi-Link Konzept entwickelt. Abbildung 17 stellt das Konzept zur gebündelten Übertragung von Steuer- und Nutzdaten schematisch dar.

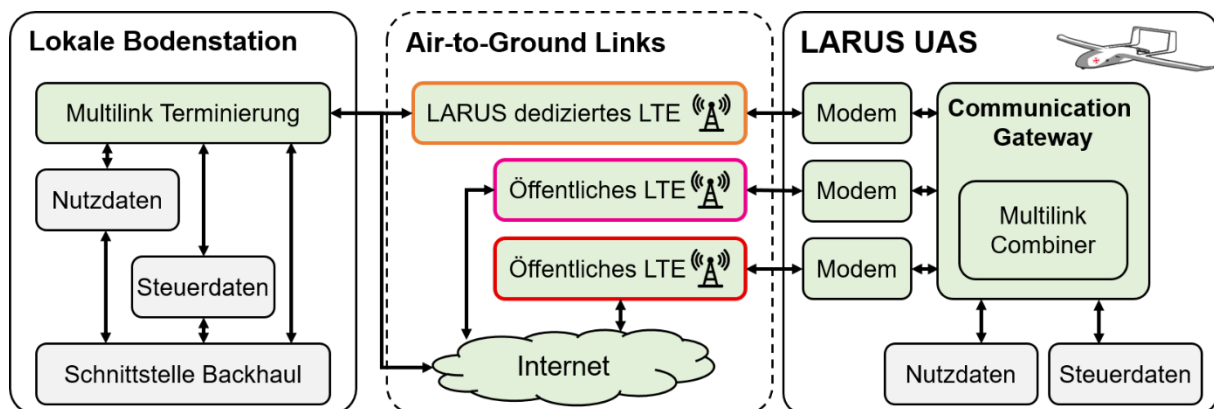


Abbildung 17: Schematische Darstellung des Multi-Links zur Bündelung mehrerer LTE Verbindungen.

Im LARUS System wurde der Multi-Link als Teil des *Communication Gateways* (Vgl. Abschnitt 1.2) realisiert. Während in ersten Studien der mögliche Einsatz von Network Coding Konzepten untersucht wurde [6], wurde in der Software des Gateways

die Multi-Link Bündelung aus Gründen der Robustheit mit dem *Multipath TCP (MPTCP)* Protokoll als Linux Kernelerweiterung umgesetzt. In der lokalen Bodenstation kam als Gegenstelle ebenfalls ein MPTCP Linux Kernel zum Einsatz. MPTCP arbeitet transparent: die gebündelten Kommunikationstechnologien erscheinen auf der Anwendungsebene als eine einzelne Verbindung, weshalb dort keine Anpassung der Logik erforderlich ist. Im Rahmen des Projekts wurden bis zu drei *Long Term Evolution (LTE)* Verbindungen für den Multi-Link parallel verwendet. Diese setzten sich aus zwei deutschen, öffentlichen Mobilfunkanbietern und einem eigens für das LARUS-System betriebenen LTE-Netz zusammen. Der Multi-Link wurde im Rahmen der Validierungs- und Pilotversuche eingesetzt und umfassend bewertet. Insgesamt konnte mit dem Multi-Link Ansatz eine deutliche Verbesserung der Netzverfügbarkeit sowie eine Steigerung des Durchsatzes erzielt werden.

Ausblickend wurde zudem evaluiert, wie sich zellulare Fahrzeugkommunikation als zusätzliche Technologie zur Erhöhung der Robustheit in das Konzept integrieren lässt [7]. Hier wäre in der Zukunft denkbar, dass die Kommunikation zwischen Seenotrettungskreuzer und LARUS UAV im Einsatzgebiet als lokale Cellular-Vehicle-to-X (V2X)-Kommunikation realisiert werden könnte, um so die Weitverkehrsverbindung zu entlasten. Auch wenn sich die C-V2X-Kommunikation in den Untersuchungen als leistungsfähig gezeigt hat (siehe Abbildung 18), ist ihr Einsatzbereich im Rahmen der LARUS-Szenarien aufgrund der geringen Reichweite beschränkt und wurde daher im experimentellen Teil des Projekts nicht weiter verfolgt.

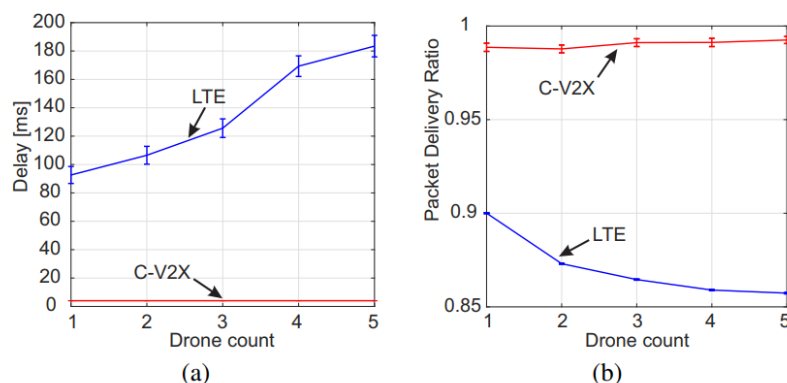


Abbildung 18: Beispielhaftes Ergebnis eines simulativen Vergleichs von infrastrukturbasierter LTE Kommunikation mit einer direkten Kommunikation mittels Cellular-V2X [7].

Simulative Leistungsbewertung durch Hardware-in-the-Loop Experimente

Für eine erste Leistungsbewertung wurde eine Hardware-in-the-Loop (HIL) Simulation durchgeführt [1]. Bei HIL Experimenten wird das reale Testsystem in einem in Echtzeit simulierten Kontext betrieben. Das Testsystem setzt sich dabei aus Hardware und Software zusammen, die für den Einsatz im realen Umfeld vorgesehen ist; in diesem Fall das Communication Gateway mit Bordrechner und LTE Modems. HIL-

Aufbauten und Simulationen ermöglichen es so, Komponenten in einer kontrollierten Umgebung reproduzierbar zu testen, ihre Leistung zu bewerten sowie ihre Robustheit zu überprüfen und zu erhöhen. Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigen den Aufbau des HIL Experiments. Die LTE-Verbindung zwischen je zwei Modems und LARUS LTE Basisstationen (vgl. Abschnitt 1.4.1) wurde kabelgebunden über eine Kanalmatrix hergestellt. Die Kanalmatrix wurde aus einer Umwidmung von LTE-Software Lizenzen speziell für den Zweck der reproduzierbaren Evaluierung von Kommunikationsmodulen beschafft (vgl. Abschnitt 2, Lfd.-Nr. 3).

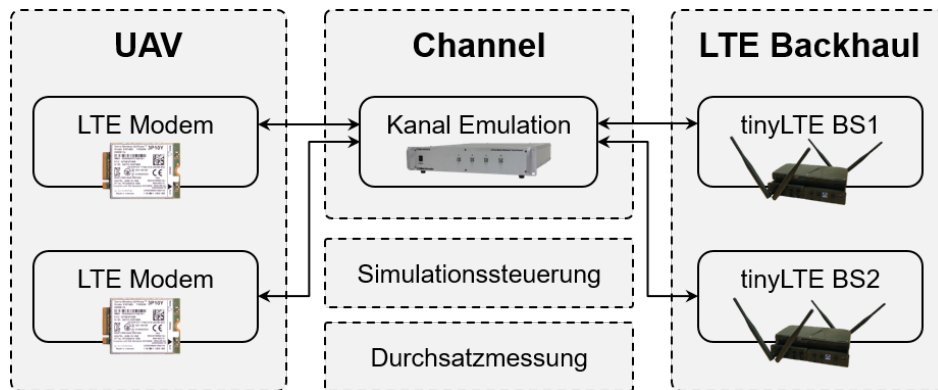


Abbildung 19: Schematische Darstellung des Hardware-in-the-Loop Aufbaus zur Leistungsbewertung der Multi-Link Kommunikation. Mit Hilfe der Kanalmatrix wird der maritime Funkkanal simuliert [1].

Im Rahmen der HIL Simulation übernimmt die Kanalmatrix die Aufgabe der Kanalemulation. Hier wird das maritime Kanalmodell (vgl. 1.4.1 und Abbildung 10) in Form einer Dämpfung zwischen LTE Modem und Basisstation umgesetzt. Für die Leistungsbewertung wurde softwareseitig MPTCP verwendet, welches ebenfalls in derselben Parametrisierung im finalen Demonstrator verwendet wurde.

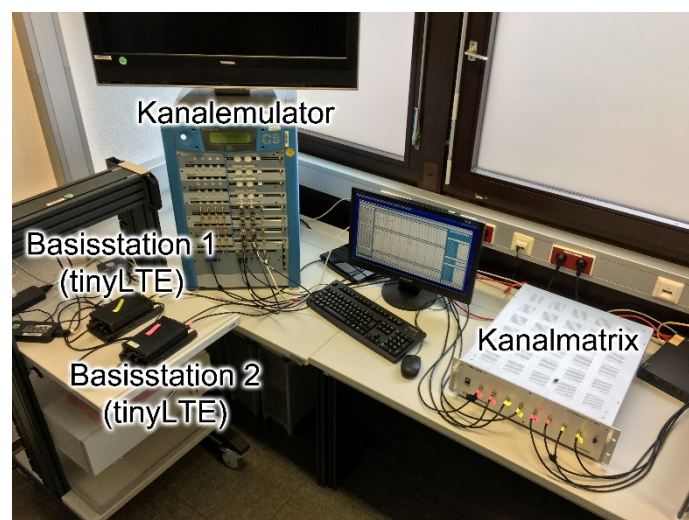


Abbildung 20: Foto des Hardware-in-the-Loop Experimentalaufbaus für den Multi-Link.

Abbildung 21 zeigt beispielhaft den Durchsatz des Multi-Links in Abhängigkeit von der Distanz des UAVs. Das Experiment wurde durchgeführt sowohl mit den einzelnen aktivierten LTE-Verbindungen ("Single-Link"), sowie den zwei Multi-Link Konfigurati-

onen „Redundant“ und „max. Throughput“. Aufgrund von Wellen und der Zweibegeausbreitung kommt es auf den einzelnen, individuellen Kommunikationskanälen zu Interferenzerscheinungen. Der Kanal wird schlechter und die Datenrate sinkt. Für die Single-Link Experimente kommt es daher ca. bei 25km und bei ca. 36km zu einem Abbruch der Verbindung. Hier können keine Nutzlastdaten mehr übertragen werden. Typischerweise sind Autopiloten in UAVs so konfiguriert, dass sie dann unmittelbar umkehren und zur Ausgangsposition zurückkehren, da eine Steuerung durch den Operator nicht mehr gegeben wäre. Der Multi-Link Ansatz ermöglicht nun eine minimale Datenrate über die gesamte Distanz bis 50 km. Die Daten werden gezielt auf die jeweils verbleibende LTE-Verbindung aufgeteilt. Für die Anwendung geschieht das transparent und sie muss nicht speziell modifiziert oder angepasst werden.

In dem Experiment wurden zwei Konfigurationen untersucht. Der „Redundant“-Modus überträgt dieselben Daten auf jedem Kanal parallel. Durch die erzeugte Redundanz wird primär die Latenz minimiert. Treten Paketverluste auf, so müssen Daten nicht erneut übertragen werden. Dies ist vor allem für Telemetrie- und Kontrolldaten sinnvoll. Der alternative Modus ist „Max. Throughput“. Hier werden die Daten auf beide Links aufgeteilt. Dadurch erhöht sich die erzielbare, maximale Datenrate. Tritt Paketverlust auf oder kommt es zum Abbruch einer Verbindung müssen Pakete erneut übertragen werden (sog. „Retransmissions“) und es kommt zu einer höheren Latenz auf Anwendungsebene. Für hohe Datenmengen oder Videos ist dies der präferierte Modus.

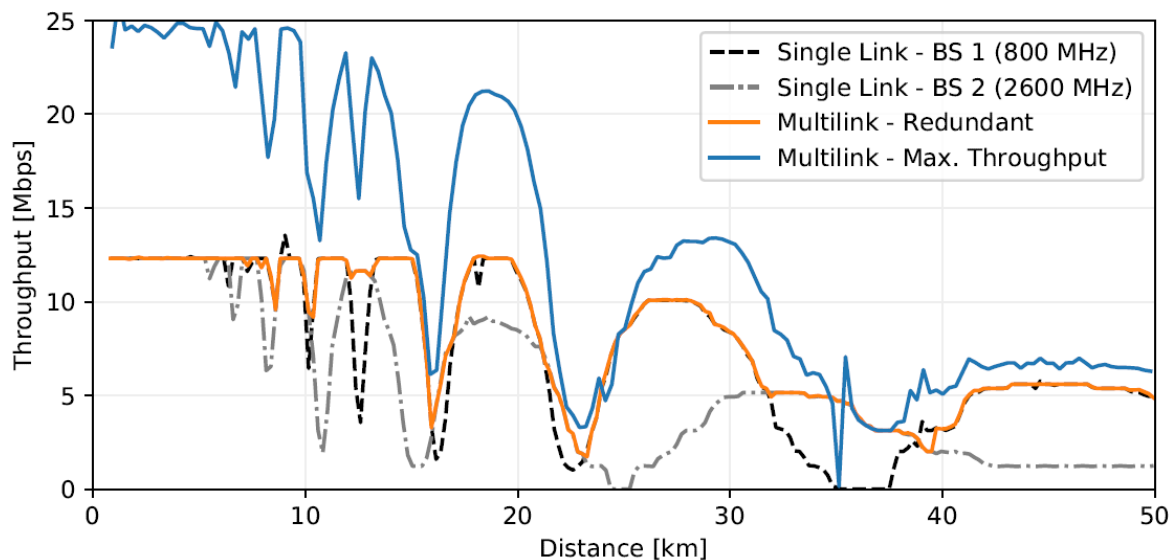


Abbildung 21: Ergebnis HIL Simulation: Durch den Einsatz des Multi-Links können Einbrüche der Datenrate kompensiert werden [1].

Für eine tiefere Untersuchung wurden Modellparameter, wie Flughöhe, Windgeschwindigkeit und Wellengang variiert. Abbildung 22 zeigt die statistische Auswertung der untersuchten Szenarien, sowohl mit den Mittelwerten (Median), als auch der minimalen, in 99 % der Zeit erreichbaren Datenrate (99% Perzentil). Ge-

genüber einem 800 MHz LTE (schwarz, BS 1) ist durch den Multi-Link im „Max Throughput“ Modus im Median eine Verbesserung um 4 Mbps erreichbar, für das 2600 MHz LTE (grau, BS 2) wird eine Verbesserung um ca. das dreifache erzielt. Für die minimalen Datenratenanforderungen können im Redundant Modus 1,93 Mbps und im Max Throughput Modus 3,07 Mbps übertragen werden. Dies ist ausreichend für einen einfachen, kontinuierlichen Video-Stream sowie Nutzdaten.

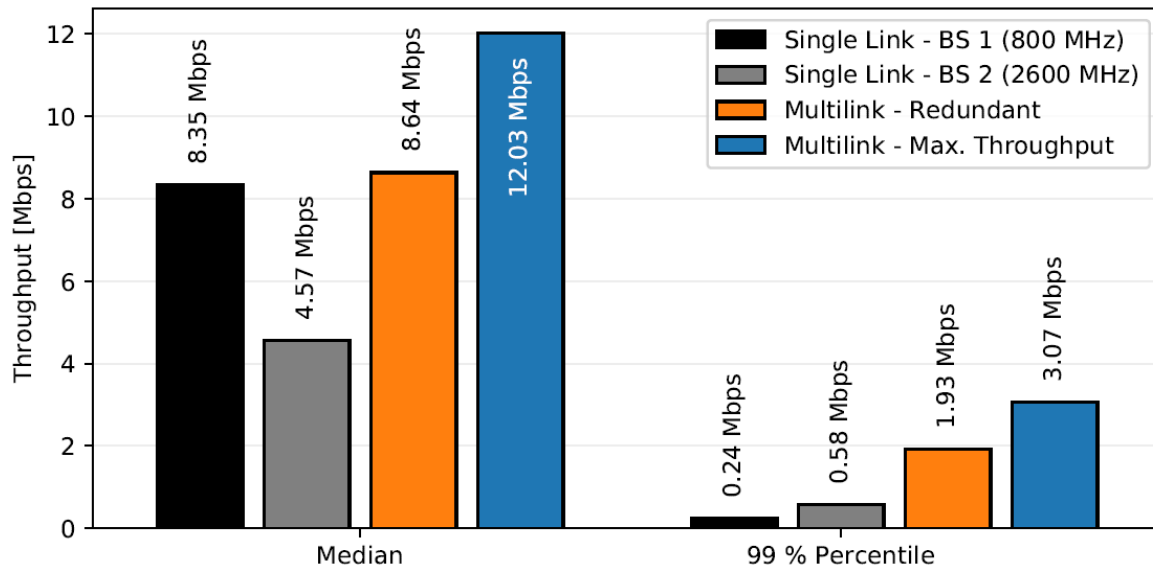


Abbildung 22: Ergebnis HIL Simulation: Verbesserung der Datenrate durch Einsatz des Multi-Links [1].

