

KONZEPTION UND EVALUIERUNG EINER KOMMUNIKATIONSINFRASTRUKTUR FÜR BEYOND-LINE-OF-SIGHT FLUGVERSUCHE VON UNBEMANNTEN FLUGGERÄTEN

C. Ben, N. Voget, D. Moormann

Institut und Lehrstuhl für Flugsystemdynamik, RWTH Aachen University,
Wüllnerstrasse 7, 52062 Aachen, Deutschland

Zusammenfassung

Das Interesse an unbemannten Fluggeräten für zivile Einsatzbereiche wie beispielsweise Katastrophenschutz, die eine große Reichweite innerhalb einer Mission zurücklegen können, ist weltweit groß. Insbesondere die (Kommunikations-) Systemarchitektur und die Flugführung von kleineren unbemannten Fluggeräten bis 5 kg außerhalb der Sichtweite (engl. Beyond-Line-of-Sight (im Folgenden: BLOS)) erweisen sich als aktuelle Forschungsschwerpunkte.

Im Rahmen unterschiedlicher wissenschaftlicher Projekte wurde eine terrestrische BLOS-Kommunikationsinfrastruktur konzipiert und prototypisch umgesetzt, die es erlaubt flugwissenschaftliche Experimente mit einem unbemannten Fluggerät außerhalb der Sichtweite eines Operateurs durchzuführen. In diesem wissenschaftlichen Beitrag soll die technische Problematik des Steuerns eines unbemannten Fluggerätes außerhalb der Sichtweite mit kontinuierlicher Funkverbindung adressiert und gelöst werden. Insbesondere die technische Umsetzung dieses Projektes im Hinblick auf Kommunikationsnetzwerk, -schnittstellen sowie eine redundante und robuste Flugführung mittels einer mobilen Bodenstation stellen eine Herausforderung dar.

Vorgestellt werden das Lastenheft, das zur Auswahl der Kommunikationsmodule und Netzwerkarchitektur führte, die Netzwerkteilnehmer des prototypischen Netzwerkes sowie eine Evaluierung der Kommunikationsmodule als auch erste Erfahrungen, die sich im praktischen Flugbetrieb ergaben.

NOMENKLATUR

BLOS	Beyond Line of Sight
dBm	Leistungspegel mit der Bezugsgröße 1 mW
I ² C	Inter-Integrated Circuit
ISM	Industrial, Scientific and Medical
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HSPA	High Speed Packet Access
LoRa	Long Range Radio SK-iM880A
LTE	Long Term Evolution
MHz	Megahertz
NED	North-East-Down
SRD	Short-Range-Devices
SPI	Serial Peripheral Interface
THz	Terahertz
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USB	Universal Serial Bus

1. EINLEITUNG

Im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte wird am Institut für Flugsystemdynamik der RWTH Aachen das Potential sowie die Machbarkeit einer terrestrisch basierten Beyond-Line-of-Sight-Missionssteuerung von unterschiedlichen unbemannten Fluggeräten untersucht. Insbesondere bei der Informationsgewinnung innerhalb von Katastrophengebieten bietet diese Kommunikationsart eine für die operierenden Einsatzkräfte sichere und schnelle Möglichkeit, eine Situationseinschätzung der Krisenlage zu ermitteln. Neben der Fluggeräteentwicklung erweist sich die Kommunikationsinfrastruktur als besondere Herausforderung.

Da sich das Fluggerät im Einsatz außerhalb der Sichtweite des Flugzeugführers befindet, sind besondere regulatorische Sorgfaltspflichten für den Flugzeugführer bei der Erteilung der Aufstiegsgenehmigung auferlegt worden. Insbesondere die Kommunikationsinfrastruktur zwischen dem Fluggerät und dem Bediener innerhalb einer mobilen Bodenstation stellt dabei einen vitalen Aspekt zum Gelingen der Flugmission dar. Diese Arbeit soll dabei einen Lösungsansatz für eine terrestrisch basierte BLOS-Kommunikationsinfrastruktur zur Durchführung von flugwissenschaftlichen Experimenten präsentieren, der auf eine Verwendung innerhalb von Forschungseinrichtungen abzielt.

2. KOMMUNIKATIONSMODULAUSWAHL

Für die Konzeption und den Aufbau einer Kommunikationsinfrastruktur für wissenschaftliche BLOS-Flugversuche von unbemannten Fluggeräten sind sowohl szenariospezifische Randbedingungen als auch die Flugführungseigenschaften des verwendeten Fluggerätes entscheidend.

Die szenariospezifischen Randbedingungen können wie folgt nach Wichtigkeit adressiert werden.

Die Kommunikationsarchitektur soll mindestens eine Reichweite von 12,5 km überbrücken. Von höchstem Sicherheitsinteresse ist der Sachverhalt, dass das Fluggerät zu jeder Zeit und Entfernung einen bidirektionalen Funkkontakt mit dem Bediener in der vorhandenen mobilen Bodenstation aufrechterhält, um beispielsweise die Position sicher bestimmen und Steuerbefehle senden zu können. Dies bedeutet zwingend eine redundante Kommunikationsinfrastruktur. Diese Kommunikationsinfrastruktur muss dabei wie das unbemannte Fluggerät unter allen Witterungsbedingungen wie Nebel, Niederschlag und Schneefall funktionsfähig sein.

