



Evaluierung von Kommunikationstechnologien für den Betrieb von Unmanned Aerial Vehicles innerhalb und außerhalb des Sichtbereichs

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht von

Dipl.-Ing. Klaus Kainrath

Matrikelnummer 09630574

an der Technischen Universität Graz,

Doctoral School für Informations- und Kommunikationstechnik,

am Institut für Hochfrequenztechnik

Betreuer: Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Erich Leitgeb

Graz, Jänner 2021

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

I declare that I have authored this PhD thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present PhD's thesis.

Datum, Ort

Unterschrift

Wer nichts weiß, muss alles glauben.

Marie von Ebner-Eschenbach

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei meiner Familie, meinen Freunden und Arbeitskollegen herzlichst bedanken, die mir in der schwierigen und anstrengenden Zeit der Erstellung dieser Dissertation beigestanden haben. Durch sie war es mir möglich, neben einer Vollzeitbeschäftigung die nötige Energie zu finden, diese Arbeit zu einem positiven Abschluss zu bringen.

Ein großes Dankeschön ergeht auch an meinen Arbeitgeber, die FH JOANNEUM, wo mir die Forschungstätigkeiten im Rahmen von Projekten über einen langen Zeitraum ermöglicht wurden. Besonders hervorheben möchte ich dabei FH-Prof. Holger Flühr, der mich dazu ermutigte, diese Dissertation überhaupt zu beginnen und bis zu deren Abschluss immer die erste fachliche Anlaufstelle für mich war.

Weiters möchte ich mich bei meinem Betreuer, Herrn Prof. Erich Leitgeb bedanken, der mir die Gelegenheit geboten und das Vertrauen entgegengebracht hat, diese wissenschaftliche Arbeit durchzuführen.

Ganz besonders widme ich diese Arbeit meinem im Juli 2020 verstorbenen Vater Karl Kainrath. Nach seinem Vorbild in Bezug auf Ehrgeiz und Durchhaltevermögen, habe ich mich stets motivieren können, weiter und länger zu arbeiten, um meine Ziele zu erreichen.

Kurzfassung

Die mit Jänner 2021 in Kraft tretenden – neuen EASA Regularien für *Unmanned Aerial Vehicles* (UAVs) – ermöglichen eine einfachere Zulassung sowie neue Anwendungsmöglichkeiten, die bisher nicht zulässig waren. Dabei handelt es sich insbesondere um kommerzielle UAV-Flüge außerhalb des Sichtbereichs (Beyond Visual Line-of-Sight, BVLOS).

Um einen sicheren Einsatz für zivile UAVs bei BVLOS Operationen zu garantieren ist ein sicherer Datenlink zwingend notwendig, da dieser die einzige Verbindung zwischen Piloten und Fluggerät darstellt. Bei einem Verlust des Datenlinks droht auch der Verlust des UAVs sowie in weiter Folge ein Sach- oder gar Personenschaden. Mit Stand Jänner 2021 gibt es in Europa seitens der Behörden für zivile UAV-Hard- und Software sowie den UAV-Datenlink lediglich Empfehlungen, jedoch keine Vorgaben. Daher werden derzeit ausschließlich Fernsteuerungen (Remote Controller, RC) aus dem Modellsport dafür verwendet. Diese funktionieren gerade im Sichtbereich (Line-of-Sight) zuverlässig, jedoch sind aufgrund rechtlicher Vorgaben der Rundfunk und Telekom Regulierungs-GmbH (RTR) die Sendeleistungen von RCs beschränkt.

In dieser Arbeit wird der Einsatz von Kommunikationstechnologien untersucht, die einen sicheren BVLOS Einsatz von zivilen UAVs ermöglichen. Ein spezieller Fokus wird dabei auf Mobilfunktechnologien gelegt, da es dafür einerseits weltweite Standards und andererseits auch eine nahezu flächendeckende Infrastruktur gibt.