Experimentelle Validierung in Pilotversuchen

Nachdem durch HIL Simulationen die Hard- und Software erfolgreich erprobt wurde, konnten im Rahmen der Validierung und Pilotversuche zahlreiche Flüge durchgeführt werden. Eine Übersicht der Testflüge ist in Tabelle 5 dargestellt. Die kommenden Abschnitte erläutern nun detailliert die experimentell erzielten Ergebnisse von Teil-AP4.5 und die Vorteile der Multi-Link Strategie in der Praxis. Die Ergebnisse und Datensätze wurden zudem in einem Journalartikel veröffentlicht (siehe [8]).

Abbildung 23 zeigt zunächst einen Ausschnitt der Verfügbarkeitsanalyse der öffentlichen LTE-Netze während eines Reichweiten-Validierungsfluges in Peenemünde am 14.09.2019. Die Unterbrechungen der farbigen Balken markieren Stellen, an denen keine Daten ausgetauscht werden konnten. Die Messung basiert auf einer Messung der Umlaufzeit (Round-Trip Time, RTT) mit Internet Control Message Protocol (ICMP) Nachrichten. Kleinere Unterbrechungen entstehen durch Wechsel (engl. „Handover“) zwischen zwei LTE Basisstationen. Größere Unterbrechungen werden durch mangelnde Netzabdeckung hervorgerufen. Es ist deutlich ersichtlich, dass einzelne Mobilfunkanbieter keine durchgehende Konnektivität gewährleisten können. Durch den Multi-Link Ansatz kann die Verfügbarkeit stark verbessert werden.

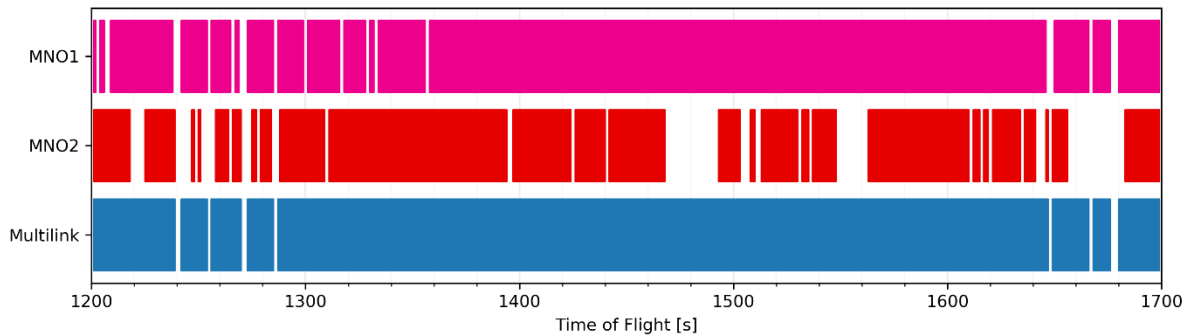


Abbildung 23: Verfügbarkeit der öffentlichen LTE-Netze. Ausschnitt aus dem Validierungsflug in Peenemünde am 14.09.2019 [8].

Das Gesamtergebnis der Verfügbarkeitsanalyse ist in Abbildung 24 dargestellt. Für die unterschiedlichen Einsatzorte Peenemünde und Pütznitz ist eine deutliche Verbesserung der Netzverfügbarkeit durch den Multi-link Ansatz zu verzeichnen. Insgesamt konnte so auf den Testflügen in Peenemünde eine Verfügbarkeit von mindestens 98,2% erreicht werden. Beim Experiment im Rahmen der SAR Übung liegt die hohe Verfügbarkeit von 97,7 % von Mobilfunkanbieter 1 daran, dass in die Übung in Nähe des Ufers stattfand. Hier profitierte Mobilfunkanbieter 2 (80,8 % Verfügbarkeit) besonders von dem Multi-Link. Bei dem Reichweitenversuch in Peenemünde wurde der Greifswalder Bodden durchflogen und die maximale Distanz zur Bodenstation betrug über 24 km. Dabei ergänzten sich beide Anbieter sehr gut und es konnte eine Steigerung um 7,4% bzw. 11 % auf 98,2 % erreicht werden.

In Pütznitz gestaltete sich die Mobilfunkabdeckung deutlich schlechter. Hier erzielten die Mobilfunkanbieter individuelle Verfügbarkeiten von maximal 72,3 %. Der Multi-Link verbesserte die Gesamtverfügbarkeit auf 89,3 %. Die schlechtere Mobilfunkabdeckung liegt an der Nähe der Flugroute zur dänischen Insel Falster. Mobilfunkanbieter versuchen Interferenzen mit anderen Anbietern, welche dieselben Frequenzen verwenden, zu vermeiden. Daher ist die Ausrichtung der Antennen selten in der Richtung der Grenze anderer Länder und die Mobilfunkabdeckung schlechter (vgl. Abschnitt 1.6.6).

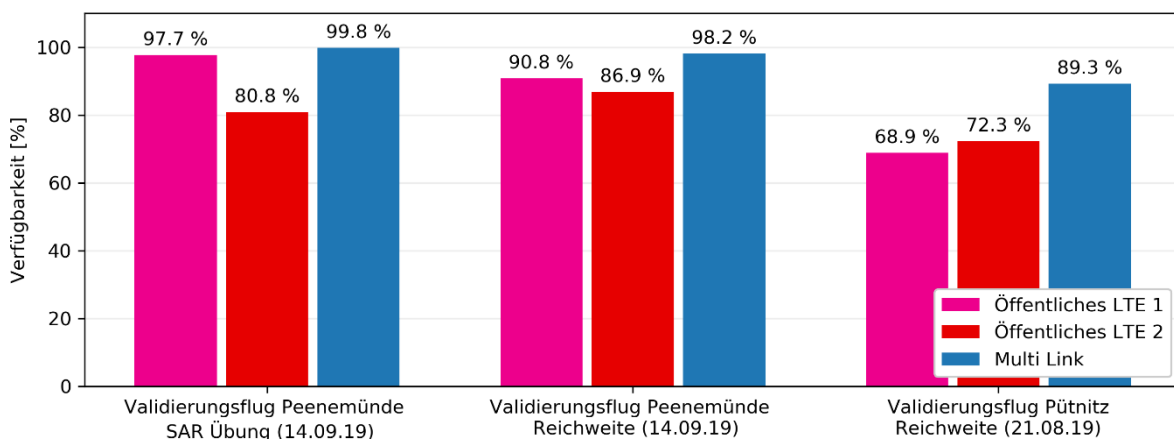


Abbildung 24: Ergebnis der Validierungsversuche zeigt Verbesserung der Verfügbarkeit durch erfolgreichen Einsatz des Multi-Link Konzepts für die Flüge in Peenemünde und Pütznitz [8].

Ein Beispiel für eine Multi-Link Übertragung des Videostreams zwischen den verschiedenen LTE Verbindungen ist in Abbildung 25 gezeigt. Die Ergebnisse wurden im Rahmen des dritten Validierungsflugs zwischen den Inseln Rügen und Usedom am 14.09.2019 aufgezeichnet. Aufgrund der großen Distanz des UAS zu Mobilfunkmasten in Kombination mit maritimen Ausbreitungseffekten ist eine Netzabdeckung durch einen einzelnen Mobilfunkanbieter nicht immer gewährleistet. Der Multi-Link selektiert laufend die (geschätzt) beste verfügbare Verbindung, sodass die Datenrate des Video-Streams von ca. 550 kBit/s kontinuierlich bereitgestellt werden kann.

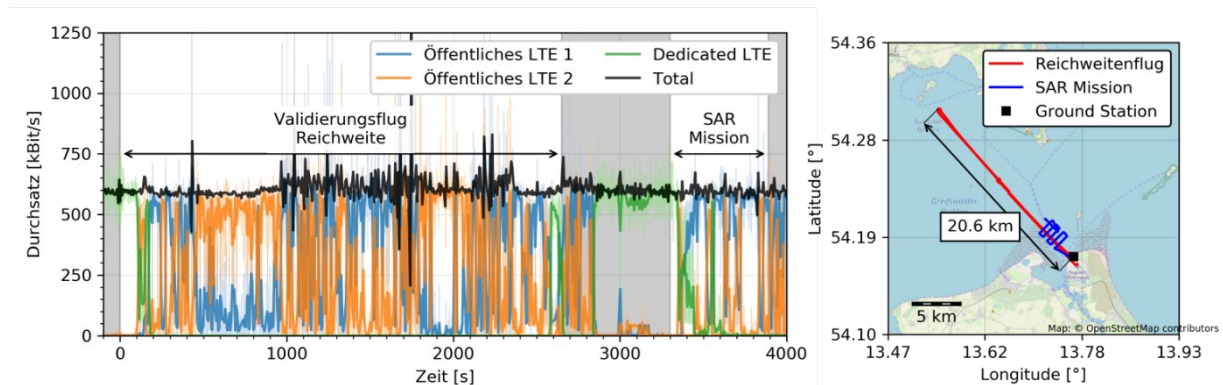


Abbildung 25: Durchsatzmessung des Videostreams während des Validierungsflugs während der SAREx am 14.09.2019 in Peenemünde (vgl. Abschnitt 1.6.4) [8].

Während der Flugversuche lag der Fokus auf der sicheren und erfolgreichen Versuchsdurchführung und Validierung der Systemintegration. Um Nutz- und Steuerdatenübertragung sowie Experimente nicht negativ zu beeinflussen, wurden die LTE Verbindungen dort nicht mit der maximal möglichen Datenrate ausgelastet. Zur Ermittlung der Systemgrenzen des Multi-Links, vor allem auch bei großen Distanzen zur Küste jenseits von 30 km, wurde zusätzlich ein bemannter Flug mit einem Ultraleichtflugzeug am 10.12.2019 durchgeführt. Abbildung 26 zeigt die Auswertung des Flugexperiments. Insgesamt konnten für LTE die erwartbaren Höchstdatenraten erzielt werden und im Mittel 19 Mbit/s an den Boden übertragen werden. Lediglich in Grenznähe zu Polen mit ca. 30 km Küstenentfernung konnten in diesem Versuch keine Daten übertragen werden, da hier die Signalstärke beider LTE-Netze nicht ausreichend war.

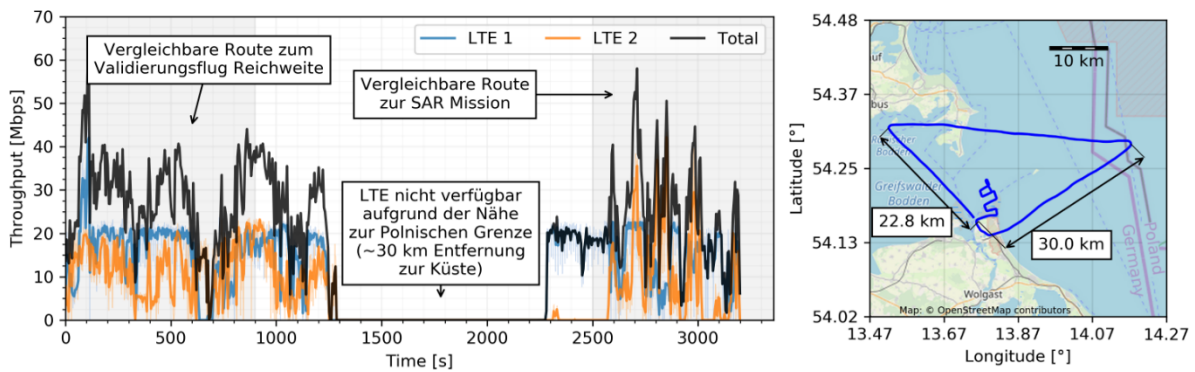


Abbildung 26: Durchsatzmessung auf einem Bemannten Flug in Peenemünde am 10.12.2019 zum Evaluieren der Systemgrenzen des LTE Multi-Links [8].

1.4.3 Aerial Hotspot

Ziel dieses Teilarbeitspakets war die Realisierung einer fliegenden Mobilfunk-Basisstation, zu der sich von Schiffbrüchigen mitgeführte Endgeräte automatisch verbinden können. Als mobile Relaisstation kann das UAS so eine Verbindung zum Land herstellen. Diese zusätzliche Möglichkeit der Kontaktaufnahme ermöglicht es, Betroffene psychologisch zu versorgen oder Anleitung zu erste Hilfe Maßnahmen zu kommunizieren. Ferner sollen die Signale der Endgeräte zur Ortung und Auffindung der in Not geratenen Personen verwendet werden.

Hierzu wurde ein sehr kompaktes System entwickelt, das auf dem LARUS-UAS mitgeführt werden, und eine vollständig autonome LTE-Zelle bereitstellen kann [9]. Durch die Integration einer virtuellen Kernnetzsoftware auf dem UAS kann der Aerial Hotspot selbstständig Verbindungen zu Endgeräten aufbauen, was den Bodenstation-UAS Link einerseits entlastet und die Robustheit des Systems erhöht. Durch das autonome Design ist es zusätzlich möglich, mehrere Aerial Hotspots miteinander zu verbinden. Im Hinblick auf den Einsatz mehrerer LARUS-Systeme ist somit eine verkettete Relais-Operation denkbar, bei der ein „Anker-UAS“ mit Langstreckenverbindung zum Land mehrere weitere UAS im Einsatzgebiet mit Funkressourcen versorgt.

Der Aerial Hotspot wurde im Hinblick auf Latenz experimentell erprobt, siehe Abbildung 27. Die Standardoperation erfüllt

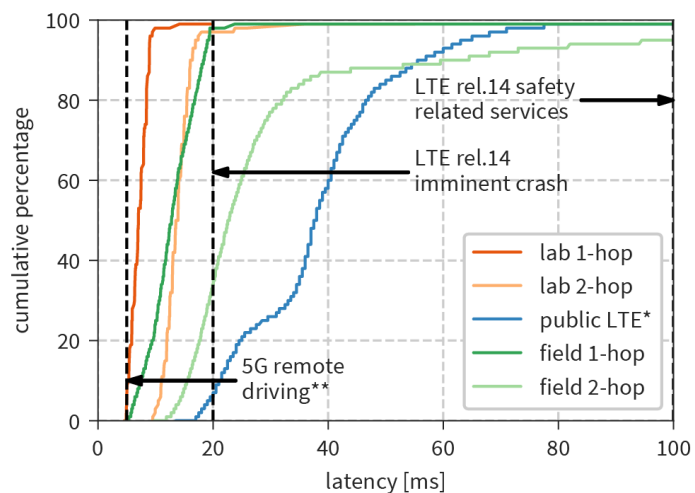


Abbildung 27: Der LTE-Aerial-Hotspot erfüllt erhöhte Latenzanforderungen aus Mobilfunkstandards (1-hop: Aerial Hotspot, 2-hop: Verkettete Aerial Hotspots) [9].

dabei strikte Anforderungen aus dem Bereich der Fahrzeugkommunikation. Somit konnte abgesichert werden, dass auch bei Weiterleitung über die Verbindung zur Bodenstation die Ende-zu-Ende-Latenz der versorgten Teilnehmer nicht zu groß wird.

Abbildung 28 zeigt den finalen Labordemonstrator des LARUS Aerial Hotspot. Über den Aerial Hotspot kann das MRCC der Seenotretter eine Verbindung zum mobilen Endgerät eines Schiffbrüchigen herstellen, um einen Sprach- oder Videoanruf aufzubauen.