Darüber hinaus sollte die Kommunikationsinfrastruktur die Fähigkeit besitzen, als Peer-to-Peer-Netzwerk zu agieren, um über die vorhandenen Netzwerkknoten notfalls eine Relayfunktion bereitzustellen [1]. Zusätzlich muss die Kommunikation robust gegenüber Störungen von außen sein, bspw. Amateurfunk.

Weitere begrenzende Randbedingungen sind das Gesamtabfluggewicht von 5 kg, welches ein besonders leichtes Kommunikationsmodul in Kombination mit einem geringen Bauraumvolumen favorisiert, sowie eine geringe elektrische Leistungsaufnahme des Kommunikationsmoduls in Verbindung mit einer ausreichend hohen Datenrate.

Weitergehend muss das Kommunikationsmodul im Zuge der Marktzulassung in Deutschland in einem Frequenzbereich der Allgemeinzulassung operieren, welche seitens der Bundesnetzagentur festgelegt sind. Dadurch muss beim Betrieb dieses Kommunikationsmoduls keine gesonderte Kurzzeitzuteilung in einem bestimmten Frequenzbereich bei der Bundesnetzagentur beantragt werden.

Die Menge und Datenrate der von dem Fluggerät gesendeten Telemetriedaten sowie die vom Bediener gesendeten Steuerbefehle stellen ebenfalls eine fluggerätespezifische Einschränkung dar. Die Größe des Datenpaketes wurde wie folgt bestimmt:

Name	Größe [Byte]
Paketkopf inkl. Prüfsumme	9
Zeit	4
Struct Telemetrie	33
Parameter Steuerkommando	4
Zyklische Redundanzprüfung	4
Summe	54

TAB 1. Aufbau und Größe des Datenpaketes

Das Datenpaket soll mit einer Wiederholfrequenz von 2 Hz an die mobile Bodenstation gesendet werden. Dies ergibt nach nachfolgender Rechnung eine benötigte tatsächliche Datenrate des Kommunikationsmoduls am Fluggerät von 108 Byte / Sekunde.

$$(1) \ 54 \text{ Byte} * 2 \text{ Hz} = 108 \text{ Byte/s}$$

Um zwecks Steuerkommandoübermittlung auch in entgegengesetzte Richtung von mobiler Bodenstation zum Fluggerät senden zu können, müssen zwischen den Sendephasen des Fluggerätes ausreichende Sendepausen eingeplant werden, in der Datenpakete von der Bodenstation gesendet werden können. Im vorliegenden Fall wurde eine Auslastung des Funkkanals von unter 50 % angestrebt. Damit ergibt sich eine benötigte Bandbreite von mindestens 216 Byte / Sekunde.

2.1. Auswahl des Kommunikationsmoduls

Die Auswahl des geeigneten Kommunikationsmoduls erfolgt unter Maßgabe der bereits in Kapitel 1 genannten Randbedingungen. Insbesondere die Witterungsbedingungen stellen einen entscheidenden Beschränkungsfaktor dar. Idealerweise sollte das Kommunikationsmodul innerhalb des Radiowellenfensters der Erdatmosphäre operieren. Das Radiowellenfenster definiert dabei einen Frequenzbereich von 15 MHz bis 1,5 THz, in welchem die elektromagnetische Strahlung nahezu ungehindert die Erdatmosphäre passieren kann [2].

Weitergehend sollte das Kommunikationsmodul zwecks der erwähnten Allgemeinzulassung in Deutschland in den Bereichen der Industrial, Scientific and Medical (ISM) oder Short-Range-Devices (SRD) Bänder operieren. Untersucht man diese Bänder in Bezug auf kommerziell verfügbare Produkte, die innerhalb dieser Bänder die erforderlichen Eigenschaften aufweisen, können drei Bereiche identifiziert werden.

Frequenzbereich [MHz]	Bemerkungen
433,05 – 434,79	SRD-Band, viele zivile Anwendungen (Funkwetterstationen, Amateurfunk etc.) in diesem Bereich, häufige Störungen durch andere Nutzer
446,0 – 446,2	SRD-Band, Aufgeteilt in 12 Kanäle; Sendeleistung auf max. 500 mW beschränkt. Störungen durch andere Nutzer möglich, da Kanäle nicht exklusiv. [3]
863,0 – 870,0	SRD-Band, Bislang relativ gering kommerziell genutzt, Aufteilung in 7 Unterbereiche seitens Bundesnetzagentur, Sendeleistung je nach Kanal auf 10 – 500 mW begrenzt, keine analogen Videoanwendungen gestattet.[4]

TAB 2. Vorstellung der geeigneten SRD-Bänder

Um von Anfang an eine mögliche Beeinflussung der Kommunikationsstrecke durch Dritte zu minimieren, wurde der Frequenzbereich von 863,0 – 870,0 MHz des SRD-Bandes gewählt. Innerhalb dieses Frequenzbandes entschied sich das Institut für Flugsystemdynamik für das kommerziell verfügbare Kommunikationsmodul Long Range Radio SK-iM880A (im Folgenden: LoRa) des Anbieters IMST als zentrales Funkmodul der BLOS-Kommunikationsinfrastruktur.