Um die Anwendung von Mobilfunk und anderer möglicher Technologien zu evaluieren, wurden eine Reihe von Messkampagnen am Boden und in der Luft durchgeführt. Damit war möglich, speziell für die vierte Generation des Mobilfunks, *Long Term Evolution* (LTE), eine Vielzahl an Erkenntnissen zu gewinnen. Bei UAV-Testflügen konnte der Einsatz von Mobilfunk als Datenlink bei UAVs erfolgreich getestet werden. Anhand der Messergebnisse, die im Zuge der Untersuchungen erfasst wurden, gelang es, speziell die Verfügbarkeit der Mobilfunksignalabdeckung in Höhen bis 150 Meter über Grund detailliert zu untersuchen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass es mehrere Kommunikationstechnologien für den Einsatz bei UAVs gibt, jedoch davon die Mobilfunktechnik für BVLOS-Operationen am besten geeignet erscheint. Dazu werden statistische Auswertungen der Messuntersuchungen in Form von Tabellen sowie 2D- und 3D-Grafiken präsentiert. Eine Datenlink-Security-Analyse gibt zusätzliche Informationen über die Sicherheitsaspekte der Anwendung von Mobilfunk für UAVs.

Abschließend wird ein Ausblick auf die Zukunft von UAVs und dessen mögliche Integration in den öffentlichen Luftraum geboten. Gerade der Einsatz von Mobilfunk bringt hier enorme Vorteile, da Anwendungen wie UAV-Ortung und UAV-Identifikation damit leicht realisierbar wären und UAVs somit in einem gemeinsamen Luftraum – den sogenannten U-Space – integrierbar wären.

Abstract

The new EASA regulations for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) will become mandatory as of January 2021. They will enable simpler UAV-certification and make new application-scenarios possible. These particularly include commercial UAV flights beyond visual line-of-sight (BVLOS).

To ensure safe use for civil UAVs in BVLOS operations, a secure data link is essential, as it is the only connection between the pilot and the aircraft. In the event of a loss of the data link, there is also a risk of loss of the UAV and, as a consequence, property damage or even personal injury. As of January 2021, the authorities in Europe still only provide recommendations for civil UAV hardware and software and the UAV data link, but no specifications. Therefore, mostly remote controllers (RC) from model sports are currently used for this purpose. These do work reliably, especially in the line-of-sight (LoS) range, but are limited in range as the legal requirements of the Rundfunk und Telekom Regulierungs-GmbH (RTR) limit the transmission power of RCs.

In this thesis, the use of communication technologies that enable a secure BVLOS deployment of civil UAVs is investigated. A special focus is placed on mobile radio technologies since there are common worldwide standards and there is also an almost nationwide infrastructure.

To evaluate the application of mobile radio and other possible technologies for civil UAVs, a series of measurement campaigns were carried out on the ground and in the air. This made it possible to gain many insights, especially for the fourth generation of mobile radio technology, Long Term Evolution (LTE). During UAV test flights, the use of mobile radio as a data link for UAVs was successfully tested. Based on the measurement results recorded during the investigations, it was possible to examine in detail specifically the availability of mobile radio signal coverage at altitudes of up to 150 meters above ground.

The results of these investigations show that there are several communication technologies available for use with UAVs, but of these, mobile radio technology appears to be the most suitable for BVLOS operations. To prove the point, statistical analysis of the measurement studies is presented in the form of tables and 2D and 3D graphs. A data link security analysis provides additional information on the security aspects of the application of mobile radio for UAVs.