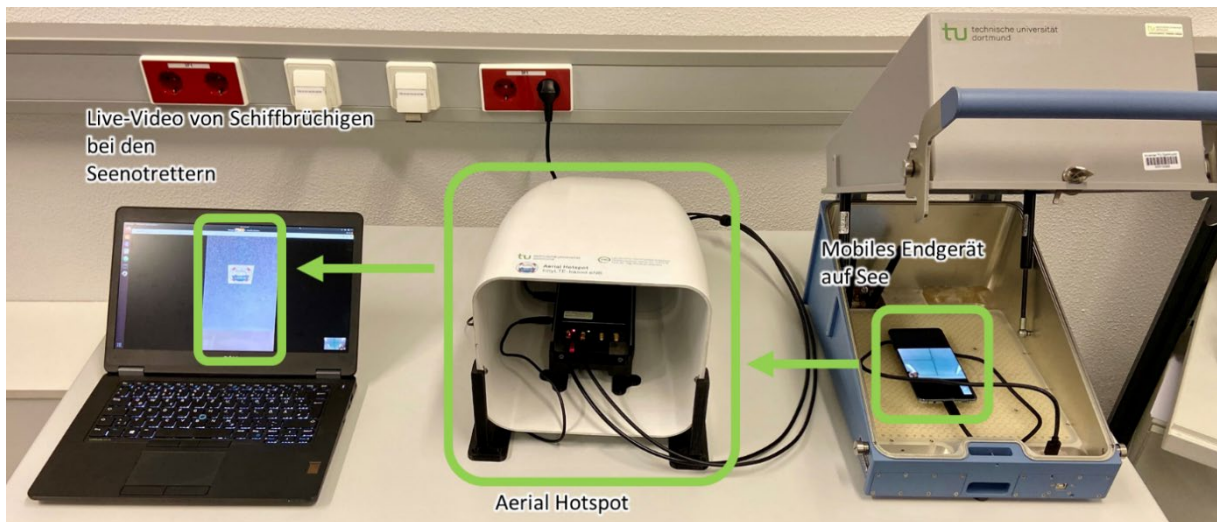


Abbildung 28: Labordemonstrator des LARUS Aerial Hotspot.

1.5 Arbeitspaket 5: Unterstützung durch einsatzspezifische Sensorik, Datenanalyse und Benutzerschnittstellen

Der Fokus von Arbeitspaket 5 sind Sensorik und Anwenderschnittstellen. Hier entwickelte die TU Dortmund ein System zur funkbasierten Ortung von Vermissten (AP5.3). Zudem werden in der ebenfalls in AP5 entwickelten Lagedarstellung verteilte Informationen zentral aufbereitet und anwenderspezifisch zusammengefasst, um die effektive Planung und Überwachung von Einsätzen zu ermöglichen (AP5.4). Die nachfolgenden Abschnitte erläutern die Ergebnisse der einzelnen Teilarbeitspakete.

1.5.1 Funkbasierte Ortung von Vermissten: Hardware, detektierte Objekte

Der Fokus von Arbeitspaket 5 liegt auf der Ortung von Vermissten mit Hilfe von Funksignalen, jedoch ohne dediziertes *Search and Rescue* (SAR) Equipment wie *Emergency Position-Indicating Radio Beacon* (EPIRB) oder *Automatic Identification System – Search And Rescue Transmitter* (AIS-SART). Hierbei wird angenommen, dass die vermisste Person, z.B. ein Angler oder anderer Wassersportler, ein Mobiltelefon bei sich trägt. Fällt die Empfangssignalstärke am mobilen Endgerät mit steigender Entfernung von der Küste unter einen Schwellwert, so kann keine Verbindung zum Festland mehr aufgebaut werden. Das in AP5 entwickelte Verfahren nutzt diese Tatsache aus indem eine fliegende Basisstation auf dem UAS die Funkfunktionalität der Stationen auf dem Festland abbildet und das Endgerät des vermissten Nutzers sich automatisch in die fliegende Zelle einbucht.

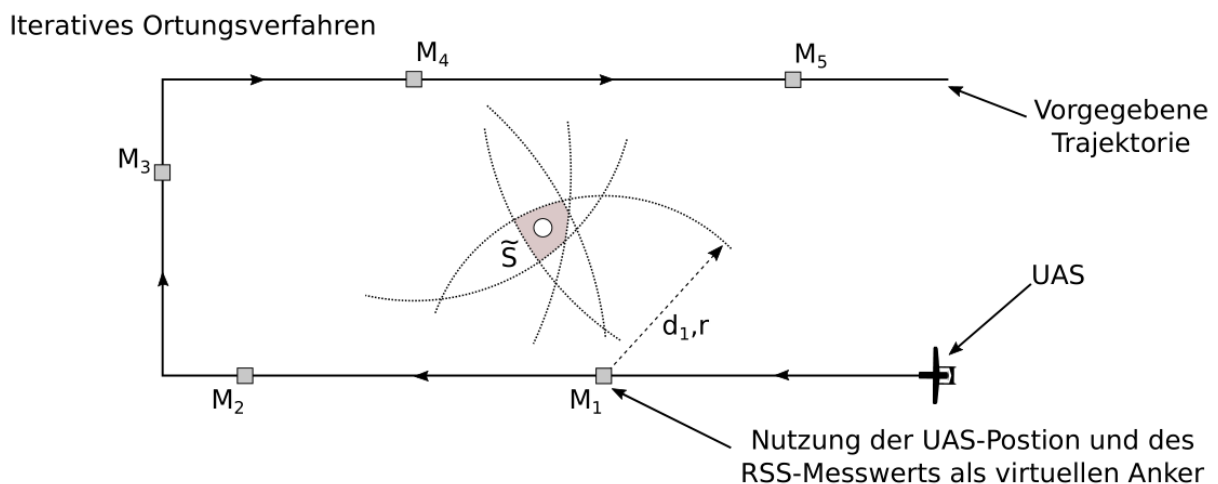


Abbildung 29: Schematische Darstellung des iterativen Ortungsverfahrens [10].

Abbildung 29 zeigt das Funktionsprinzip des in AP5.3 entwickelten Ortungsverfahrens schematisch auf. Das Fluggerät zeichnet die *Received Signal Strength* (RSS) und die *Global Navigation Satellite System* (GNSS) Position über mehrere Messpunkte auf. Durch Messung der Empfangssignalstärke an der fliegenden Basisstation kann so durch sukzessive Distanzschätzung bei vergleichbar geringer Dynamik des zu suchenden Objektes eine Ortung durchgeführt werden.

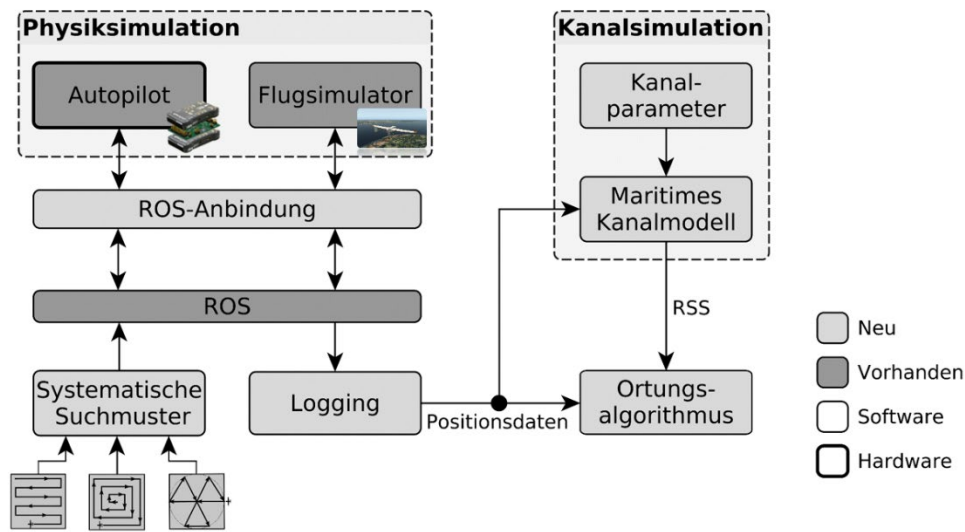


Abbildung 30 Schematischer Aufbau der Hardware in the Loop Simulation [10].

Um die Leistungsfähigkeit unterschiedliche Suchverfahren zu bewerten ist in AP5 ein *Hardware in the Loop* (HiL) Testbed entstanden. Die systematischen Suchmuster werden an ein physikalisches Autopilotensystem gesendet, welches über eine Echtzeit Schnittstelle an einen Flugsimulator gekoppelt ist, siehe Abbildung 30. Hierbei wird das in AP4 entwickelte maritime Kanalmodell über die simulierte Trajektorie parametrisiert. Als gemeinsame Schnittstelle dient das *Robot Operating System* (ROS) um das Gesamtsystem flexibel und modular aufzubauen. So ist es möglich die zukünftige aktive Trajektoriengenerierung an die HiL-Physiksimulation als auch an das Realsystem zu koppeln.

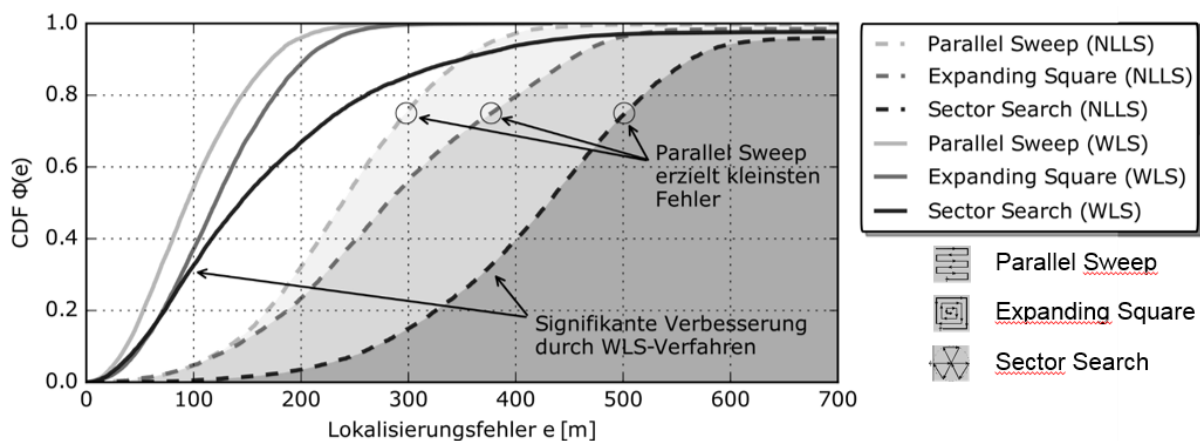


Abbildung 31: Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion des Ortungsfehlers für drei verschiedene systematische Suchstrategien in dem gewählten Szenario [10].

In der Simulation wurde ein Suchgebiet von 20x20km definiert und mit drei unterschiedlichen Suchverfahren untersucht. Das *Parallel Sweep* Verfahren unterteilt das Suchgebiet in Suchstreifen, welche sukzessive abgeflogen werden. Das *Expanding Square* Verfahren sucht mittels eines sich vom Mittelpunkt des Gebiets ausbreitenden Quadrats. Das *Sector Search* Verfahren teilt das Suchgebiet in um den

Mittelpunkt punktsymmetrische Sektoren auf und führt eine sternförmige Suche durch. In Abbildung 31 ist die Ortungsgenauigkeit für drei unterschiedliche Schätz-Algorithmen dargestellt. Das viel verwendete *Non-Linear Least-Squares* (NLLS) Verfahren schätzt die Position des zu suchenden Objektes unter der Annahme, dass der Fehler normalverteilt ist. Da allerdings bei großen Distanzen der Fehler einer logarithmischen Verteilung folgt, wurde das NLLS Verfahren erweitert und gewichtet größere Distanzen geringer als kleine Distanzschätzungen. Das *Weighted Least-Squares* (WLS) ist somit in der Lage eine deutlich genauere Positionsschätzung durchzuführen und übertrifft im 90% Quantil eine Ortungsgenauigkeit von 200 m für das *Parallel Sweep* und das *Expanding Square* Verfahren.

Eine wichtige Metrik ist die Dauer bis ein Verfahren eine bestimmte Ortungsgenauigkeit erzielt. Bei den durchgeführten Simulationen erzielt das *Expanding Square* Verfahren eine Ortungsgenauigkeit von unter 400 m nach bereits 15 min Dauer der Suche und ist somit das effizienteste Verfahren in Bezug auf die Ortungsdauer, siehe Abbildung 32.

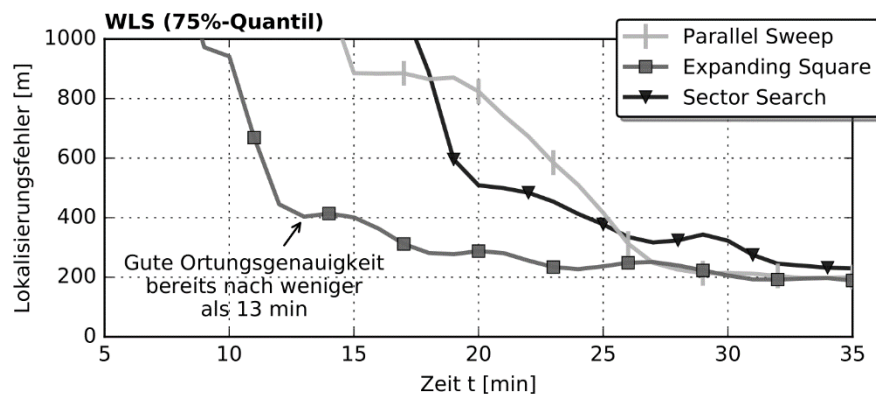


Abbildung 32: Ortungsfehler in Abhängigkeit der benötigten Zeit zur Suche [10].

1.5.2 Validierung der drahtlosen Lokalisierung

Um die Annahmen und die Durchführbarkeit der im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Ansätze zur drahtlosen Lokalisierung zu validieren, wurde ein skaliertes Experiment durchgeführt [10]. Der Versuchsaufbau basiert auf einem kleineren Flugsystem für welches keine dedizierte Start- und Landebahn notwendig ist. Aufgrund regulatorischer Umstände wurde die für das Lokalisierungssystem verwendete drahtlose Technologie so gewählt, dass sie innerhalb des 868 MHz ISM-Bandes liegt. Hier ist ein ähnliches Verhalten wie bei System zu erwarten, die im 900 MHz-Bereich arbeiten. Ein unbemanntes, bewegliches Versuchsschiff wurde auf der Wasseroberfläche platziert, um das Lokalisierungsziel und einen präzisen GNSS-Empfänger für die Referenzposition zu tragen. Der Sender ist hier in 0,65 m Höhe platziert. Ein Bild des Aufbaus vor Ort ist in Abbildung 33 dargestellt.

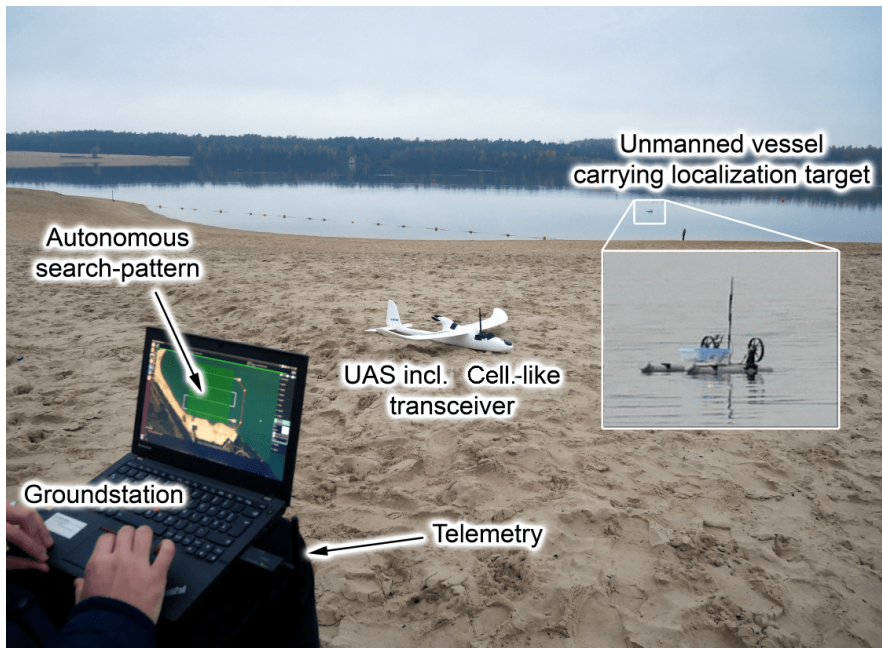


Abbildung 33: Versuchsaufbau zur Validierung der drahtlosen Lokalisierung [10].