BILD 1. Das Long Range Radio SK-iM880A inklusive Expansionboard [Quelle: IMST]

Das LoRa-Funkmodul kann laut Herstellerangaben eine Funkstrecke von bis zu 15 km mit einer hohen Datenrate überbrücken. Die variable Adressierung erlaubt unter anderem einen Peer-to-Peer-Betriebsmodus. Die Möglichkeit des Moduls, verschiedene Kanäle innerhalb des 863,0 – 870,0 MHz SRD-Bandes auszuwählen, erlaubt es dem Nutzer das gesetzlich festgelegte SRD-Band im vollen Umfang zu nutzen. Das zusätzlich implementierte Akustische-Oberflächenwellen-Bandpassfilter dämpft die Frequenzen ober- und unterhalb der jeweiligen Grenzfrequenzen stark [5]. Dadurch wird eine Interaktion insbesondere mit dem angrenzenden

Mobilfunkband, beginnend ab 890 MHz, vermieden. Die Filterfunktion ist in Abbildung 2 dargestellt.

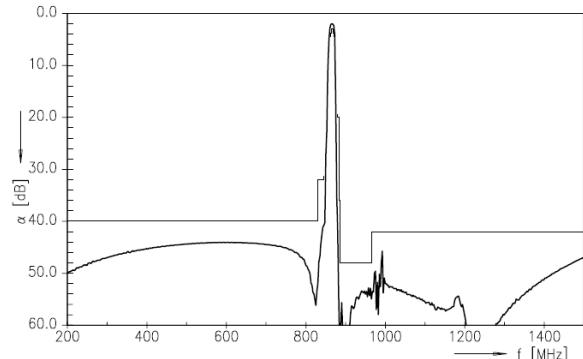


BILD 2. Die Filterfunktion des im LoRa implementierten Akustische-Oberflächenwellen-Bandpassfilters [Quelle: IMST]

Da eine Duty-Cycle-Reglementierung nicht hardwareseitig implementiert ist, gewährleistet es auch eine spätere Verwendung für Flugversuche mit größeren Reichweiten mit einer Kurzzeitzuweisung seitens der Bundesnetzagentur. Gleichzeitig muss der Nutzer diese in seine Anwendungen softwareseitig einbinden. Zusätzlich kann das Funkmodul über eine Vielzahl von Schnittstellen mit zukünftigen Netzteilnehmern verbunden werden.

Die wichtigsten technischen Daten des LoRa-Funkmoduls sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengeführt.

LoRa SK-iM880A	
Frequenzbandabdeckung	863 – 870 MHz (variable Frequenzeinstellung möglich)
Datenrate (Funk)	0,24 – 37,5 kbit/s
Reichweite mit beifügter Antenne	Bis zu 15 km (Herstellerangabe)
Signalbandbreite	125 – 500 kHz
Sendeleistung	Bis +20 dBm (=100 mW)
Spreizfaktor (variabel)	SF7, SF8, SF9, SF10, SF11, SF12
Cyclic Coding Rate	4/5, 4/6, 4/7, 4/8
Empfängerempfindlichkeit	-128 dBm (500 kHz) bis -137 dBm (125 kHz)
Schnittstellen	I ² C, SPI, UART, (USB)
Leistungsaufnahme (Sendemodus)	0,354 W
Modulgewicht	10 g

TAB 3. Technische Daten des LoRa SK-iM880A

Der Spreizfaktor kennzeichnet in der digitalen Informationsübertragung per Funk die Aufteilung der Information durch ein Frequenzspreizverfahren. Durch das Frequenzspreizverfahren wird jedes einzelne Symbol des gewünschten Datenstroms mit einer Folge einzelner Chips (Impulse mit definierter Dauer und Amplitude) multipliziert [6]. Der Spreizfaktor entspricht dabei dem Verhältnis der Anzahl der Chips pro Symbol. Dadurch wird das Nutzdatensignal vergrößert und kodiert. Jeder Netzwerkknoten muss bei dieser Datenübertragung den Spreizfaktor kennen, um die Nachricht wieder dekodieren zu können. Gleichzeitig erhöht sich die in Anspruch genommene Bandbreite, wohingegen die Leistungsdichte des Signals abnimmt. Dies kann dazu genutzt werden, das Signal zu tarnen als auch andere Anwendungen in der gleichen Bandbreite nicht zu stören. Zusätzlich verbessert sich das Signal-Rausch-Verhältnis. Durch die Frequenzspreizung wird somit insgesamt eine größere Robustheit gegenüber Fremdeinflüssen gewährleistet für den Preis einer geringeren Bandbreite. Weiterführende Informationen sind in [6] zu finden.

Die Cyclic Coding Rate bestimmt unmittelbar die Fehlererkennung und Korrektur der übermittelten Telemetriedaten durch einen Überhang der zu übermittelten Telemetriedaten und dient somit unmittelbar der Redundanzsteigerung. Der Wert 4/5 kennzeichnet einen Nutzdatenüberhang von 1,25, während der Wert 4/8 einen Überhang von 2 darstellt.