Finally, an outlook on the future of UAVs and their possible integration into public airspace is provided. Especially the use of mobile radio brings enormous advantages here, as applications such as UAV positioning and UAV identification could be easily realized with it and UAVs could thus be integrated into a common airspace – the so-called U-Space.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
1.1	MOTIVATION	2
1.2	ZIELSETZUNG	3
1.3	PROBLEMSTELLUNG	4
1.4	STRUKTUR DER ARBEIT UND WISSENSCHAFTLICHE BEITRÄGE.....	6
2	RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN	7
2.1	RECHTSLAGE IN ÖSTERREICH.....	7
2.2	RECHTSLAGE IN DER EUROPÄISCHEN UNION.....	10
2.3	NEUE REGULARIEN NACH DER EASA.....	11
2.3.1	<i>UAV-Kategorie OPEN</i>	12
2.3.2	<i>UAV-Kategorie SPECIFIC</i>	15
2.3.3	<i>UAV-Kategorie CERTIFIED</i>	16
2.4	ÄNDERUNGEN IN ÖSTERREICH DURCH DIE NEUEN REGULARIEN.....	17
2.5	SPECIFIC OPERATIONS RISK ASSESSMENT	18
2.6	U-SPACE – DIE ZUKÜNFTIGE INTEGRATION VON UAVS IN DEN LUFTRAUM.....	24
3	UNMANNED AIRCRAFT SYSTEM	27
3.1	UAV-TYPEN	27
3.1.1	<i>Fixed-Wing-UAV (Starrflügel-UAV)</i>	27
3.1.2	<i>Single-Rotor-UAV</i>	31
3.1.3	<i>Multirotor-UAV</i>	34
3.1.4	<i>VTOL-UAV</i>	37
3.1.5	<i>Autonomes Flugtaxi</i>	38
3.2	FLUGREGLER.....	41
3.3	BODENSTATION.....	47
3.4	DATENLINK	49
3.5	PAYLOAD.....	50
4	DATENLINKTECHNOLOGIEN	51
4.1	STAND DER TECHNIK FÜR AERONAUTISCHE DATENLINKS IN DER ZIVILEN LUFTFAHRT	51
4.2	STAND DER TECHNIK VON DATENLINKS FÜR DEN MODELLSPORT	59
4.3	STAND DER TECHNIK VON DATENLINKS FÜR DIE UNBEMANNTE LUFTFAHRT	73
4.4	COMMAND AND CONTROL (C2)-LINK.....	74
4.5	STAND DER TECHNIK ZU MOBILFUNK.....	76
4.5.1	<i>Geschichtliche Entwicklung</i>	76
4.5.2	<i>Technische Neuerungen im Mobilfunk durch Releases</i>	82
4.5.3	<i>LTE-spezifische Eigenschaften</i>	92
4.5.4	<i>Multiplexverfahren im Mobilfunk</i>	96
4.5.5	<i>LTE-Geschwindigkeitsklassen</i>	100
5	EVALUIERUNG VON KOMMUNIKATIONSTECHNOLOGIEN	103
5.1	FORSCHUNGSPROJEKTE ZUM THEMA DATENLINK	103
5.1.1	<i>CertLink</i>	103