In einem ersten Schritt wurde ein Experiment zur Bewertung der Lokalisierungsfähigkeiten des vorgeschlagenen Ansatzes in einem skalierten Szenario durchgeführt. Dabei wird das zeitliche Verhalten des Mobilfunknetzes auf das drahtlose Lokalisierungssystem projiziert, indem Messungen mit einer Rate von 2 Hz durch häufige stille SMS angenommen werden. Das UAS ist so konfiguriert, dass es durch das Parallel Sweep Verfahren einer vordefinierten parallelen Abtastung entlang eines quadratischen Suchbereichs von etwa 500 m Breite folgt. Das unbemannte Schiff, das das Sendersystem trägt, wird an einer semi-statischen Position im Suchgebiet platziert, wobei es mit Wind und Strömung driftet, während die Referenzposition mit Hilfe eines bordeigenen GNSS-Empfängers, wie in Abbildung 34 dargestellt, ermittelt wird.

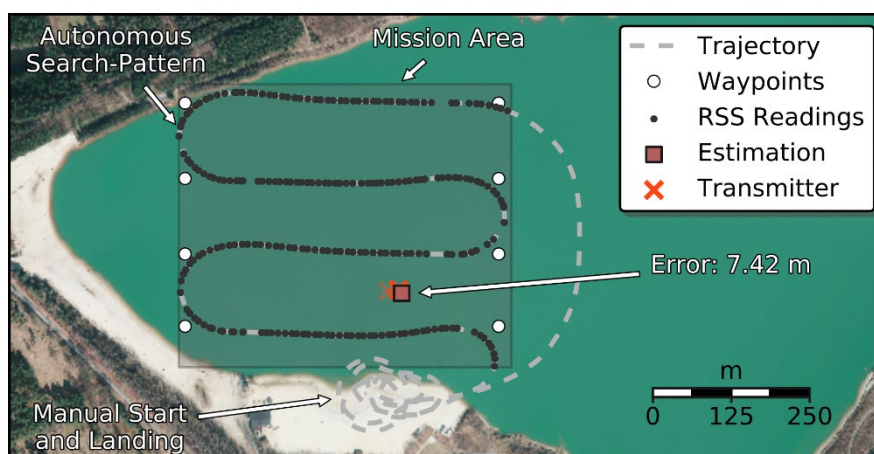


Abbildung 34: Parallel Sweep-Trajektorie des UAS sowie Position des Schiffs [10].

Unter Verwendung des WLS-Lokalisierungsalgorithmus konnte hierbei die Position des Senders mit einem absoluten euklidischen Fehler unter 8 m ermittelt werden. Um

grundlegende statistische Relevanz zu erzielen, wurde eine Reihe von vier Trajektorien am Versuchsort geflogen, wobei der Fehler 30 m nicht überschritt.

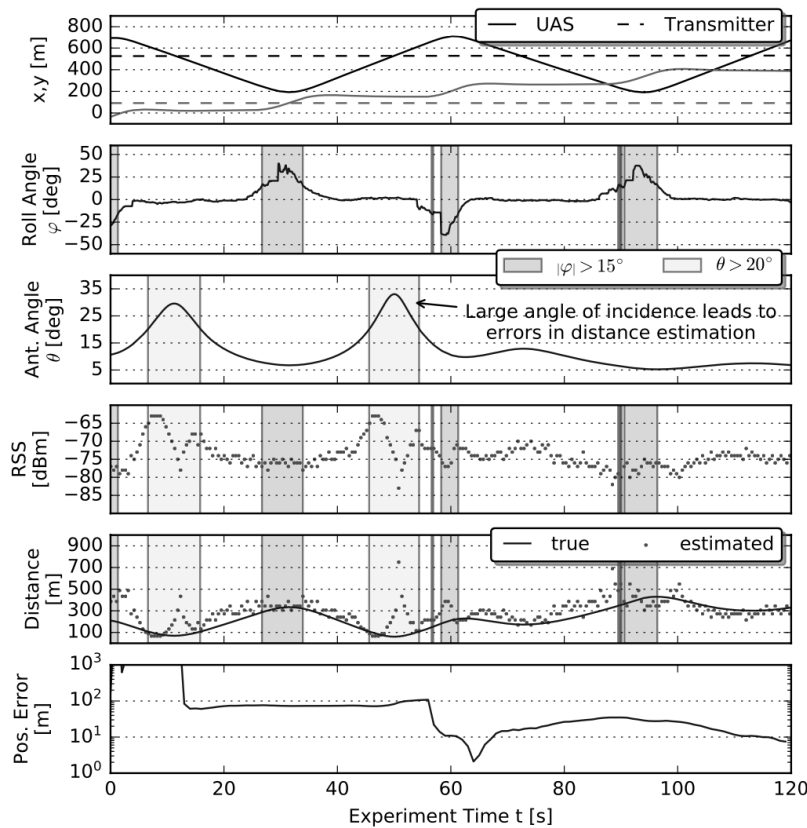


Abbildung 35: Zeitserie des skalierten *Parallel-Sweep* Lokalisierungsexperimentes [10].

Eine Zeitreihe des Experiments ist in Abbildung 35 dargestellt. Die Positionskoordinaten in einem lokalen Bezugssystem sind neben dem Rollwinkel und dem durch die Positionsdifferenz induzierten Einfallswinkel an den Antennen dargestellt. Die Zeitspannen, in denen entweder der absolute Rollwinkel oder der Einfallswinkel höher als ein bestimmter Schwellenwert ist, wurden hervorgehoben, um den Einfluss auf die resultierende RSS und damit die Entfernungsschätzung zu veranschaulichen. Besonders wenn der

Einfallswinkel hoch ist, sind große entsprechende Fehler bei der Entfernungsschätzung zu erkennen. Aufgrund der skalierten Natur des Experiments und der UAS-Geschwindigkeit von ca. 70 km/h beträgt die Suchdauer nur ca. 120 s, während ca. 240 RSS-Samples gesammelt werden. Obwohl die Referenzmessungen für die aktuelle Position des UAS und des Senders auf GNSS-Empfänger angewiesen sind, ist die erzielte Genauigkeit ausreichend, um die gegebenen Szenarien zu bewerten. Aufgrund der flachen Wasseroberfläche und Umgebung wird eine Vielzahl von Satelliten empfangen, was präzise GNSS-Messungen ermöglicht. Es ist deutlich zu erkennen, dass das UAS nach der Hälfte der Gesamtflugbahn in der Lage ist, durch eine deutliche Reduzierung des Suchgebietes einen für eine SAR-Mission ausreichenden Lokalisierungsfehler zu erhalten. Bei realen SAR-Missionen mit einem größeren Suchgebiet kann diese Reduzierung zu einer erheblichen Zeitersparnis führen oder sogar eine räumlich eingeschränkte visuelle Suche bei schlechten Sichtverhältnissen ermöglichen. Das Experiment wurde in Form einer Veröffentlichung internationalem Fachpublikum vorgestellt (siehe Abschnitt 6.2).

1.5.3 Verteilte Lagedarstellung: Einsatzplanung und Monitoring

Der effektive Einsatz des LARUS-Systems erfordert eine benutzerfreundliche Schnittstelle zur Überwachung und zur Steuerung. Hier müssen neben der Operation der Flugplattform auch die Nutzlaststeuerung und operative Aspekte des Rettungsbetriebs berücksichtigt werden. Um relevante Informationen in Echtzeit an beteiligte Stellen wie die UAS-Bodenstation, die On-Scene-Coordination oder die Seenotleitung zu übermitteln, wurde eine verteilte Lagedarstellung realisiert. Diese zeigt eine nutzerspezifisch zugeschnittene Ansicht, die sowohl in der Bodenstation als auch über das Internet zugänglich ist. Abbildung 36 zeigt die Architektur der verteilten Lagedarstellung eingeordnet in den Kontext des Gesamtsystems.

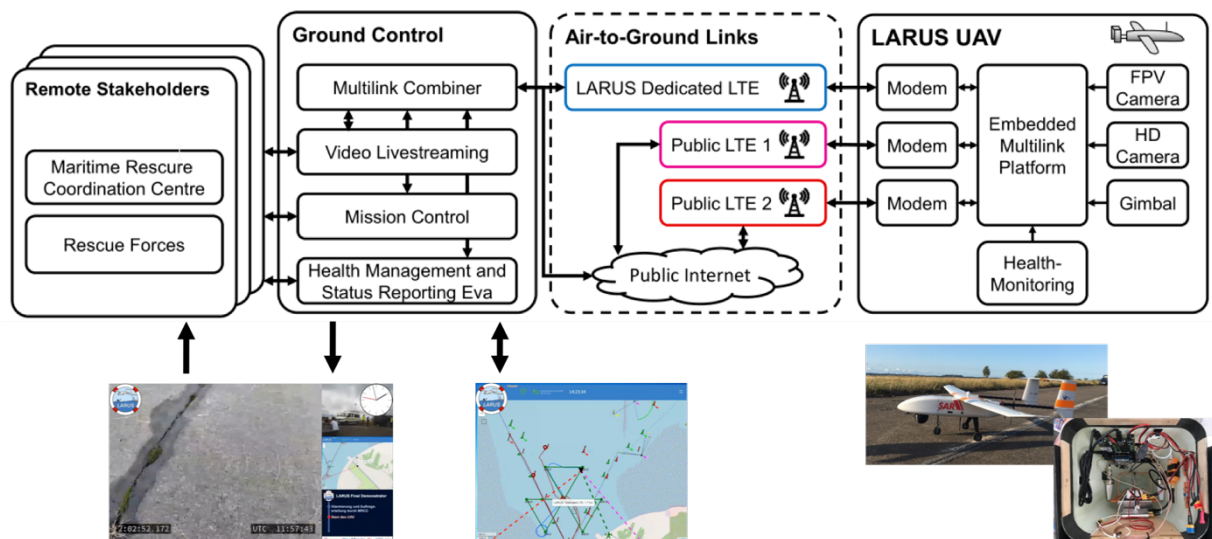


Abbildung 36: Verteilte Lagedarstellung im Kontext der Gesamtarchitektur [8].

Zur Überwachung von Plattform und Nutzlasten werden betriebsrelevante Daten wie Systemzustand, Qualität der Kommunikationslinks oder Position und Geschwindigkeit des UAVs an Bord erfasst. Diese Daten werden in der Bodenstation aufbereitet für den Operator des Flugsystems dargestellt. Zur Koordination des Rettungseinsatzes wurde zudem eine Kartenansicht entwickelt, die missionsspezifische Daten wie die verbleibende Zeit zur Fertigstellung eines Suchauftrages anzeigt. Neben der Darstellung von Lageinformationen ermöglicht die Benutzeroberfläche auch die Planung und Übermittlung von UAV-Missionen. Suchmuster können automatisiert erstellt werden sowie aus einzelnen Wegpunkten zusammengesetzt werden. Je nach Einsatzkonzept und Rolle des Nutzers kann ein Suchauftrag direkt an das UAV abgesetzt werden, oder zur Freigabe an den UAV-Operator übergeben werden. Die verteilte Lagedarstellung ermöglicht dabei die synchronisierte Darstellung der relevanten Informationen (geplante Trajektorie) an allen beteiligten Stellen, siehe Abbildung 37.

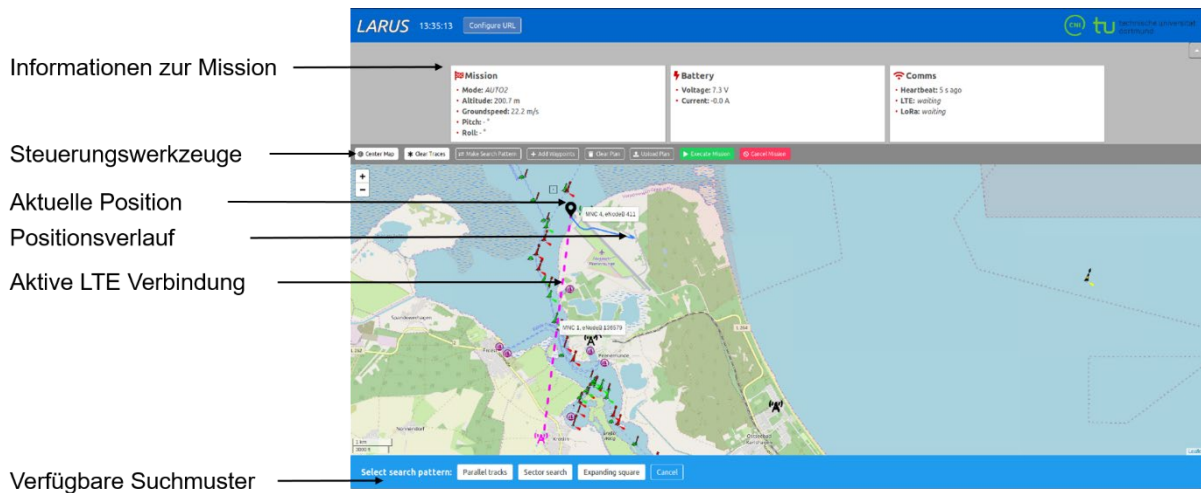


Abbildung 37: Web-basierte Schnittstelle zur Missionsteuerung und Lagedarstellung.

Der Interaktionsablauf zur Erstellung von Suchgebieten wurde gemeinsam mit dem MRCC Bremen erarbeitet. Die Schnittstelle akzeptiert die in der Seenotrettung genutzten nautischen Einheiten zur Spezifikation von Suchmustern, beispielsweise Kabel für die Suchstreifenbreite. Weiterhin kann ein über vier Eck-Koordinatenpunkte definiertes Suchgebiet dem LARUS-System direkt durch Übernahme der Informationen im Standardformat aus einer NAVTEX Nachricht oder E-Mail vom MRCC zugewiesen werden. Als gängigste Suchmuster wurden Creeping Line / Parallel Tracks, Expanding Square und Sector Search in die Missionssteuerung integriert. Beispiel für automatisch generierte Trajektorien in der Kartenansicht sind in Abbildung 38 dargestellt.



Abbildung 38: Übersicht der automatisch planbaren Suchmuster.

1.6 Arbeitspaket 6: Validierung und Pilotversuche

Die primären Ziele der TU Dortmund im Arbeitspaket 6 umfassten die Durchführung von Integrationstests, Pilotversuchen und Validierungsdemonstrationen (AP6.2) sowie die Dissemination der Projektergebnisse auf nationaler und internationaler Ebene (AP6.3). Die wissenschaftliche Verwertung der Projektergebnisse ist zusammen mit öffentlichkeitswirksamen Maßnahmen detailliert in Abschnitt 6 beschrieben. Die folgenden Abschnitte fokussieren sich auf Gesamtintegration, Validierung und gemeinsame Pilotversuche mit den Verbundpartnern im Hinarbeiten auf die Demonstratorsysteme, während Validierung, Test- und Pilotversuche der einzelnen Teilkomponenten in den jeweiligen Arbeitspaketen bereits in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben wurden.

1.6.1 Übersicht der Aktivitäten

Da die Entwicklung von flugfähigen Demonstratoren eins der Hauptziele des Projekts war, waren Integrations- und Validierungsarbeiten kritisch für den Erfolg des Gesamtvorhabens. Neben den vorgegebenen regelmäßigen Verbundtreffen und den Demonstrationen wurde deshalb eine Vielzahl von Arbeitstreffen organisiert, deren inhaltliche Punkte sich mit fortschreitendem Projektstand von Planung und Konzeption, zu Integration, Funktionstests und schließlich Flugtests wandelten. Eine Übersicht der Aktivitäten ist in Tabelle 5 gegeben.