3. BLOS KOMMUNIKATIONSINFRASTRUKTUR

Innerhalb dieses Kapitels sollen die Funktionsweise der BLOS Kommunikationsinfrastruktur sowie die beiden Netzwerkteilnehmer mobile Bodenstation und Kommunikationsbake vorgestellt werden.

3.1. Funktionsweise

Die Architektur des BLOS-Kommunikationsnetzwerks wurde, ausgehend von der Forderung in Kapitel 2, als ein Peer-to-Peer-Netzwerktyp mit den Teilnehmern Fluggerät, mobiler Bodenstation und Kommunikationsbake mit integrierter Wetterstation konzipiert. Somit wird sichergestellt, dass das Fluggerät mit mindestens einem der beiden Netzwerkpartner in Verbindung stehen kann.

Dabei kommuniziert das Fluggerät mit den Teilnehmern Kommunikationsbake und mobiler Bodenstation in einer ersten Ausbaustufe über das SRD-Band. Darüber hinaus sind die Kommunikationsbake und die mobile Bodenstation über eine redundante Funkstrecke miteinander verbunden. Die redundante Funkstrecke wird sowohl durch die im SRD-Band operierenden LoRa-Funkmodule als auch eine separate Datenlinkanbindung an das öffentliche deutsche Mobilfunknetz realisiert. Die Datenlinkanbindung an das öffentliche Mobilfunknetz besitzt die Fähigkeit, je nach Standort alle verfügbaren Mobilfunkdienste (GSM / GPRS / UMTS / HSPA / LTE) zu nutzen.

Innerhalb der BLOS-Netzwerkarchitektur ist zu beachten, dass die Kommunikationsbake als beidseitig nutzbarer Relayknoten der Telemetrie- und Steuerdaten zwischen der mobilen Bodenstation und dem zu überwachenden Fluggerät verwendet wird. Bild 3 zeigt den prinzipiellen Aufbau des BLOS-Kommunikationsnetzwerkes.

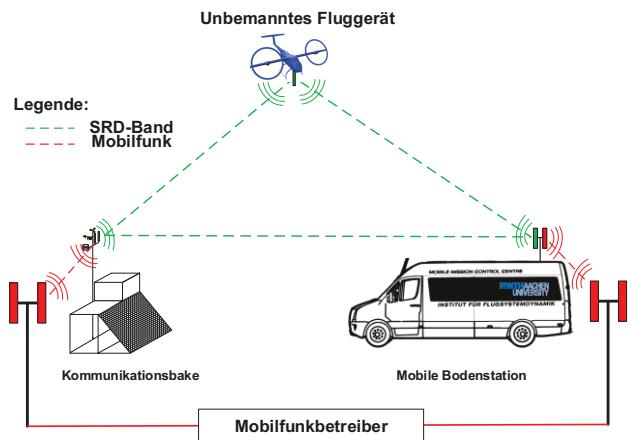


BILD 3. Schematischer Aufbau des BLOS-Kommunikationsnetzwerkes

Die mobile Bodenstation als Netzwerkteilnehmer beherbergt die beiden Operatoren, welche an zwei Arbeitsplätzen wechselseitig die Steuerung und / oder Überwachung des Fluggerätes übernehmen. Beide Arbeitsplätze besitzen für die Nutzung der BLOS-Kommunikationsinfrastruktur jeweils einen eigenen Server mit gleicher Prioritätsstufe. Beide Server sind mit einem Netzwerkknoten auf Basis eines Raspberry Pi verbunden. Dieser dient als zentrale Schnittstelle der Server zum fahrzeugseitigen LoRa-Funkmodul. Parallel dazu sind die beiden Server jeweils an einen Huawei LTE E3276 LTE-Stick angeschlossen, um redundant mit der Kommunikationsbake zu kommunizieren. Diese beherbergt ebenfalls eine Netzwerkschnittstelle in Form eines Raspberry Pi mit angeschlossenem LoRa-Funkmodul und Huawei LTE E3276 LTE-Stick. Dieser Detailaufbau ist in Bild 4 ersichtlich.

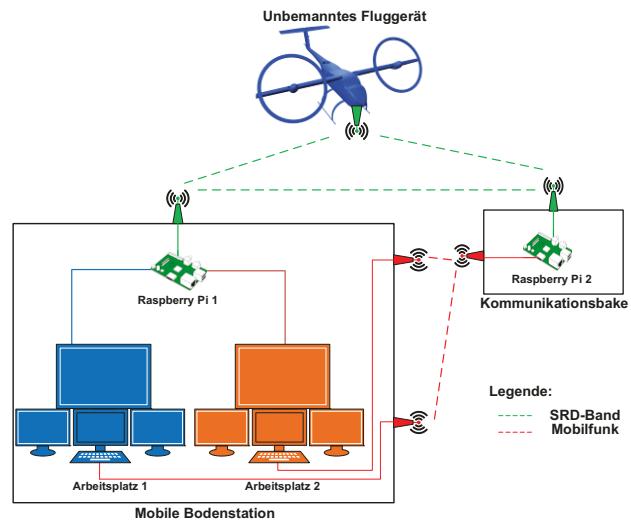


BILD 4. Detaillierter Kommunikationsaufbau des BLOS-Kommunikationsnetzwerkes

Die Übermittlung von Telemetrie- und Steuerungsdaten erfolgt nach folgendem Funktionsprinzip:

Das Fluggerät sendet zusätzlich zu jedem Telemetriedatenpaket den aktuellen Wert eines der sieben Steuerkommandos zu den Netzwerkteilnehmern. Diese Aktualisierung der Steuerkommandos erfolgt dabei zyklisch.