5.1.2	OMOSA	104
5.1.3	DEMONA.....	106
5.2	FOKUS DER EVALUIERUNG AUF MOBILFUNK ALS C2-DATENLINK.....	111
5.2.1	Voraussetzungen für den Einsatz von Mobilfunk für UAVs.....	111
5.2.2	Relevante Parameter für die Evaluierung von Mobilfunk.....	115
5.2.3	Setup von Kommunikations-Testhardware mit Fokus auf Mobilfunk.....	123
5.2.3.1	Testsetup 1 – Messungen mit UMTS USB-Dongle.....	123
5.2.3.2	Testsetup 2 – Smartphone Messungen im LTE-Netz.....	124
5.2.3.3	Testsetup 3 – LoRa Performance Test.....	125
5.2.3.4	Testsetup 4 – Messungen mittels LTE USB-Dongle.....	126
5.2.3.5	Testsetup 5 – Evaluierung von COTS LTE-Antennen.....	127
5.2.3.6	Testsetup 6 – Stationäre LTE-Messungen mittels Smartphones.....	129
5.2.3.7	Testsetup 7 – Dynamische LTE-Messungen mittels Smartphones.....	130
5.2.3.8	Testsetup 8 – Dynamische LTE-Messung mit spezieller Software.....	131
5.2.4	Setup der Testscenarien.....	133
6	AUSWERTUNG UND VERIFIZIERUNG DER MESSERGEBNISSE	138
6.1	ZUSAMMENFASSUNG DER MESSDATEN AUS DEN TESTSZENARIEN.....	138
6.2	ANALYSE UND EVALUIERUNG DER TESTDATEN.....	157
6.3	VERIFIKATION DER TESTDATEN.....	160
6.4	VERARBEITUNG DER MESSDATEN FÜR WEITERE ANWENDUNGEN.....	162
6.5	EVALUIERUNG DER IT-SECURITY VON UAV-DATENLINKS.....	165
7	DISKUSSION UND FOLGERUNGEN	169
7.1	ÜBERSICHT DER VERSCHIEDENEN ANSÄTZE.....	169
7.2	BEWERTUNGSKRITERIEN.....	172
7.2.1	Objektivität.....	172
7.2.2	Validität.....	173
7.2.3	Reliabilität.....	173
7.2.4	Handhabbarkeit.....	173
7.2.5	SWOT-Analyse.....	173
7.3	EIGNUNG VON MOBILFUNK ALS DATENLINK FÜR UAVS.....	174
7.3.1	Bezug auf die UAV-Kategorien.....	174
7.3.2	Ergänzende Maßnahmen für den Einsatz von Mobilfunk.....	175
7.3.3	Neuerungen durch zukünftige Mobilfunkstandards.....	177
7.4	FOLGERUNGEN ZU DEN FORSCHUNGSFRAGEN.....	179
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	182
8.1	SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	182
8.2	AUSBLICK.....	183
	LITERATUR	184
	ANHANG A: EIGENE PUBLIKATIONEN.....	204
	ANHANG B: TABELLEN UND ZUSÄTZLICHE PLOTS.....	206
	ANHANG C: LEBENS LAUF.....	215

Abkürzungsverzeichnis

ADS-B	Automatic Dependent Surveillance – Broadcast
AGL	Above Ground Level
ANSP	Air Navigation Service Provider
ASL	Above Sea Level
ATC	Air Traffic Control
BVLOS	Beyond Visual Line-of-Sight
C2	Command and Control
CNPC	Control and Non-Payload Communication
CNS/ATM	Communication, Navigation, Surveillance/Air Traffic Management
CONOPS	Concept of Operations
COTS	Commercial off-the-shelf
CPPM	Chaotic pulse position modulation
CQI	Channel Quality Indicator
CSQ	Cell Signal Quality
DACH	Deutschland, Österreich, Schweiz
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EASA	European Aviation Safety Agency
ESC	Electronic Speed Controller
FCI	Future Communication Infrastructure
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FSPL	Free Space Path Loss
GNSS	Global Navigation Satellite System
GCS	Ground Control Station
GSM	Global System for Mobile Communications
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
ICAO	International Civil Aviation Organisation
JARUS	Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems
LTE	Long Term Evolution
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
MTOW	Maximum Takeoff Weight
PPM	Puls-Pausen-Modulation
PWM	Pulse Width Modulation
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System
RSRP	Reference Signal Receive Power
RSRQ	Reference Signal Receive Quality
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SATCOM	Satellitenkommunikation
SESAR	Single European Sky ATM Research Programme
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SNR	Signal-to-Noise
SOG	Speed over Ground
SORA	Specific Operations Risk Assessment
STS	Standard Scenarios
TTP	Time Triggered Protocol
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UAS	Unmanned Aircraft System
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
ULFZ	unbemanntes Luftfahrzeug
VLOS	Visual Line-of-Sight
VTOL	Vertical Take-off and Landing