Datum	Experiment	Flug UAV
25.10.2016	Abstimmung der Projektpartner bei der Vorstellung des Projekts auf der BMBF „Auftaktveranstaltung Innovative Rettungs- und Sicherheitssysteme“ in Berlin	
28.11.2016	Kick-off-Treffen des Projekts in Bremen	
26.01.2017	Workshop zur Gesamtarchitektur und Systemspezifikation in Dortmund	
10.05.2017	Verbundtreffen: globale Statusberichte und Planung in Aachen	
24.08.2017	Planung der Nutzlast, erster Versuche und Konzeption Early Demonstrator in Bremen	
20.11.2017	Verbundtreffen: globale Statusberichte und Planung in Dortmund	
07.02.2018	Workshop zu Early Demonstrator und Integrationsarbeiten in Kamp-Lintfort	
20. - 21.03.2018	Integration zur Early Demonstrator Vorbereitung in Bremen	
18. - 19.04.2018	Flugtests Missionssteuerung und AIS Detektion in Rotenburg (Wümme)	•
24. - 26.04.2018	Vorbereitung Early Demonstrator + Early Demonstrator in Rotenburg (Wümme)	•
15. - 17.10.2018	Integration Communication Gateway (Bremen), Outdoorrest Datenlink und Antennentracker (Ristedt)	
29.11.2018	Verbundtreffen: globale Statusberichte und Planung in Dortmund	

Datum	Experiment	Flug UAV
09.04.2019	Verbundtreffen: globale Statusberichte und Planung in Bremen	
22.05.2019	Integration und Reichweitentest der dedizierten LTE Anbindung in Ristedt	
20.05.2019	Erstflug der LARUS Final-Demonstrator Plattform in Rotenburg (Wümme)	•
02. - 03.07.2019	Überprüfung Tauglichkeit Flugplätze Ribnitz-Damgarten und Peenemünde	
06. - 08.08.2019	Integrationsarbeiten und Funktionstests in Bremen und Rotenburg (Wümme)	
20. - 22.08.2019	Erster Validierungsflug in Peenemünde	•
28. - 30.08.2019	Zweiter Validierungsflug in Pütznitz	•
10. - 14.09.2019	Dritter Validierungsflug mit DGzRS SAREx in Peenemünde	•
08.10.2019	Funktionstests LoRa Telemetrie in Dortmund	
10.10.2019	Funktionstests Gimbal Sensorik in Rotenburg (Wümme)	
15. - 16.10.2019	Flugtests im Vorfeld des Final Demonstrator in Peenemünde	•
15. - 17.10.2019	Flugtests im Rahmen des Final Demonstrators in Peenemünde	•
15.11.2019	Wiegung und Trimmung Gimbal Integration in Bremen	
15.11.2019	Testflüge Ausweichmanöver in Aachen	•
27.11.2019	Funktionstests Gimbal Sensorik in Bremen	
29.11.2019	Testflüge Böenlasterkennung in Aachen	•
03.12.2019	Funktionstests LoRa Telemetrie in Dortmund	
03.12.2019	Funktionstests Gimbal Sensorik in Rotenburg (Wümme)	
10.12.2019	Bemannte Flugexperimente Multi-Link Kommunikation in Peenemünde	
12.12.2019	Verbundtreffen: Abschlussberichte und Planung von Anschlussarbeiten in Dortmund	

Tabelle 5: Übersicht der Integrations- und Testaktivitäten im Projekt.

1.6.2 Erster Flugtest Communication Gateway und Missionssteuerung

Die Integration zweier Komponenten der TU Dortmund war essenziell für die grundlegende Funktionalität des Early Demonstrators: das Communication Gateway, welches Nutzlasten an den Datenlink zum Boden anbindet, sowie die Missionssteuerung, über die während des Fluges Trajektorien geplant und an das UAS gesendet werden können. Die Überprüfung der Funktionstüchtigkeit dieser beiden Module war daher Gegenstand des ersten Validierungsfluges am 19.04.2018. Im Vorfeld wurde das integrierte Gateway (siehe Abbildung 39 links) am Boden getestet. Weiterhin wurde die Schnittstelle zum Autopiloten in einer Hardware-In-The-Loop Simulation erprobt sowie ein Protokoll zur Übergabe der Kontrolle zwischen dem UAV-Sicherheitspiloten und dem Bediener der Bodenstation erarbeitet. Als erste Nutzlast wurde ein Automatic Identification System (AIS)-Empfänger an das Gateway angebunden, der ein vom Flugplatz ausgesendetes Signal erfolgreich empfangen und über den Datenlink an die Bodenstation übermitteln konnte. Zur Funktionsvalidierung

der Missionssteuerung wurde ein Parallel-Tracks-Suchmuster automatisch geplant, erfolgreich an das UAS gesendet und als Suchtrajektorie geflogen.



Abbildung 39: Integrierte erste Version des Communication Gateways (links), Bodenstation (Mitte) und Missionssteuerung in der Bodenstation (rechts) beim ersten Integrations-Flugtest.

1.6.3 Early-Demonstrator

Eine Demonstrationsveranstaltung zur Hälfte der Projektlaufzeit diente dazu, die Validität des Gesamtkonzepts frühzeitig abzusichern. Im Rahmen der Veranstaltung wurde der Stand des Projektes an Hand von Postern und Präsentationen (Konzept, Architektur), Tischaufbauten der Nutzlasten (siehe Abbildung 40) sowie einem Testflug präsentiert.



Abbildung 40: Präsentationen der Zwischenergebnisse beim Early Demonstrator.

Im Testflug wurde neben der Leistungsfähigkeit der Plattform auch die Missionssteuerung sowie der Empfang von Signalen eines persönlichen AIS-Senders, der beispielsweise in Rettungswesten integriert ist, über ein Modul an Bord des UAS demonstriert. Das gezeigte Einsatzszenario wurde durch den Telemetrielink (Missionssteuerung) sowie den Public-LTE-Datenlink (Weiterleitung der AIS-Nachrichten an die Bodenstation) gestützt. Der Flug fand unter windigen und regnerischen Bedingungen statt (siehe Abbildung 41 links). Somit konnte das System seine Wetterfestigkeit unter Beweis stellen, während die Projektpartner und das externe Fachpublikum (siehe Abbildung 41 rechts), u.a. Marineflieger, Bundespolizei, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie sowie Havariekommando, die Mission von einem wettergeschützten Ort in Echtzeit über die Missionssteuerungsansicht verfolgen konnten.



Abbildung 41: Early Demonstrator UAS vor dem Testflug (links) und Gruppenbild (rechts).

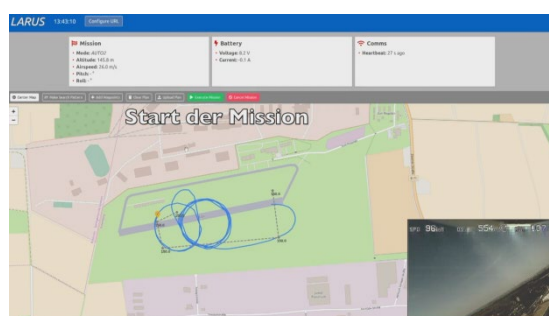
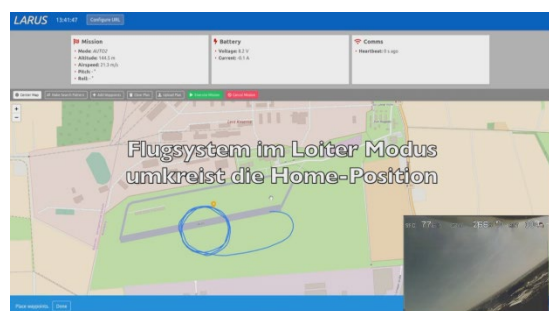


Abbildung 42: Ausschnitte aus dem Video zur Dokumentation des Early Demonstrators

1.6.4 Validierungsphase

Als Vorbereitung auf eine praxisnahe Funktionsdemonstration zum Projektende, waren die letzten sechs Projektmonate als Validierungsphase zur ausführlichen Erprobung des Systems vorgesehen. In vorbereitenden Arbeiten konnte die Zustimmung der Flugplätze Peenemünde auf Usedom und Ribnitz-Damgarten bei Pütnitz an der Ostsee, als Ausgangspunkte für Validierungsflüge zu dienen, eingeholt werden. Abbildung 43 zeigt die Lage der Flugplätze sowie die Trajektorien aller durchgeführten Validierungsflüge, links für Peenemünde, rechts für Ribnitz-Damgarten. Insgesamt wurden im Rahmen der Validierung rund 660 Seemeilen (etwa 1220 km) über der See zurückgelegt. Den Großteil dieser Strecke legte das UAS außerhalb der Sichtweite der Bodenstation mit einer Flughöhe von bis zu 750 m zurück. Mit jedem Flug wurden sukzessive zusätzliche Teilaspekte und -integrationen hinzugefügt, sodass am Ende der dreijährigen Projektlaufzeit im Rahmen des Final Demonstrators erfolgreich das vollintegrierte LARUS UAS in einer simulierten Rettungsmission präsentiert werden konnte.

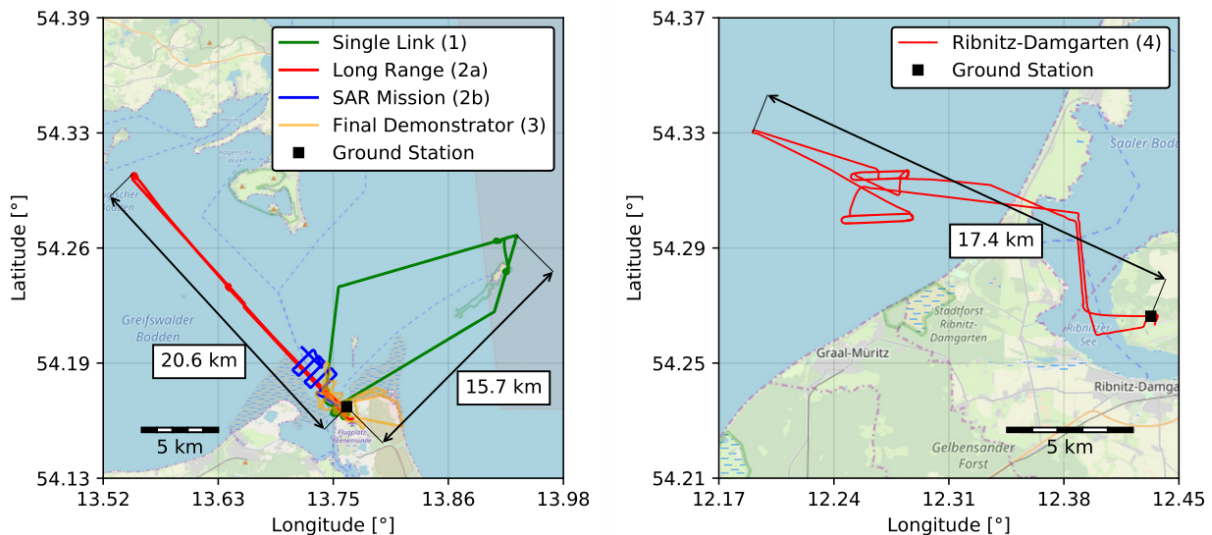


Abbildung 43: Trajektorien der Validierungsflüge mit dem LARUS UAS über der Ostsee ausgehend von Peenemünde (Links) und Ribnitz-Damgarten (Rechts). Map: © OpenStreetMap Contributors.

Während des ersten Validierungsflugs in Peenemünde lag der Fokus auf der Gesamtfunktionalität. Hier wurde zunächst die Übertragung von Videodaten über einen einzelnen LTE Link untersucht. Geflogen wurde eine Route über die Insel Greifswalder Oie, auf der auch Rettungskräfte der DGzRS stationiert sind. Insgesamt betrug die maximale Distanz zum Flugplatz Peenemünde 15,7 km. Die Route (vgl. Trajektorie „Single Link (1)“ Abbildung 43) wurde insgesamt zweimal geflogen. Der Video-Stream konnte dabei ununterbrochen über das öffentliche Mobilfunknetz übertragen werden.

Vom 10. bis 14.09.2019 wurde eine Großübung der DGzRS (Search and Rescue Exercise, SAREx) aus der Luft begleitet. Hier wurden mehrere Validierungsflüge durchgeführt. Diese sind in Abbildung 43 mit „Long Range (2a)“ und „SAR Mission

(2b)“ dargestellt. Die Reichweitenmission erfolgte über dem Greifswalder Bodden und der maximale Abstand zwischen UAV und Bodenstation betrug mehr als 20 km. Hierbei kam die Multi-Link Kommunikation zum Einsatz. So konnte unter Nutzung zweier öffentlicher Mobilfunknetze erfolgreich ein Echtzeit-Videostream übertragen werden. Telemetriedaten wurden über das 868 MHz Band übertragen. Die Ergebnisse der Multi-Link-Validierung aus diesem Flugversuch sind in Abschnitt 1.4.2 detailliert beschrieben. Während der SAR Mission wurden verschiedene Suchmuster zum Auffinden von vermissten Personen erprobt. Diese konnten als Suchaufträge über die verteilte Lagedarstellung (vgl. Abschnitt 1.5.3) geplant und an das UAS übermittelt werden.



Abbildung 44: LARUS-System während des Validierungsfluges am 28.08.2020 über der Ostsee bei Ribnitz-Damgarten.

In Ribnitz-Damgarten fand am 29.08.2019 ein weiterer Validierungsflug statt. Die Flugroute ist in Abbildung 43 rechts dargestellt. Der Flug fand zusammen mit dem Such- und Rettungsdienst des Marinefliegerkommandos unter Einsatz eines Rettungshubschraubers Typ Sea King Mk41 statt. Ziel war die Evaluierung der Sichtbarkeit von UAS in maritimen Rettungseinsätzen (vgl. Abschlussbericht des Verbundpartners DGzRS). Abbildung 44 zeigt das LARUS UAS während des Validierungsfluges über der Ostsee.

Parallel zu den Testflügen wurde die beschaffte UAV-Plattform S180 (Vgl. Abschnitt 2 Lfd.-Nr. 3) für weiterführende Validierungsarbeiten der Kommunikationssysteme genutzt. So wurden die LoRa-Funkmodule mit dem Autopiloten des S180 integriert, sodass die Übertragung realer Telemetriedaten erprobt werden konnte. Der Aufbau wurde in mehreren Labor- und Feldversuchen getestet und validiert. Abbildung 45 zeigt einen Versuchsaufbau in Dortmund. Hier wurde der Telemetrielink über eine

Distanz von etwa 6 km getestet. Die Ergebnisse des Versuchs werden im Abschlussbericht von des Verbundpartners IMST erläutert.



Abbildung 45: Integration und Validierung der LoRa Telemetrie mit dem S180 UAV. Links: Integration des LoRa Telemetrie Moduls im Rumpf des S180. Rechts: Validierungstest in Dortmund.

1.6.5 Final Demonstrator

Die finale Demonstration der Projektergebnisse fand am 17.10.2019 in Peenemünde statt (vgl. Abbildung 43 Trajektorie „Final Demonstrator (3)“). Während der Veranstaltung wurde ein vollständiger simulierter Rettungseinsatz mit Unterstützung des LARUS UAS gezeigt. Hierzu erfolgte zunächst die Alarmierung des Rettungszentrums in Bremen, dem MRCC, welche den Start des LARUS UAS veranlasste. Während einer Suche im Uferbereich gab es eine Aktualisierung des Suchauftrags durch das MRCC mit einem spezifischeren Suchgebiet. Im neuen Suchgebiet konnte mit Hilfe eines Kamerasystems der Havarist im Wasser detektiert werden. Nach einer erfolgreichen Weitergabe der Koordinaten an das MRCC konnte der Rettungskreuzer Berthold Beitz die Rettung vornehmen, während das LARUS UAS Echtzeit-Lagebilder aus der Luft lieferte (siehe Abbildung 46 links). Während der gesamten Demonstration wurden Lagebilder sowie ein Echtzeit-Videostream vom UAS sowohl an die Bodenstation als auch an das MRCC und den im Missionsgebiet befindlichen Rettungskreuzer übertragen.