Möchte ein Operateur während des Flugbetriebes ein Steuerkommando senden, schickt er dieses zunächst an die beiden Raspberry Pi Relayknoten. Diese prüfen unabhängig voneinander, welches Steuerkommando mit dem zuletzt empfangenen fluggeräteseitigen Telemetrie-Datenpaket mitgesendet wurde. Bei einem zuletzt empfangenen ungeraden Indexwert sendet der bodenstationsseitige Raspberry Pi 1 über das angeschlossene LoRa-Funkmodul auf dem Fahrzeugdach. Beinhaltet das zuletzt empfangene Telemetrie-Datenpaket einen geraden Indexwert, sendet der in der Kommunikationsbake eingebaute Raspberry Pi 2 das Steuerkommando über das LoRa-Funkmodul an das Fluggerät.

Der jeweilige komplementäre Relayknoten puffert das vom Operateur empfangene Steuerkommandosignal bis zum nächsten Zeitschritt um es ebenfalls zu senden, sofern er nicht vom Fluggerät den betreffenden Parameter mit dem neuen Wert als Bestätigung erhalten hat.

Das Fluggerät quittiert den erfolgreichen Empfang der neuen Steuerungsdaten mit dem Senden des aktualisierten Parameters im Anhang des nächsten Telemetrie-Datenpaketes. Anschließend startet der Zyklus der Übertragung der Telemetrie-Datenpakete ab dem erfolgreich übertragenden Wert.

Durch diese Übertragungslogik wird verhindert, dass beide Funkteilnehmer, namentlich mobile Bodenstation sowie Kommunikationsbake, gleichzeitig Daten an das überwachte Fluggerät senden und damit die Übertragung des jeweils anderen Netzwerkteilnehmers stören. Zusätzlich wird mit der Quittierungsart des Fluggerätes für den Operateur eine einfache und eindeutige Bestätigung geschaffen.

Die Übertragung der Wetterdaten von der Kommunikationsbake zur mobilen Bodenstation erfolgt ausschließlich über die separate Datenlinkanbindung an das öffentliche deutsche Mobilfunknetz. Diese nicht redundante Vorgehensweise soll eine unnötige Störung der LoRa-Funkverbindung zwischen Fluggerät und Kommunikationsbake respektive mobiler Bodenstation von vornherein ausschließen.

3.2. Mobile Bodenstation

Das Institut entwickelte im Rahmen des deutsch-französischen Forschungsprojektes „ANCHORS“ eine mobile Bodenstation auf Basis eines VW Crafters. Die Bodenstation besteht aus zwei redundanten Arbeitsplätzen mit jeweils vier Monitoren zur Darstellung der eigens entwickelten Software zur Flugführung und Lageeinschätzung. Beide Arbeitsplätze arbeiten jeweils mit einem eigenen Personal Computer, welche untereinander vernetzt sind. Beide Arbeitsplätze verfügen über eine redundante Stromeinspeisung von außen. Zusätzlich ist die Bodenstation mit einer zusätzlichen unterbrechungsfreien Stromversorgung ausgestattet, um im Notfall während einer Pufferzeit vollkommen autark von der Außenwelt das Fluggerät sicher steuern und landen zu können.

Beide Arbeitsplätze sind sowohl von der Hard- als auch der Software vollständig redundant, so dass bei Ausfall eines der beiden Arbeitsplätze der jeweilige andere Arbeitsplatz die Aufgaben des anderen zusätzlich zu den eigenen Aufgaben übernehmen kann. Beide Arbeitsplätze verfügen über separate Anbindungen an die jeweiligen Relayknoten.



BILD 5. Innenraum der mobilen Bodenstation

Darüber hinaus befindet sich auf dem Fahrzeugdach neben dem Antennenausleger eine Wetterstation des Typs WMR 300 des Herstellers Oregon Scientific, um am jeweiligen Einsatzort der Bodenstation verlässliche Echtzeitdaten der Wetterbedingungen unabhängig von anderen Diensten erhalten zu können.