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Konzeptbild des personentragenden EHANG 216 [5].....	1
Abbildung 2.1: Aktuelle Kategorisierung nach LBTH67 [25]	8
Abbildung 2.2: Vereinfachte Übersicht über die Regularien der ACG [31]	9
Abbildung 2.3: Neue EASA-Kategorien für UAVs [46]	11
Abbildung 2.4: EASA Subkategorie A1 [51]	12
Abbildung 2.5: EASA Subkategorie A1 [51]	13
Abbildung 2.6: EASA Subkategorie A1 [51]	13
Abbildung 2.7: Einfacher Überblick der neuen EASA Richtlinien [63].....	17
Abbildung 2.8: Auszug aus den empfohlenen OSO [64]	21
Abbildung 2.9: Der SORA-Prozess [64].....	23
Abbildung 2.10: Schrittweise Implementierung der U-Space Dienste [83]	25
Abbildung 2.11: U-Space, ein gemeinsamer Luftraum für die bemannte- und unbemannte Luftfahrt [84]	26
Abbildung 3.1: Das Konzept eines Starrflügel UAVs [86]	28
Abbildung 3.2: Einfacher Antriebsstrang eines Starrflüglers [88]	29
Abbildung 3.3: Einstiegsmodell F949 [89].....	29
Abbildung 3.4: Der Skywalker 1900 [90]	30
Abbildung 3.5: Der Skywalker X8 [91].....	30
Abbildung 3.6: Grundlagen der Hubschraubertechnik [92]	32
Abbildung 3.7: Der Camcopter S-100 der Firma Schiebel [94].....	33
Abbildung 3.8: Der SensorCopter der Firma AeroEnterprise [96]	33
Abbildung 3.9: Grundlegende Zusammensetzung von Komponenten eines Multicopters [97].....	34
Abbildung 3.10: Quadcopter – Formen [99]	35
Abbildung 3.11: Mögliche Formen von Hexacoptern [97]	36
Abbildung 3.12: Unterschiedliche VTOL-Varianten [103]	38
Abbildung 3.13: Der CityAirbus [84].....	39
Abbildung 3.14: Der Lilith Jet soll 2025 in den Probetrieb gehen [84, 107]	39
Abbildung 3.15: Der Bell 4EX soll 2023 als „Mobility-as-a-Service“ an den Start gehen [108]	40
Abbildung 3.16: Die EASA-Sicherheitsziele für verschiedene Ausfallbedingungen [109]	40
Abbildung 3.17: Übersicht über verschiedene Pixhawk Modelle [119]	43
Abbildung 3.18: Hex Cube Black Verdrahtung	44
Abbildung 3.19: Der Beagle Bone Blue [123]	45
Abbildung 3.20: Ein Raspberry Pi 2 mit dem NAVIO2 Shield [124]	46
Abbildung 3.21: DJI Groundstation (GS) Pro auf einem iPad [125].....	47
Abbildung 3.22: Eine zuvor programmierte Mission in der QGroundControl Software starten [127]	48
Abbildung 3.23: Wegpunkte programmieren im Mission Planner [128]	49
Abbildung 4.1: Setup eines VDL2-Burst mit vorge-setzter Trainingssequenz [129, S. 214]	54
Abbildung 4.2: CNS/ATN Kommunikation über das ATN [139]	57
Abbildung 4.3: Die Zukunft des aeronautischen Datenlinks - FCI [141].....	58
Abbildung 4.4: Fresnel Zone im Modellsport [144, S. 37].....	60
Abbildung 4.5: Linear polarisierte elektromagnetische Welle im Vakuum [145]	61
Abbildung 4.6: Dipol, Strom- (rot) und Winkelverteilung der Strahlung (blau) [147].....	62
Abbildung 4.7: Abstrahlcharakteristik RC-Antenne (links) und Polarisation (rechts) [144, S. 45-46]	63
Abbildung 4.8: Blockschaltbild des RC-Übertragungskanal.....	63