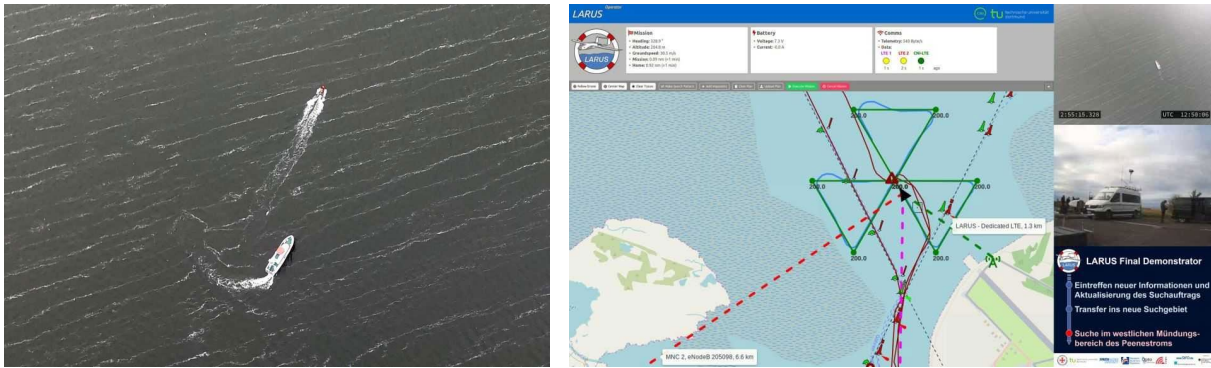


Abbildung 46: Final Demonstrator. Links: Luftbild des Seenotrettungskreuzers BERTHOLD BEITZ und seines Arbeitsbootes ELSE, aufgenommen vom LARUS-System. Rechts: Echtzeit-Lagebild des LARUS-Systems während einer Sektorensuche, welches auf die Brücke des Seenotrettungskreuzers BERTHOLD BEITZ übertragen wurde.

Die Modalitäten der Ausrichtung des Final Demonstrators ließen nur ein kleines Publikum vor Ort zu (siehe Abbildung 50). Zur Beteiligung externen Fachpublikums (Stakeholder) wurde ein Video Stream im Internet bereitgestellt, über den das Geschehen vor Ort mitverfolgt werden konnte (Abbildung 46 rechts und Abbildung 48 und Abbildung 49). Das Live-Streaming wurde über einen eigens realisierten Server ermöglicht, der an der TU-Dortmund betrieben wurde. Abbildung 48 und Abbildung 49 zeigen Ausschnitte des Livestreams mit den verschiedenen Phasen der durchgeführten Mission. Hinsichtlich des von der TU Dortmund entwickelten Multi-Link-Konzepts kann man zum Beispiel in der Phase der Sektorensuche (siehe Screenshot in der Abbildung 49 um 14:23 Uhr) anhand der verschiedenen farbigen Linien die unterschiedlichen, parallel betriebenen Netzverbindungen nachvollziehen (magenta: öffentlicher Netzbetreiber 1, rot: öffentlicher Netzbetreiber 2, grün: dediziertes LARUS-LTE-Netz).

Neben einer kurzen Vorstellung des Projekts sowie einer kommentierten Begleitung der Demonstratormission wurde den Zuschauern auch die Möglichkeit geboten, interaktiv Rückfragen an die Projektpartner zu stellen. Der Live-Stream steht zur Dokumentation der Übung auch im Internet weiterhin zur Verfügung:

<https://www.youtube.com/watch?v=E9VDEhAYFbA>

Die in dieser Form für Forschungsprojekte neuartige Form der Teilnahmemöglichkeit per Online-Live-Übertragung ist für Anwender besonders attraktiv, da sie einerseits effizient ist und andererseits die notwendige Authentizität ermöglicht.

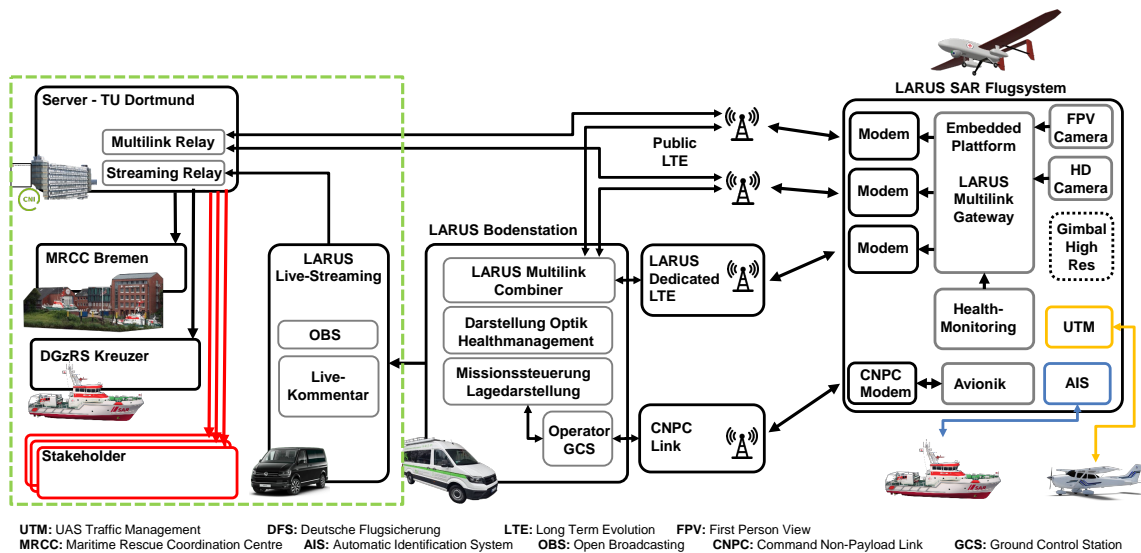


Abbildung 47: Systemarchitektur zur Bereitstellung eines Livestreams zur Einbindung interessierter Stakeholder in die Übung und den Einsatz des LARUS Systems.

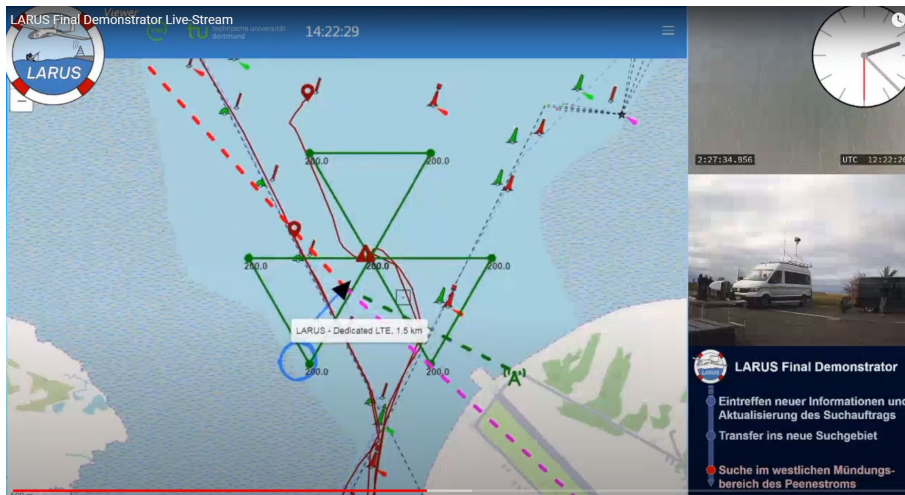


Start des LARUS UAV (links Kamerabild des UAVs mit Startbahn, 13:38 Uhr)



Flug ins Suchgebiet (14:09 Uhr)

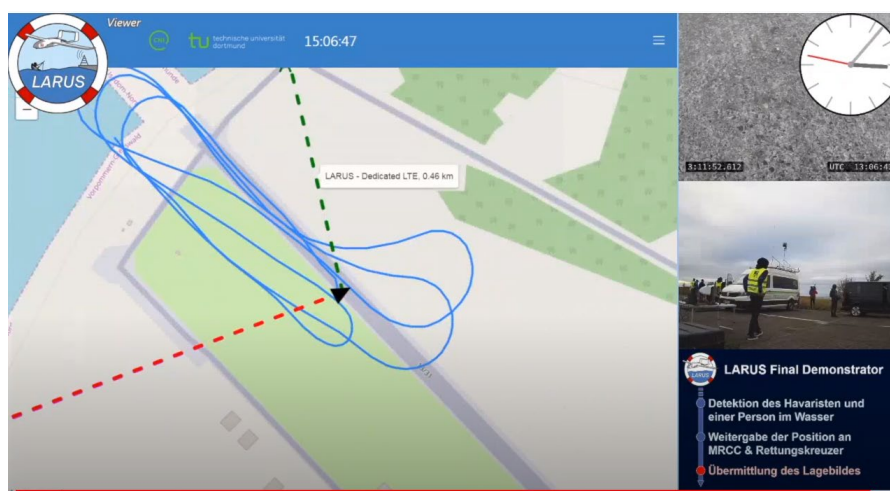
Abbildung 48: Ausschnitte aus dem Live-Stream des Final Demonstrators (Teil 1).



Durchführung einer Sektorensuche (14:23 Uhr)



Auffinden der vermissten Person (14:28 Uhr)



Sichere Rückkehr und Landung (15:06 Uhr)

Abbildung 49: Ausschnitte aus dem Live-Stream des Final Demonstrators (Teil 2).



Abbildung 50: Final Demonstrator. Links: Gruppenfoto der Teilnehmer. Rechts: Überflug des UAS über die Bodenstation am Flugplatz Peenemünde.

1.6.6 Erweiterte Messungen zur Bewertung der maximalen Leistungsfähigkeit und Ausblick Satellitenkommunikation

Bei den LARUS Validierungsflügen lag der Fokus der Messreihen auf der Evaluierung und Bewertung der Unterstützungsfunktion für die Seenotrettung. Um die Leistungsgrenzen des Kommunikationssystems bewerten zu können, wurde im Nachgang des Final Demonstrators, am 10.12.2020, ein bemannter Flug mit einem Ultraleichtflugzeug durchgeführt. Da hier keine für das System kritischen Daten übertragen werden mussten, konnte der Kommunikationskanal vollständig ausgelastet und so die maximale Leistungsfähigkeit bewertet werden. Abbildung 51 zeigt die Trajektorie (rechts) und das im Fluggerät montierte Messequipment (links). Die Flugroute verlief analog zu den in der Validierungsphase durch das UAS geflogenen Trajektorien, um vergleichbare Resultate und Mobilfunkabdeckung zu erzielen. Darüber hinaus wurde eine Machbarkeitsstudie für eine mögliche Telemetrie-Anbindung über Satellitenkommunikation durchgeführt. Die Leistungsbewertung zeigte, dass durch den Multi-Link Ansatz der erzielbare Durchsatz deutlich erhöht werden kann. Eine detaillierte Abbildung und Diskussion der Ergebnisse erfolgt in Abschnitt 1.4.2 und Abbildung 26. Die Grenzen der Abdeckung durch deutsche Mobilfunkanbieter waren vor allem im Bereich der polnischen Grenze bemerkbar. Abhilfe könnte hier in Zukunft Satellitenkommunikation schaffen. Mithilfe einer Proof-of-Concept Evaluierung konnten in diesem Bereich Daten übertragen werden. Da die Erprobung und Ertüchtigung des LARUS UAS mit Satellitenkommunikation nicht für LARUS geplant war, wird an dieser Stelle lediglich auf diesen möglicher Lösungsansatz und Ausblick auf zukünftige Arbeiten hingewiesen.

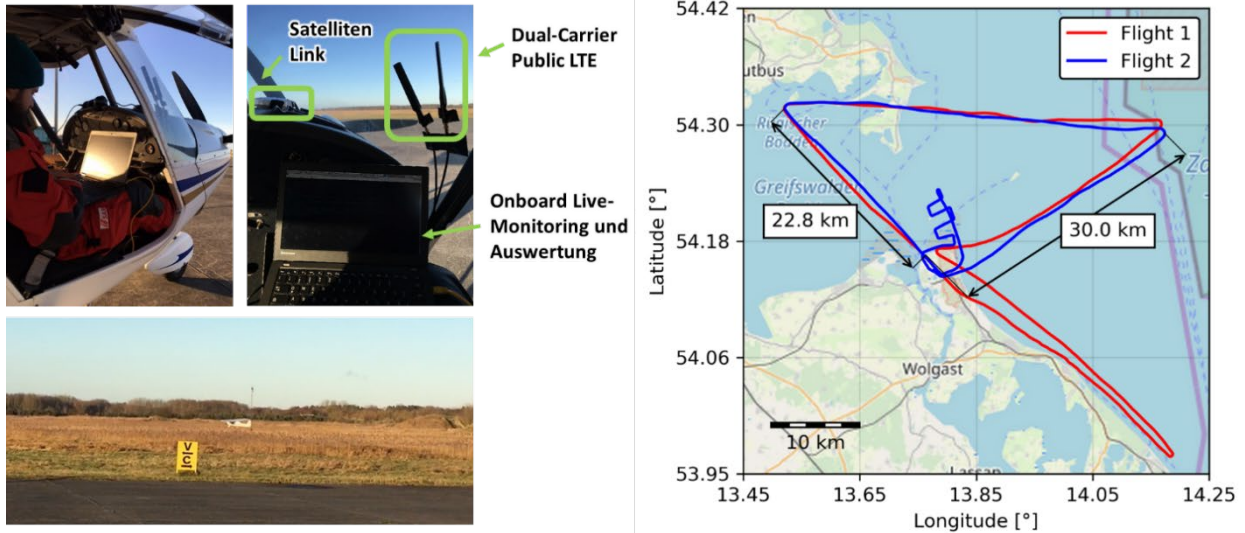


Abbildung 51: Bemannter Flug zur Evaluierung der Systemgrenzen des Multi-Links. Ultraleichtflieger und Messequipment (links) und Trajektorie (rechts). Map: © OpenStreetMap Contributors.

2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die oben vorgestellten Ergebnisse von LARUS wurden durch eine Reihe größerer Investitionen in Equipment, sowie Personal und Reisemittel ermöglicht. Getreu dem Schwerpunkt *sichere und robuste Kommunikation* dieses Teilvorhabens dient der Großteil der Beschaffungen hauptsächlich der Erforschung von Kommunikationslösungen.

Software-Defined-Radio (SDR) Module wurden im Projekt ausführlich zur digitalen Erzeugung und Erfassung von Funksignalen genutzt (Lfd.-Nr. 1). Ein kompakter Formfaktor der Module war dabei Voraussetzung für den mobilen Einsatz und den Einbau ins UAV. Im für Feldtests ausgewählten „Greifswalder Bodden“ wurden Netzabdeckung sowie mögliche Interferenz durch digitales Fernsehen (DVB-T) in einer Testfahrt per Boot initial bewertet, wobei eine mobile Beobachtung des Spektrums per SDR und Laptop möglich war. Zudem dienten die SDR-Geräte als Funkmodule für eigens entwickelte LTE Basisstationen. Das kompakte Format machte es dabei möglich, eine Basisstation zu realisieren, die in der Nutzlastspitze der LARUS-UAS als Aerial Hotspot untergebracht werden konnte (siehe Abschnitt 1.4.3). Die für den Einsatz in LARUS speziell angepasste Basisstation am Boden wurde ebenfalls mit Hilfe der SDR-Module realisiert (siehe Abschnitt 1.4.1).

Eine Software-Implementierung von LTE sollte ursprünglich kommerziell erworben werden (Lfd.-Nr. 2). Bedingt durch fortlaufende State-of-the-Art Recherche konnte während der ersten Projektmonate eine quelloffene Implementierung identifiziert werden, die den benötigten Funktionsumfang gänzlich abdeckte.

Für die kommerzielle LTE Softwarelizenz veranschlagte Mittel wurden für die Beschaffung einer Funkkanalübertragungsmatrix umgewidmet. Diese ermöglichte die Emulation maritimer Kanalbedingungen im Labor durch die Nachbildung von Kanalmodellen aus der Literatur. In den darauf aufbauenden Experimenten wurde eine Vielzahl von Erkenntnissen für robuste Multi-Link Kommunikation im maritimen Umfeld gesammelt. Zunächst wurde die Reichweite des LTE-Links unter Variation von Parametern wie Frequenz, Flughöhe und Wellengang analysiert (siehe Abschnitt 1.4.1). Daran anschließend wurde bewertet, wie heterogene Links, also die gleichzeitige Nutzung mehrerer Basisstationen, zur Erhöhung der Robustheit beitragen können. Hierzu wurden mehrere Links parallel emuliert und verschiedene Strategien zur Flusssteuerung von Daten vergleichend bewertet (siehe Abschnitt 1.4.2). Die Experimente wurden als Hardware-in-the-Loop-Aufbauten mit dem im Fluggerät genutzten Communication-Gateway konzipiert. Somit konnten neben den wissenschaftlichen Ergebnissen auch Erkenntnisse über die Robustheit der Hardware und Software unter herausfordernden Kanalbedingungen schon vor den ersten Flugtests gewonnen und zur fortlaufenden Abhärtung des Systems für den Einsatz genutzt werden.