3.3. Aufbau der Kommunikationsbake

Die Kommunikationsbake besteht aus den folgenden vier Teilbereichen:

1. Serverknoten
2. Kommunikationsmodule-Deck
3. Wetterstation
4. Energieversorgung

Der Serverknoten besteht, ebenso wie der Serverknoten in der mobilen Bodenstation, aus einer Debian Distribution der Version Wheezy ausgeführt auf einem Raspberry Pi. Dieser ist ebenfalls wie sein Pendant in der mobilen Bodenstation redundant an das LoRa-Funkmodul sowie einen Huawei LTE E3276 LTE-Stick angebunden. Daneben wurde eine Wetterstation vom Typ WH1080 des Herstellers Froggit eingebunden, um die Wetterbedingungen am Aufstellort der Kommunikationsbake mittels einer eigenen Software loggen und an die Bodenstation senden zu können. Die Übermittlung der Wetterdaten an die mobile Bodenstation geschieht exklusiv über die Mobilfunk-Datenverbindung. Dies beugt einem möglichen Engpass in der SRD-Band-Kommunikation vor.

Die Energieversorgung der verschiedenen elektrischen Verbraucher erfolgt autark über einen integrierten Solarakkumulator mit einer Kapazität von 100 Ah. Dieser Akkumulator wird mittels eines Photovoltaikmoduls mit angeschlossenem Laderegler bei Tageslicht geladen. Die Kapazität des Solarakkumulators ist dabei so gewählt worden, dass die Kommunikationsbake selbst bei Versagen des Photovoltaikmoduls bei vollständig geladenem Akkumulator den operativen Betrieb für ca. 125 Stunden gewährleisten kann. Auf nachfolgender Seite ist die tatsächlich genutzte Kommunikationsbake abgebildet.



BILD 6. Kommunikationsbake (Frontansicht)

4. EVALUIERUNG / VERSUCHSERGEBNISSE

Zur Evaluierung der konzipierten BLOS-Kommunikationsinfrastruktur wurde eine umfangreiche LoRa-Funkmodul Versuchskampagne in der Region Kerpen-Buir Vettweiß, Nordrhein-Westfalen, durchgeführt. Diese Region eignet sich gut für Reichweitentests, da sie großflächig kaum Erhebungen aufweist, die prinzipiell die Übertragung durch Reflexionen oder Abschattungen stören könnten [7]. Auch ist die Region innerhalb des Messareals mit einer homogenen und flachen Steigung gegenüber der Startposition gekennzeichnet, siehe Tabelle 4.

Zusätzlich ist die Bevölkerungsdichte in dieser Region aufgrund eines hohen Anteils landwirtschaftlicher Nutzfläche gering, sodass der Fremdeinfluss Dritter (bspw. Amateurfunk) von Beginn an verringert werden kann. Der mehrtägige Versuch wurde wie folgt konzipiert:

Ein unbemanntes Fluggerät wurde auf einer konstanten Flughöhe von 60 m über einer definierten Startposition im Schwebemodus gehalten. Die mobile Bodenstation hingegen entfernte sich vom Startpunkt und führte bei festen Entfernungsmesspunkten Messungen durch. Die Entfernungsmesspunkte sind aufgrund der bedingten Geländetauglichkeit des Fahrzeugs nicht vollständig gleichmäßig gestreut. Tabelle 4 zeigt den jeweiligen Höhenunterschied der mobilen Bodenstation im Messpunkt zur Startposition.

Entfernung [km]	Höhenunterschied [m]
1	7
2,4	15,2
5	12
7,5	36,3
10	38
12,8	63

TAB 4. Entfernungsmesspunkte mit jeweiligem Höhenunterschied der mobilen Bodenstation zur Startposition

Das LoRa-Funkmodul wurde an das unbemannte Fluggerät als modulare wetterfeste Nutzlast ausgestattet, wie in Bild 7 dargestellt.



BILD 7. Das unbemannte Fluggerät mit angebautem LoRa-Funkmodul (weiß)

Am Fahrzeugdach der mobilen Bodenstation wurde während der Messkampagne ein LoRa-Demokit-Board an einem Antennenausleger versehen.

Das an der mobilen Bodenstation befestigte LoRa-Demokit-Board diente während der Versuche als Sender, während das am Fluggerät befindliche LoRa als Empfänger fungierte. Der Netzwerkbetrieb wurde so konfiguriert, dass das Empfangs-LoRa die zuvor erhaltenen Daten wieder an die mobile Bodenstation zurücksendete.

An jedem Entfernungsmesspunkt wurden Messungen mit verschiedenen Parametervariationen für das LoRa-Netzwerk durchgeführt. Als feste Sendepaketparameter wurden gesetzt:

- Sendepaketgröße: 60 Byte
- Anzahl der gesendeten Pakete: 1000

Die variierten Einstellparameter sind in nachfolgender Tabelle mit ihrem jeweiligen Variationsbereich aufgeführt:

Name	Werte
Trägerfrequenz	863,062 – 869,937 MHz
Signalbandbreite	125, 250 und 500 kHz
Spreizfaktoren	SF7, SF8, SF9, SF10
Cyclic Coding Rate	4/5 und 4/6

TAB 5. Parameter für Entfernungsmessungen

Um einen Einblick in die Empfangsqualität der LoRa-Funkmodule zu geben, sollen beispielhaft in Bild 8 die geplotteten Messergebnisse der Empfangsleistungen der mobilen Bodenstation über die untersuchten Entfernungen diskutiert werden. Die gewählten Parameter sind für die jeweilige Entfernung homogen gesetzt zu:

- Frequenz: 867,250 MHz
- Bandbreite: 125 kHz
- Sendeleistung: +17 dBm
- Spreizfaktor: SF7
- Cyclic Coding Rate: 4/6

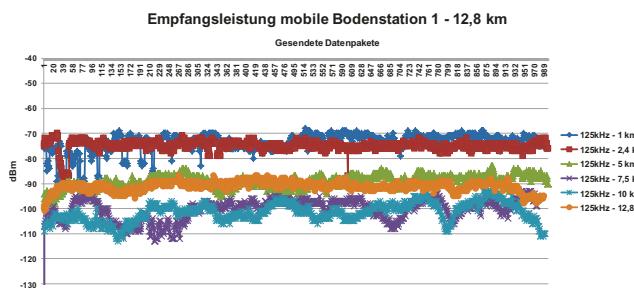


BILD 8. Darstellung der Empfangsleistung in unterschiedlichen Messentfernungen

Es ist deutlich erkennbar, dass die Empfangsleistung mit zunehmendem Abstand schlechter wird, jedoch auch bei einem Abstand von 12,8 km und insgesamt 63 m Höhenunterschied deutlich über der Schwelle von -137 dBm liegt. Die Dämpfungsunterschiede zwischen der 12,8 km Messung und den Messungen bei 7,5 km und 10 km sind durch einen Höhenunterschied an den jeweiligen Messpunkten erklärbar. Dieser Höhenunterschied führt dazu, dass sich die mobile Bodenstation und das unbemannte Fluggerät auf einer nahezu gleichen Höhe über der Startposition befinden und die Funkwellen vollständig ungestört von jeglichen Hindernissen die mobile Bodenstation erreichen.

Zugleich zeigte sich beim Vergleich der unterschiedlichen Bandbreiten in den jeweiligen Messpunkten eine deutliche Signalsteigerung bei der Verwendung von 125 kHz als Bandbreite. Dies lässt sich zurückführen auf die durch eine schmale Bandbreite bedingte hohe Leistungsdichte des Signals. Eine höhere Bandbreite impliziert eine schwächere Leistungsdichte eines Signals. Dieser Sachverhalt ist in Bild 9 dargestellt.

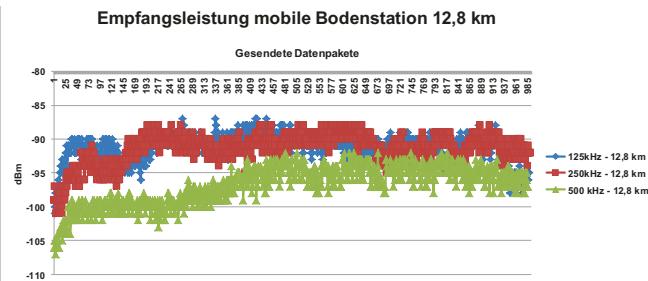


BILD 9. Empfangsleistung bei verschiedenen Bandbreiten bei einer Distanz von 12,8 km

Parallel zu der Empfangsleistung wurde die Paketfehlerrate untersucht. Es zeigt sich, dass eine geringe Bandbreite von 125 kHz eine deutlich geringere Paketfehlerrate gegenüber den höheren Bandweitenmodulationen von 250 und 500 kHz aufweist. So zeigte sich bei allen gemessenen Entfernungen mit konstantem Spreizfaktor und Cyclic Coding Rate im Mittel bei einer gewählten Bandbreite von 125 kHz eine Paketfehlerrate von 0,35 %. Die Paketfehlerrate bei 500 kHz war dazu im Vergleich nahezu doppelt so groß bei 0,71 %.

Weitergehend wurde die tatsächliche Bitrate während der Übertragung berechnet. Dieser Wert ist insbesondere in Relation zur Reichweite als wichtiges Gütekriterium zu sehen und berechnet sich wie folgt:

$$(2) \text{ Effektive Bitrate} = \frac{\text{Paketgröße} * \text{Sendepaketgröße} * 8 \text{ bit} * 2 * \text{Paketfehlerrate}}{\text{Gesamte Übertragungszeit}}$$

Die Multiplikation mit dem Faktor zwei innerhalb der Gleichung ist bedingt durch die Rücksendung der empfangenen Daten seitens des Empfängers.

So ergeben sich für die Messungen in 12,8 km Abstand folgende effektive Bitraten in Abhängigkeit von der Bandbreite und Paketfehlerrate:

- 125kHz: 4390,45 bit/s \approx 548,81 Byte/s
- 250 kHz: 6733,52 bit/s \approx 841,69 Byte/s
- 500 kHz: 12307,69 bit/s \approx 1538,46 Byte/s

Diese, bei 12,8 km tatsächlich erzielten Übertragungsraten sind um den Faktor 2,54 deutlich höher als die benötigte Übertragungsrate von 216 Byte/s, wodurch ein ausreichend großer Sicherheitspuffer für die Anwendung auch bei einer großen Entfernung zur Bodenstation geschaffen ist. Zusätzlich könnte der große Puffer dazu genutzt werden, eine noch größere Funkreichweite zu erzielen.