Abbildung 4.9: Acht PWM Kanäle werden zu einem Frame zusammengehängt [144, S. 62].....	64
Abbildung 4.10: Frame aus 8-Kanälen mit PPM-moduliert [144, S. 62].....	64
Abbildung 4.11: Amplitude-Shift-Keying [144, S. 67].....	65
Abbildung 4.12: Frequency-Shift-Keying [144, S. 67].....	66
Abbildung 4.13: Phase-Shift-Keying [144, S. 68].....	67
Abbildung 4.14: FHSS – Beispielhaftes Hopping-Muster	68
Abbildung 4.15: Schematische Darstellung des Senders und Empfängers für FHSS.....	69
Abbildung 4.16: Schematische Darstellung des Senders und Empfängers für DSSS.....	70
Abbildung 4.17: Die Verknüpfung des höherfrequenten PRN Codes ergibt eine Spreizung bei DSSS.....	70
Abbildung 4.18: Team Black Sheep Sender (links) und Empfänger (rechts) [152].....	73
Abbildung 4.19: Gängige RCs von Futaba, ein FrSky-Empfänger und ein Telemetry Set (v.l.n.r.) [156].....	74
Abbildung 4.20: <i>Command and Control</i> Terminologie nach dem ICAO RPAS Manual [158]	75
Abbildung 4.21: Zellenbasierter Aufbau eines Mobilfunknetzes	77
Abbildung 4.22: Grundlegender Aufbau des GSM Netzwerks [162].....	78
Abbildung 4.23: Beteiligte Organisationen des IMT-2000 Programms [166]	80
Abbildung 4.24: Unterschiedliche Multiplexverfahren [168].....	81
Abbildung 4.25: Frequenz-, Zeit- und Codemultiplexing [169]	81
Abbildung 4.26: Das GSM/EDGE und UMTS Netzwerk [171].....	82
Abbildung 4.27: Die LTE Netzwerkarchitektur [174].....	84
Abbildung 4.28: Carrier Aggregation bei LTE-A [177]	86
Abbildung 4.29: Unterschiedliche Arten, der Träger-Zusammenführung bei CA [177]	87
Abbildung 4.30: Vereinfachung eines 2x2 MIMO [177].....	88
Abbildung 4.31: MIMO mit hohem Datenraten im Nahbereich [177].....	88
Abbildung 4.32: Der Relay Node (RN) ist über die Rn Schnittstelle (Richtfunk) [177]	90
Abbildung 4.33: Zwei Varianten der CoMP: Joint Transmission und Dynamic Point Selection [177]	91
Abbildung 4.34: LTE und geplante 5G Frequenzbereiche [179].....	92
Abbildung 4.35: LTE Duplexverfahren FDD (links) und TDD (rechts) [181]	93
Abbildung 4.36: Parameter einer Mobilfunk Basisstation [183].....	94
Abbildung 4.37: Horizontale (rot) und vertikale (blau) Richtcharakteristik Mobilfunkantenne [183, S. 10]	95
Abbildung 4.38: Dreifache (links) und sechsfache (rechts) Sektorisierung [183, S. 11].....	95
Abbildung 4.39: Über den Tilt bestimmt man den Bereich für die beste Empfangsleistung [183, S. 13]	96
Abbildung 4.40: Frequenz-Zeit-Darstellung eines OFDM Signals [184]	96
Abbildung 4.41: Unterschiedliche Einteilung der Datenblöcke bei OFDM und OFDMA (unten) [186].....	97
Abbildung 4.42: Darstellung eines LTE Ressource Blocks [187]	98
Abbildung 4.43: Allgemeine LTE-Frame Struktur [189, S. 8]	99
Abbildung 4.44: LTE Ressourcennetz mit Referenz Blöcken [189, S. 10]	100
Abbildung 5.1: Erster Ansatz der OMOSA Architektur mit Software Defined Radio (SDR).....	104
Abbildung 5.2: GSM Modul SIM800L (links) [199] und ein IMST iU880B USB LoRa Dongle [200].....	105
Abbildung 5.3: OMOSA Testflug zur Evaluierung des IMA Testclusters.....	106
Abbildung 5.4: Die Entwicklung des DEMONA UAVs vom Entwurf zum flugfähigen zertifizierten Modell	107
Abbildung 5.5: Systemübersicht der technischen Umsetzung der DEMONA-Avionik.....	108
Abbildung 5.6: Futaba T14SG und Aufbau der primären GCS (rechts)	109
Abbildung 5.7: Gesamte Avionik inklusive Payload und Akkus für das DEMONA-UAV	109
Abbildung 5.8: Carrier Grade NAT im Mobilfunknetz [205].....	112