Für Arbeiten in den Bereichen Aufgabenplanung und Schnittstelle zum Autopiloten war die flexible Verfügbarkeit einer UAV-Plattform essenziell, weshalb eine kleinere Ausführung des Fluggerätes von Hanseatic Aviation Solutions beschafft wurde (Lfd.-Nr. 3). Dies erleichterte die dezentrale Integrationsarbeit und Implementierung von Schnittstellen zur Aufgabenplanung und Missionssteuerung (siehe Abschnitt 1.3). Weiterhin wurde das System genutzt, um die Anforderung des Telemetrielinks zu analysieren und sowohl in LTE als auch in LoRa abzubilden und experimentell zu bewerten. Zudem wurde das Gerät den Partnern RWTH für erste Arbeiten an der Kollisionsvermeidung sowie IMST für die Entwicklung einer Protokollschnittstelle für Telemetriedaten zur Verfügung gestellt. In Zusammenarbeit mit IMST wurde der LoRa-Telemetrielink mit der Plattform integriert und sowohl am Boden in Dortmund (siehe Abschnitt 1.6.4) als auch im bemannten Flug in Peenemünde (siehe Abschnitt 1.6.6) experimentell bewertet.

Um eine nachhaltige Sichtbarkeit der in LARUS erarbeiteten Ergebnisse zu gewährleisten, wurde der Final Demonstrator von einem Filmproduktionsteam begleitet (siehe Abschnitt 6.3). Vor dem Hintergrund des Seenotrettungsszenarios, das im Final Demonstrator vorgeführt wurde, beleuchtet der entstandene Film rettungsfachliche und technische Aspekte und Resultate des Projekts. Das Video ist frei im Internet zugänglich, auf den Seiten des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (Sicherheitsforschung) und auf dem Videokanal des Lehrstuhls für Kommunikationsnetze¹, und bietet allen Interessenten die Möglichkeit, einen detaillierten Eindruck des LARUS Projekts sowie Impressionen der Fähigkeiten des Systems im Demonstrator-Einsatz zu gewinnen.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit

Die Ergebnisse von LARUS leisten einen wesentlichen Beitrag zur Konzeption und Entwicklung von unbemannten Systemen für die Unterstützung ziviler Sicherheitsaufgaben. In den Vorarbeiten zur Validierungsphase und zu den Demonstratoren wurden viele regulatorische Prozesse erstmalig durchlaufen. Beispielsweise erhielt das LARUS-UAS die erste SAR-Flugzeugkennung für AIS (SAR Airborne Station) von der Bundesnetzagentur. Die Erarbeitung der notwendigen Zulassungen für den Experimentalbetrieb liefern wichtige Erfahrungswerte für Anwender und Systemanbieter im Bereich ziviler UAS-Einsätze über See und außer Sicht. Für den

¹ <https://youtu.be/kJ9ABk8Rr4M>

demonstrativen Testeinsatz des LARUS-Systems gemeinsam mit der DGzRS wurde eine anwenderorientierte Missionssteuerung geschaffen, die mit dem Einsatzkonzept der Seenotretter eng verzahnt ist. Mit dem Final Demonstrator wurde gezeigt, dass der LARUS-Operator im Kontakt mit einem *On-Scene-Coordinator* (OSC, per Sprechfunk vom Seenotrettungsboot)

- einen Suchauftrag wie eine reguläre Sucheinheit annehmen kann,
- den Auftrag per Missionssteuerung in eine UAS-Trajektorie übersetzen kann,
- auf Videodaten und hochauflösende Bilder während der Suche zugreifen kann,
- gesichtete Positionen an den OSC zurückmelden kann.

Dieses Ergebnis erforderte sowohl technische Integration der UAV-Plattform und der Nutzlasten als auch operative Integration mit den koordinativen Prozessen der Seenotrettung. Die hier geleisteten Arbeiten zeigen die zentrale Bedeutung von geeigneten Nutzerschnittstellen und Einsatzkonzepten, auf die zukünftige Kooperationen von BOS und UAS-Systemanbietern aufbauen können.

Weiterhin konnte erprobt werden, inwiefern sich öffentliche Mobilfunknetze als Infrastruktur für Nutzlastkommunikation eignen. Die Kombination mehrerer Provider zu einem Multi-Link ermöglichte eine erhebliche Steigerung der Zuverlässigkeit und Performanz am Rand der Abdeckung terrestrischer Mobilfunknetze. Das dafür genutzte Protokoll basiert auf TCP/IP, was die Überführung des Konzepts in zukünftige Anwendungen oder in bereits existierende Systeme praktikabel macht. Weiterhin wurde eine eigene LTE-Basisstation entwickelt und genutzt. Die im Projekt demonstrierte Fähigkeit, eigene Basisstationen zu betreiben und nahtlos in den Multi-Link zu integrieren, bietet zukünftigen Anbietern die Möglichkeit, Lücken in der Netzabdeckung zu schließen oder vollständig auf eigene Infrastruktur aufzubauen.

Im Projekt konnten neuartige Ansätze zur funkbasierten Lokalisierung erprobt werden. Die entwickelten Methoden zeigen Wege auf die Suche bei eingeschränkten Sichtverhältnissen essenziell zu beschleunigen. Durch simulative und skalierte experimentelle Evaluierung mit vergleichbaren Technologien konnte der Mehrwert in der Genauigkeit der Lokalisierung unter Beweis gestellt werden.

4 Voraussichtliche Nutzung

Die wissenschaftlichen Herausforderungen innerhalb der Projektziele tragen maßgeblich zur Vertiefung der Kernkompetenzen des Lehrstuhls für Kommunikationsnetze bei. Insbesondere im Bereich der LTE Kommunikation für UAS und der funkbasierten Ortung im maritimen Umfeld konnten zahlreiche Publikationen auf internationalen Fachkonferenzen publiziert werden. Darüber hinaus fließen die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Bereich sichere Multi-Link Kommunikation in Vorlesungen (z.B. „Modellierung und Dimensionierung von Kommunikationssystemen“).

men“, „Kommunikationsnetze“, „Mobilfunknetze und ihre Protokolle“, „Betriebswirtschaftliche Grundlagen der Informations- und Kommunikationstechnik“) und studentische Projekte ein und reichern die theoretischen Grundlagen aus diesem Forschungsfeld durch die praktische Umsetzung an. Auf diese Weise werden die Studierenden frühzeitig in konkrete Forschungsthemen eingeführt und erhalten damit einen breiten Überblick der Anwendungsgebiete von Kommunikationsnetzen. Somit entsprechen die vermittelten Inhalte dem aktuellsten Stand der Technik und sind von hoher Relevanz für den Arbeitsmarkt. Neben der Einbindung der Projektinhalte in die Vorlesungen wurden während der Projektlaufzeit studentische Abschlussarbeiten angeboten und erfolgreich abgeschlossen. Die Ergebnisse des Projekts werden zudem im Rahmen der Vorbereitung einer Dissertationsschrift wissenschaftlich weiterverwertet.

Darüber hinaus konnte durch die erzielten Projektergebnisse Beiträge zur zukünftigen Einsatzfähigkeit von UAS im Bereich der zivilen Sicherheit durch die TU Dortmund geleistet werden. Insbesondere gilt dies für zukünftige Regularien für Steuerung und Datenverkehr der UAS.

Durch die Fachkompetenz, die in LARUS aufgebaut wurde, konnte die TU Dortmund weitere Forschungsprojekte einwerben, die sich mit ziviler Sicherheit und verwandten Themen auseinandersetzen. Im „Kompetenzzentrum: Aufbau des Deutschen Rettungsrobotik-Zentrums (A-DRZ)“ (gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF) werden Konzepte für robuste Kommunikation auf den Indoorbereich und Bodenroboter ausgeweitet und übertragen. Zudem werden Methoden zur Prüfung und Zertifizierung von Kommunikationslösungen im Kontext der Rettungsrobotik entwickelt. Im anwenderorientierten BMBF-geförderten Projekt „Unterstützung von Rettungskräften durch Lokalisierung im Ausbildungs- und Rettungseinsatz (CELIDON)“ wird das Themenfeld der funkbasierten Ortung in Form eines Lokalisierungssystems für Rettungskräfte weiter vertieft. Nachdem in LARUS demonstriert werden konnte, dass sich unbemannte Luftfahrtsysteme grundsätzlich zur Einbindung in SAR Einsätze eignen, wird in Zukunft das Ziel verfolgt, beispielsweise in Folgeprojekten, den Reifegrad des Systems auf ein praxistaugliches Niveau zu heben und die Leistungsfähigkeit unter realistischen Einsatzbedingungen zu validieren. Über den Einsatz in der Seenotrettung hinaus können die erheblichen Anwendungspotenziale bei Vermisstensuche, und Lageerkundung auch in weiteren Bereichen wie Bergrettung oder Katastrophenschutz ausgenutzt werden. Damit bilden die Ergebnisse von LARUS die Basis für mögliche weitere Forschungsvorhaben, aber sind auch Grundlage für wirtschaftliche Verwertung durch Projektpartner sowie weitergehende Kooperationen.

5 Fortschritte bei anderen Stellen

Während des Berichtszeitraums sind dem Zuwendungsempfänger keine für die Durchführung des Projekts relevanten Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt geworden. Der Stand von Wissenschaft und Technik wurde auf Basis der Informationsrecherche nach Nr. 2.1 BNBest-BMBF 98 in regelmäßigen Abständen ermittelt.

6 Öffentlichkeitsarbeit und Verwertung wissenschaftlicher Ergebnisse

Als Veranstaltungen vor Fachpublikum zur Validierung des Gesamtkonzepts waren Early Demonstrator und Final Demonstrator fest im Projektplan verankert. Diese beiden Veranstaltungen sind in Abschnitt eingehend beschrieben.

Weiterhin wurden Konzept und Forschungsergebnisse des LARUS Projekts anhand von Vorträgen und Publikationen auf nationalen und internationalen wissenschaftlichen Konferenzen vorgestellt. Im Rahmen des Final Demonstrators wurde zudem ein Film über die Projektergebnisse erstellt und veröffentlicht sowie eine Pressemitteilung verfasst. Im Folgenden werden wissenschaftliche Veröffentlichungen und Vorträge vor Fachpublikum sowie die Resonanz auf die Öffentlichkeitsarbeit vorgestellt.

6.1 Vorträge auf Fachveranstaltungen

Die TU Dortmund hat die Ergebnisse des LARUS Projekts auf sechs Veranstaltungen einem Fachpublikum zugänglich gemacht. Dabei wurden einerseits Ergebnisse des Teilvorhabens präsentiert, aber auch in der Rolle des Koordinators der Gesamtverbund repräsentiert.

6.1.1 Auftaktveranstaltung zu den Förderrichtlinien „Zivile Sicherheit – Innovative Rettungs- und Sicherheitssysteme“, Berlin, 25.10.2016

Die Auftaktveranstaltung war ein zweitägiges Ereignis, in dem im Rahmen der Förderrichtlinien „Zivile Sicherheit - Innovative Rettungs- und Sicherheitssysteme“ geförderte Projekte ihre Vorhaben vorstellen konnten. Hier wurde das LARUS-Projekt vertreten durch den Koordinator TU Dortmund einem Fachpublikum aus Vertretern von Behörden und Ministerien sowie den Projektpartnern aus den weiteren eingeladenen Forschungsverbänden im Bereich zivile Sicherheit präsentiert.

6.1.2 UAS-INSYS Netzwerktreffen, Dortmund, 21.02.2017

Das „UAS-INSYS - Innovationsnetzwerk Systemtechnologien für zivile unbemannte Luftfahrtsysteme“ bietet eine Plattform für Austausch und Zusammenarbeit zwischen

Unternehmen, Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen und Branchenverbänden im UAS-Bereich. Im Februar 2017 wurde das 16. regelmäßige Treffen des Netzwerks am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der TU Dortmund abgehalten. Im Rahmen der Sitzung hat die TU Dortmund das LARUS-Projekt den Netzwerkpartnern in einem Fachvortrag vorgestellt.

6.1.3 Wireless Days Conference, Porto, 31.03.2017

Die Wireless Days 2017 waren eine dreitägige wissenschaftliche Konferenz mit einem Fokus auf theoretischen und praktischen Aspekten drahtloser Netzwerke. Hier war die TU Dortmund im Rahmen eines von insgesamt drei Keynote-Vorträgen vertreten. Unter dem Titel „Wireless Networking for Cyber Physical Systems – Providing Reliable Connectivity in Challenging Environments“ wurde die drahtlose Kommunikation mit Cyber-Physikalischen Systemen in harschen Umgebungen behandelt. Hierbei wurde das LARUS-Projekt und seine spezifischen Herausforderungen in der Kommunikation mit unbemannten Luftfahrtsystemen über große Distanzen im maritimen Bereich veranschaulicht.

6.1.4 IEEE Conference on Standards for Communications & Networking, Helsinki, 18.09.2017

Die IEEE CSCN 2017 war eine dreitägige wissenschaftliche Konferenz mit dem Hauptthema Normung und Standardisierung in Kommunikationsnetzen und verwandten Bereichen. Die Zielgruppe der Konferenz schließt Wissenschaftler sowie Normungsexperten aus dem akademischen Bereich, aus der Industrie und aus Normungsgremien ein. Hier war die TU Dortmund an der Podiumsdiskussion „Toward the Future of IoT with Drones“ beteiligt, in der unter anderem die Rolle von zuverlässiger Kommunikation für vernetzte UAVs mit Such- und Rettungsaufgaben behandelt wurde. Das LARUS Projekt diente dabei als Beispiel für eines dieser thematisierten Systeme und wurde im Rahmen eines Keynote-Vortrags durch die TU Dortmund vorgestellt. Der Beitrag weckte das Interesse der Verantwortlichen im IEEE und es ergab sich im Nachgang, dass das Thema in einem eingeladenen Online-Artikel im „IEEE Standards“ Fachmagazin aufgegriffen werden konnte [11], was die Reichweite nochmals deutlich erhöht.

6.1.5 BMBF-Innovationsforum "Zivile Sicherheit", Berlin, 19.07.2018

Das Innovationsforum war eine zweitägige Konferenz des Bundesministeriums für Bildung und Forschung zum Rahmenprogramm „Forschung für die zivile Sicherheit“. Dort wurde das LARUS-Projekt in einem Vortrag sowie an einem Stand auf der „Ausstellung zu Praxislösungen“ (siehe Abbildung 52) präsentiert. Im Vortrag gab die TU

Dortmund im Namen des Gesamtverbands eine Übersicht des Vorhabens und stellte die aktuellen Ergebnisse vom Projektmeilenstein und Early Demonstrator vor.



Abbildung 52: Besuch des Staatssekretärs Thomas Rachel auf dem Stand anlässlich des BMBF-Innovationsforums "Zivile Sicherheit" 2018 in Berlin.

6.1.6 Maritime Research Forum, Hamburg, 04.09.2018

Das Maritime Research Forum wird vom Deutschen Maritimen Zentrum im Rahmen der größten maritimen Fachmesse „SMM“ veranstaltet. Das Forum bietet eine Plattform zur Vorstellung von Forschungsprojekten mit maritimer Ausrichtung. Hauptpunkt der Vorstellung von LARUS auf dem Forum war ein 45-minütiger Vortrag durch die TU Dortmund, der für alle Teilnehmer der Messe offen war. Begleitend dazu wurde das UAV ausgestellt sowie das Projekt als Stand und über Poster repräsentiert (siehe Abbildung 53).

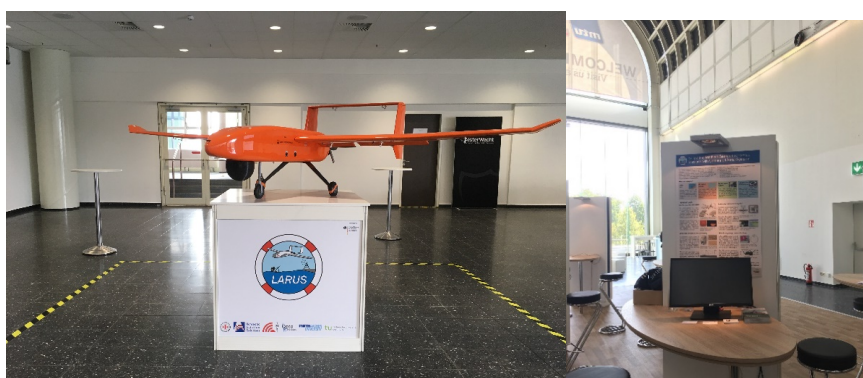


Abbildung 53: Vorstellung des Projekts auf der SMM 2018, UAV und Stand.