Die Ergebnisse der Messkampagne zeigen, dass sich eine LoRa-Netzwerkkonfiguration prinzipiell für flugwissenschaftliche Untersuchungen außerhalb der Sichtweite eines Piloten eignen würde. Es lässt sich festhalten, dass bei allen Messentfernungen und allen Permutationen der Messparameter eine robuste Funkverbindung mit geringer Paketfehlerrate eingehalten werden konnte.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In der vorliegenden Arbeit wurde ein terrestrisch basiertes Kommunikationsarchitektur-Konzept zur Durchführung von wissenschaftlichen Beyond-Line-Of-Sight-Flugversuchen von unbemannten Fluggeräten vorgestellt. Zunächst wurde anhand eines Lastenheftes ein geeignetes, im Short-Range-Band operierendes Funkmodul ausgewählt.

Weitergehend wurde die Kommunikationsarchitektur in Form eines Peer-to-Peer-Netzwerkes mit den Netzwerkteilnehmern mobile Bodenstation, Kommunikationsbake und Fluggerät konzipiert. Das Netzwerk zeichnet sich dadurch aus, dass alle Netzwerknoten durch eine einfache und robuste Übertragungslogik störungsfrei miteinander wechselseitig kommunizieren und teils als Relayknoten genutzt werden können. Die Übertragung erfolgt terrestrisch sowohl mit den zuvor ausgewählten SRD-Band Funkmodulen als auch frei erhältlichen Mobilfunkmodems in einem redundanten Betriebsmodus. Neben der Netzwerkarchitektur wurden die beteiligten Netzwerkteilnehmer eingehend vorgestellt.

Zur Validierung des Konzeptes wurde eine umfangreiche Messkampagne zur Untersuchung der Reichweite, Zuverlässigkeit und Redundanz der SRD-Band-Funkkomponenten durchgeführt. Dabei wurde mit den SRD-Band-Funkkomponenten eine Entfernung von 12,8 km mit einer geringen Paketfehlerrate erfolgreich realisiert. Die Messkampagne wies eine grundlegende Tauglichkeit dieses Kommunikationsarchitektur-Konzeptes nach. Zusätzlich zeigte sich, dass die Funkmodule aufgrund der vorhandenen Leistungsreserve in der Lage sind, eine noch höhere Reichweite überbrücken zu können.

Die so konzipierte Beyond-Line-Of-Sight-Kommunikationsinfrastruktur wurde im Rahmen des DHL Paketkopter-Projektes erfolgreich verwendet, dabei wurde eine Reichweite von 11,1 km überbrückt.

Zukünftige Arbeiten an dem Kommunikationsarchitektur-Konzept werden verschiedene Schwerpunkte aufweisen:

Es sollten weitere, parallel operierende Relayknoten in mobile Bodenstation sowie Kommunikationsbake implementiert werden, um die Redundanz zu erhöhen.

Zusätzlich könnte das Fluggerät mit einem LTE-Datenmodem ausgestattet werden, um eine Telemetrie-Übertragungsmöglichkeit mit höherer Bandbreite zu schaffen. Dabei wird unter anderem die Möglichkeit untersucht, eine LTE Machine-to-Machine Struktur einzubinden, um beispielsweise an Bord des Fluggerätes aufgenommene hochauflösende Videos oder Echtzeitkinematik-Datensätze zu anderen Netzwerkteilnehmern zu übertragen.

Weitere Aspekte sind die Mobilfunk-Reichweitensteigerung der mobilen Bodenstation als auch der Kommunikationsbake mittels geeigneter Antennen und / oder aktiver Verstärker sowie die Einbindung eines dritten, satellitengestützten Kommunikationsweges in die Kommunikationsarchitektur, um die Redundanz des Gesamtsystems zu steigern.

5. DANKSAGUNG

Besonderer Dank gilt dem Team der IMST Wireless Solutions Sparte, namentlich Herr Syrzisko, Herr Eschke, Herr vorm Walde und Herr Schulze für die Bereitstellung der Filtertransferfunktion des Akustische-Oberflächenwellen-Bandpassfilters und Diskussion der Messergebnisse.

LITERATUR

- [1] M. Wunder, J. Grosche: Verteilte Führungs-informationssysteme, Springer-Verlag. 2009
- [2] T. L. Wilson, K. Rohlfs, S. Hüttenmeister: Tools of Radio Astronomy, 5th Edition, Springer-Verlag. 2009
- [3] Bundesnetzagentur: Allgemeinzuteilung Kurzstreckenfunk Verfügung 40/2012. 2012
- [4] Bundesnetzagentur: Allgemeinzuteilung Kurzstreckenfunk Verfügung 30/2014. 2014
- [5] C. Campbell: Surface Acoustic Wave Devices and Their Signal Processing Applications, Academic Press Inc. 1989
- [6] M. Simon et al.: Spread Spectrum Communications Handbook, McGraw-Hill Professional. 2001
- [7] E. Gläßer et al.: Geographische Landesaufnahme 1:200000 Naturräumliche Gliederung Deutschlands Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung. 1978