Abbildung 5.9: Das Subnetz besteht hier aus 24 Bit [207]	113
Abbildung 5.10: Aufbau eines gemeinsamen VPN-Netzwerks über Mobilfunk.....	114
Abbildung 5.11: ZTE MF831 (links) [211] und Huawei E3372 (rechts) [212].....	115
Abbildung 5.12: Vereinfachte Darstellung des Dämpfungsverhaltens nach Lee [214].....	117
Abbildung 5.13: Bestimmung von RSRP bei MIMO aus TS 36.211 [217, S. 52].....	119
Abbildung 5.14: Skalierung der Parameter RSRP, RSRQ und SINR nach [221].....	122
Abbildung 5.15: Skalierung der Parameter RSRP, RSRQ und SINR nach [219].....	122
Abbildung 5.16: Schematischer Aufbau des ersten Testsetups	124
Abbildung 5.17: G-Net Track Pro bietet eine Vielzahl an Statusinformationen [226]	125
Abbildung 5.18: Technische Daten des SX1272 LoRa Moduls [227]	126
Abbildung 5.19: Delock 12479 (links) [231] und GX5404 (rechts) mit Glasfaser Cover in der Messkammer	128
Abbildung 5.20: Anordnung der Antennen in der Messkammer	129
Abbildung 5.21: Stationäre Messung mit drei unterschiedlichen Smartphones im selben Mobilfunknetz	129
Abbildung 5.22: Stationäre Messungen mit zwei identen Smartphones im selben Mobilfunknetz.....	130
Abbildung 5.23: Messdatenerfassung mittels Smartphones in UAVs.....	131
Abbildung 5.24: Testflugpfad für die Messung der Freiraumdämpfung einer Basisstation	132
Abbildung 5.25: Das Leichtflugzeug Ikarus C42	134
Abbildung 5.26: Vorbereitung eines Easystar-UAVs für den LTE-Direktflug	135
Abbildung 5.27: Planung der UAV Flugrouten für einen speziellen Mobilfunkmast	136
Abbildung 6.1: Testroute für die UMTS-Latenz- sowie RSSI-Messung.....	138
Abbildung 6.2: Auszug aus dem Senderkataster [234]	139
Abbildung 6.3: Mit OpenCellid kann die ungefähre Position der Zelle bestimmt werden [235]	139
Abbildung 6.4: Entlang der Teststrecke buchte sich der Testcluster auf drei Mobilfunkstationen ein [235].....	140
Abbildung 6.5: UMTS CSQ-Messergebnisse aus PKW- (links) und UAV-Tests (rechts)	140
Abbildung 6.6: Großräumiger UMTS Empfangstest mit dem Leichtflugzeug	141
Abbildung 6.7: UMTS Latenzmessungen.....	141
Abbildung 6.8: CSQ Werte und Höhenprofil über dem Meeresspiegel des Fluges	142
Abbildung 6.9: Farblicher Verlauf der UMTS Empfangsqualität mit Handover	142
Abbildung 6.10: LoRa Reichweitentests am Boden mit der Libelum LoRa-Hardware	143
Abbildung 6.11: Großräumiger Testflug mit dem Ikarus C42; grüne Markierungen zeigen Events.....	144
Abbildung 6.12: Übersicht der Signalqualität von LTE, UMTS, GSM sowie die Flughöhe ASL des Testfluges	144
Abbildung 6.13: Mission Planner Software auf der GCS mit Live Bild des UAVs.....	147
Abbildung 6.14: Die Empfangsleitung (links) und Reflexionsparameter von 0,8 bis 2,5 GHz	148
Abbildung 6.15: 3D Antennenpattern des Modells 645 668 SMA	148
Abbildung 6.16: Übersicht der Messwerte zweier identischer Smartphones.....	149
Abbildung 6.17: Wiederholung der Messung bei direkter LOS Verbindung zum eNodeB.....	150
Abbildung 6.18: Vergleich zwischen der Planung der Route und aufgenommenen Messwerten.....	152
Abbildung 6.19: RSRP-Werte für Provider X gestaffelt nach der Höhe und der Anzahl der Messwerte	153
Abbildung 6.20: RSRP-Werte für Provider Y gestaffelt nach der Höhe und der Anzahl der Messwerte	153
Abbildung 6.21: RSRQ-Werte für Provider X gestaffelt nach der Höhe und der Anzahl der Messwerte.....	154
Abbildung 6.22: RSRQ-Werte für Provider Y gestaffelt nach der Höhe und der Anzahl der Messwerte.....	154
Abbildung 6.23: 3D Darstellung der RSRP Daten des Providers Y.....	155
Abbildung 6.24: 3D Darstellung der RSRQ Daten des Providers Y	155
Abbildung 6.25: Die Messergebnisse von RSRP und RSRQ sowie die Flughöhe ASL.....	156