6.2 Wissenschaftliche Veröffentlichungen und Publikationen

Die im Rahmen des LARUS Projekts erfolgreich gelösten technischen Herausforderungen wurden wissenschaftlich aufbereitet, Modelle und Thesen abgeleitet und diese im Rahmen der experimentellen Pilotversuche validiert. Daraus ist eine Viel-

zahl von exzellenten Publikationen entstanden, die auf renommierten nationalen sowie internationalen Fachkonferenzen vorgestellt wurden. So konnten Ergebnisse mit einer großen Anzahl an Wissenschaftlern auf international führenden Konferenzen wie der IEEE VTC 2018, aber auch sehr spezifisch in Expertenrunden auf spezifischen Workshops wie dem „Workshop on ICT Systems for Public Protection and Risk Reduction 2019“ diskutiert werden.

Die folgenden Publikationen wurden im Rahmen des LARUS Projektes durch die TU Dortmund veröffentlicht:

- [1] J. Güldenring, L. Koring, P. Gorczak and C. Wietfeld, “Heterogeneous Multilink Aggregation for Reliable UAV Communication in Maritime Search and Rescue Missions,” in *2019 International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, 2019.
- [2] K. Heimann, J. Tiemann, S. Boecker and C. Wietfeld, “On the potential of 5G mmwave pencil beam antennas for UAV communications: An experimental evaluation,” in *WSA 2018; 22nd International ITG Workshop on Smart Antennas*, 2018.
- [3] K. Heimann, J. Tiemann, D. Yolchyan and C. Wietfeld, “Experimental 5G mmWave Beam Tracking Testbed for Evaluation of Vehicular Communications,” in *2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF)*, 2019.
- [4] K. Heimann, P. Gorczak, C. Bektas, F. Girke and C. Wietfeld, “Software–Defined End–to–End Evaluation Platform for Quality of Service in Non–Standalone 5G Systems,” in *2019 IEEE International Systems Conference (SysCon)*, 2019.
- [5] P. Gorczak, C. Bektas, F. Kurtz, T. Lübcke and C. Wietfeld, “Robust Cellular Communications for Unmanned Aerial Vehicles in Maritime Search and Rescue,” in *2019 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, 2019.
- [6] D. Behnke, M. Priebe, S. Rohde, K. Heimann and C. Wietfeld, “ScalaNC — Scalable heterogeneous link aggregation enabled by Network Coding,” in *2017 IEEE 13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, 2017.
- [7] M. Patchou, B. Sliwa and C. Wietfeld, “Unmanned Aerial Vehicles in Logistics: Efficiency Gains and Communication Performance of Hybrid Combinations of Ground and Aerial Vehicles,” in *2019 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, 2019.

- [8] J. Güldenring, P. Gorczak, F. Eckermann, M. Patchou, J. Tiemann, F. Kurtz and C. Wietfeld, "Reliable Long-Range Multi-Link Communication for Unmanned Search and Rescue Aircraft Systems in Beyond Visual Line of Sight Operation," *Drones*, vol. 4, p. 16, 5 2020.
- [9] F. Eckermann, P. Gorczak and C. Wietfeld, "tinyLTE: Lightweight, Ad Hoc Deployable Cellular Network for Vehicular Communication," in *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2018.
- [10] J. Tiemann, O. Feldmeier and C. Wietfeld, "Supporting Maritime Search and Rescue Missions Through UAS-Based Wireless Localization," in *2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2018.
- [11] C. Wietfeld, „Networked Rescue Robotics: Standards Pave the Way From Successful Prototypes to Sustainable Deployments,“ *IEEE Standards University E-Magazine*, 14 12 2017.

6.3 Videoproduktion

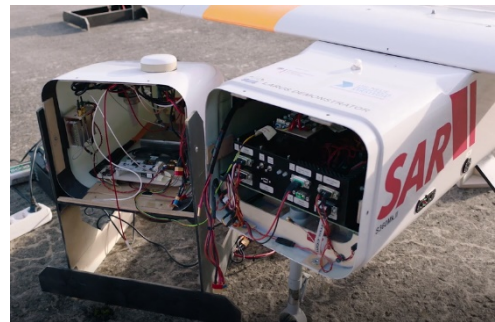
Um die die Ergebnisse auch über die Projektlaufzeit hinaus insbesondere auch aus Anwendersicht zu dokumentieren, wurde in enger Zusammenarbeit mit der DGzRS und den anderen Konsortialpartnern ein Video konzipiert und produzieren lassen.

Das Video beschreibt das Konzept von LARUS und beleuchtet sowohl Teilaspekte als auch den gesamten Lösungsansatz. Zudem demonstriert es den Einsatz des UAS im Rahmen eines Such-und-Rettungseinsatzes.

Abbildung 54 zeigt Ausschnitte aus der veröffentlichten Videoproduktion. Das Video ist über die Plattform YouTube öffentlich zugänglich und kann über den folgenden Link abgerufen werden:

<https://www.youtube.com/watch?v=kJ9ABk8Rr4M>

Alarmierung und Bereitmachen des LARUS Systems für die Übungsmission



Start des LARUS Flugsystems, Suche nach der vermissten Person, Übertragung des Lagebildes



Einsatz des Rettungsboots mit Unterstützung des LARUS Systems



Abbildung 54: Ausschnitte aus der Videoproduktion.

6.4 Webauftritt

Ein wichtiger Bestandteil der Öffentlichkeitsarbeit waren und sind der Aufbau und die Pflege einer Website. Im Rahmen des LARUS Projekts hat die TU Dortmund den Webauftritt eingerichtet und aktuell gehalten. So wurden beispielsweise die Meilensteine, Pressemitteilungen auf der Website informiert.



Abbildung 55: Screenshot der LARUS Website.

6.5 Medienecho

Im Rahmen des **Early Demonstrators** wurden Newseinträge durch die Projektpartner veröffentlicht. Diese wurden von einigen lokalen und maritimen Medien in Onlineberichten aufgegriffen.

- Kreiszeitung.de. Elektronische Möwe fliegt über den Flugplatz. 03.05.2018 [Zugriff am 08.06.2020]. Verfügbar unter: <https://www.kreiszeitung.de/lokales/rotenburg/rotenburg-ort120515/test-early-demonstrator-drohne-rotenburg-elektronische-moewe-fliegt-ueber-flugplatz-9835994.html>
- SegelReporter. Hilfe aus der Luft. 07.05.2018 [Zugriff am 08.06.2020]. Verfügbar unter: <https://segelreporter.com/panorama/dgzs-erfolgreicher-testflug-eines-unbemannten-luftfahrtsystems-fuer-den-einsatz-im-seenotfall/>
- Hamburger Abendblatt. Hightech-Drohne soll künftig Menschenleben retten. 08.05.2018 [Zugriff am 08.06.2020]. Verfügbar unter:

<https://www.abendblatt.de/region/niedersachsen/article214233265/Diese-High-tech-Drohne-soll-kuenftig-Menschenleben-retten.html>

- SVN solovelanet. Arrivano i droni per il salvataggio. 08.05.2018 [Zugriff am 08.06.2020]. Verfügbar unter: https://www.solovela.net/droni/articoli?pag=articoli_dettaglio&id=1349399

Nach Abschluss des **Final Demonstrators** hat das Konsortium eine **gemeinsame Pressemitteilung** verfasst, die über soziale Medien veröffentlicht sowie von einer Presseagentur aufgegriffen wurde. Die Mitteilung konnte eine gute mediale Resonanz erzeugen. Berichte zum Projekt wurden sowohl in allgemeinen und fachlich ausgerichteten Publikationen über Online, Video und Print veröffentlicht. Darunter waren auch zwei Fernsehbeiträge von WELT und SAT1 (siehe auch Abbildung 56).

- DRONES. Projekt LARUS. 22.11.2019 [Zugriff am 08.06.2020]. Verfügbar unter: <https://www.drones-magazin.de/news/projekt-larus/>
- Hamburger Abendblatt. DGzRS testet Seenotrettungs-Drohne über der Ostsee. 22.11.2019 [Zugriff am 08.06.2020]. Verfügbar unter: <https://www.abendblatt.de/region/mecklenburg-vorpommern/article227718231/DGzRS-testet-Seenotrettungs-Drohne-ueber-der-Ostsee.html>
- HANSA International Maritime Journal. Unbemannte Flugobjekte im Einsatz für deutsche Seenotretter. 22.11.2019 [Zugriff am 08.06.2020]. Verfügbar unter: <https://hansa-online.de/2019/11/featured/140333/unbemannte-flugobjekte-im-einsatz-fuer-deutsche-seenotretter>
- Heise online. Bundesregierung: Seenotrettungsdrohne Larus erfolgreich getestet. 29.01.2020 [Zugriff am 08.06.2020]. Verfügbar unter: <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Bundesregierung-Seenotrettungsdrohne-Larus-erfolgreich-getestet-4649040.html>
- Heise online. Kleine Drohnen sollen Bundespolizei auf See helfen. 01.06.2020 [Zugriff am 08.06.2020]. Verfügbar unter: <https://www.heise.de/news/Kleine-Drohnen-sollen-Bundespolizei-auf-See-helfen-4770691.html>
- Innovations-report Seenotretter testen über der Ostsee erfolgreich unbemanntes Luftfahrtsystem für Seenotfälle. 22.11.2019 [Zugriff am 08.06.2020]. Verfügbar unter: <https://www.innovations-report.de/html/berichte/verkehr-logistik/seenotretter-testen-ueber-der-ostsee-erfolgreich-unbemanntes-luftfahrtsystem-fuer-seenotfaelle.html>
- Nordkurier. Seenotretter testen Drohne zwischen Usedom und Rügen. 22.11.2019 [Zugriff am 08.06.2020]. Verfügbar unter: <https://www.nordkurier.de/mecklenburg-vorpommern/seenotretter-testen-drohne-zwischen-usedom-und-ruegen-2237543011.html>
- WELT. Diese Drohne könnte die Seenotrettung revolutionieren (Video). 01.12.2019 [Zugriff am 08.06.2020]. Verfügbar unter: <https://www.welt.de/vermischtes/video203956494/Diese-Drohne-koennte-die-Seenotrettung-revolutionieren-Video.html>
- WELT. Flugsystem zur Rettung aus Seenot erfolgreich getestet. 22.11.2019 [Zugriff am 08.06.2020]. Verfügbar unter: <https://www.welt.de/regionales/mecklenburg-vorpommern/article203730300/Flugsystem-zur-Rettung-aus-Seenot-erfolgreich-getestet.html>
- rettungsdienst.de. Seenotretter testen unbemanntes Luftfahrtsystem. 22.11.2019 [Zugriff am 08.06.2020]. Verfügbar unter: <https://www.rettungsdienst.de/news/seenotretter-testen-unbemanntes-luftfahrtsystem-61724>

- RTL.de. Flugsystem zur Rettung aus Seenot erfolgreich getestet. 22.11.2019 [Zugriff am 08.06.2020]. Verfügbar unter: <https://www.rtl.de/cms/flugsystem-zur-rettung-aus-seenot-erfolgreich-getestet-4441726.html>
- Sat.1 regional. Seenotrettung: Per Drohne Menschenleben retten (Video). 12.12.2019 22.11.2019 [Zugriff am 08.06.2020]. Verfügbar unter: <https://www.sat1regional.de/seenotrettung-per.-drohne-leben-retten/>
- Schiffsjournal. Seenotretter testen erfolgreich unbemanntes Luftfahrtsystem für Seenotfälle. 22.11.2019 [Zugriff am 08.06.2020]. Verfügbar unter: <https://www.schiffsjournal.de/seenotretter-testen-erfolgreich-unbemanntes-luftfahrtsystem-fuer-seenotfaelle/>
- SegelReporter: DGzRS-Drohne. 22.11.2019 [Zugriff am 08.06.2020]. Verfügbar unter: <https://segelreporter.com/panorama/dgzrs-seenotretter-testen-unbemanntes-luftfahrtsystem-fuer-seenotfaelle-ueber-der-ostsee/>
- Süddeutsche Zeitung. Flugsystem zur Rettung aus Seenot erfolgreich getestet. 22.11.2019 [Zugriff am 08.06.2020]. Verfügbar unter: <https://www.sueddeutsche.de/panorama/katastrophenschutz-flugsystem-zur-rettung-aus-seenot-erfolgreich-getestet-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-191122-99-839499>
- t-online.de. Flugsystem zur Rettung aus Seenot erfolgreich getestet. 22.11.2019 [Zugriff am 08.06.2020]. Verfügbar unter: https://www.t-online.de/region/id_86860102/flugsystem-zur-rettung-aus-seenot-erfolgreich-getestet.html

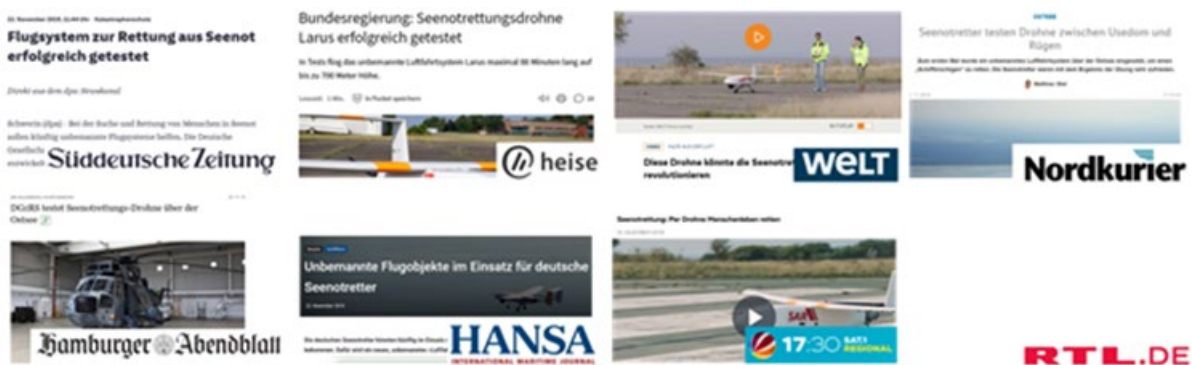


Abbildung 56: Beispielhafte Presseberichterstattung.

Abkürzungsverzeichnis

ADS-B	Automatic Dependent Surveillance - Broadcast, 2	MMSI	Maritime Mobile Service Identity, 3
AIS-SART	Automatic Identification System – Search And Rescue Transmitter, 31	MPTCP	Multi-Path Transport Control Protocol, 23
AP	Arbeitspaket, 1	MRCC	Maritime Rescue Coordination Centre, 2
BMBF	Bundesministeriums für Bildung und Forschung, 38	NAVTEX	NAVigational TEXt Messages, 37
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 3	NLLS	Non-Linear Least-Squares, 33
COTS	Commercial-off-the-shelf, 9	OSC	On-Scene-Coordinator, 52
CSCN	Conference on Standards for Communications & Networking, 55	PRACH	Physical Random Access Channel (LTE), 18
DVB-T	Digital Video Broadcasting – Terrestrial, 50	ROS	Robot Operating System, 12
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit, 10	RSS	Received Signal Strength, 31
EPIRB	Emergency position-Indicating radiobeacon, 31	SAR	Search And Rescue, 11
FLARM	Kollisionswarngerät für Leichtflugzeuge, 8	SAREx	Search and Rescue Exercise, 39
GNSS	Global Navigation Satellite System, 31	SDR	Software-Defined Radio, 2
GPS	Global Positioning System, 10	SMM	Shipbuilding, Machinery & Marine Technology, 56
HIL	Hardware-in-the-Loop, 23	TCP/IP	Transport Control Protocol / Internet Protocol, 9
HTTP	Hyper Text Transfer Protocol, 6	TDL	Tapped Delay Line, 16
ICT	Information & Communication Technology, 57	UAS	Unmanned Aerial System, 1
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, 55	UAV	Unmanned Aerial Vehicle, 2
LARUS	Lageunterstützung bei Seenoteinsätzen durch unbemannte Luftfahrtsysteme, 1	USB	Universal Serial Bus, 9
LoRa	Long Range, 6	V2X	Vehicle-to-X (LTE), 23
MCS	Modulation & Coding Scheme (LTE), 21	VTC	Vehicular Technology Conference, 57
		WLAN	Wireless Local Area Network, 6
		WLS	Weighted Least-Squares, 33