Abbildung 6.26: Ergebnis des Testfluges zur Messung der Freiraumdämpfung einer Sendestation.....	156
Abbildung 6.27: Vergrößerung des Graphen zeigt die Ab- und Zunahme des RSRP Wertes	157
Abbildung 6.28: Das UAV empfängt in der Luft Reflexionen der unterschiedlichen LTE-Sendestationen	158
Abbildung 6.29: Verlauf des SINR in Relation zur Höhe (© Dimetor)	158
Abbildung 6.30: Lineare Regression von RSRP über die Distanz.....	160
Abbildung 6.31: Gewichtetes Mittel für Elevationen von 5° bis 20°	160
Abbildung 6.32: Statusinformationen auf der Weboberfläche des ZTE MF831 [243]	161
Abbildung 6.33: Flugroute zwischen Weiz und Pinkafeld mit Markierung von zwei kurzen Ausfällen	163
Abbildung 6.34: Darstellung der jeweils aktiven Zellen (farblich codiert) © Dimetor.....	164
Abbildung 6.35: RSRP und RSRQ sowie das Höhenprofil während des Fluges zwischen Weiz und Pinkafeld	165
Abbildung 6.36: Mit dem Ikarus soll es möglich sein, DSSS Fernsteuerungen zu entschlüsseln [247]	166
Abbildung 7.1: Vom Flughafen Graz empfangene Transponderdaten (links) [256] (rechts)	172
Abbildung 7.2: SWOT Analyse für dem Einsatz von Mobilfunk für UAVs	174
Abbildung 7.3: UAV Traffic Management Use Case	178
Abbildung 7.4: Aufbau einer 5G Multiband-Antenne vorne [263]	179

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Einteilung der UAV-Kategorien nach dem LBTH67.....	8
Tabelle 2.2: SORA-Dokumentation	20
Tabelle 3.1: Vor- und Nachteile eines Starrflügel-UAVs.....	31
Tabelle 3.2: Vor- und Nachteile von Single-Rotor-UAVs.....	34
Tabelle 3.3: Vor- und Nachteile von Tricoptern.....	35
Tabelle 3.4: Vor- und Nachteile von Quadcoptern	36
Tabelle 3.5: Vor- und Nachteile von Hexacoptern	37
Tabelle 3.6: Vor- und Nachteile von VTOL-UAVs	38
Tabelle 3.7: Hardware des Pixhawk4 (FMUv5) [112].....	43
Tabelle 4.1: Spezifikationen des luftfahrtspezifischen UKW-Sprachfunks [129, S. 192].....	52
Tabelle 4.2: Spezifikationen des luftfahrtspezifischen KW-Sprachfunks [129, S. 200]	52
Tabelle 4.3: Modifikation des VDL-Mode 2 Minimum Operational Performance Standard [129, S. 213].....	54
Tabelle 4.4: Nah-, Übergangs- und Fernfeld von Antennen [146, S. 40].....	71
Tabelle 4.5: Übersicht von Datenlinks kommerzieller Hersteller.....	74
Tabelle 4.6: Zellenstruktur bei UMTS [172]	83
Tabelle 4.7: LTE OFDM-Bandbreiten Standards [181].....	98
Tabelle 4.8: Übersicht über die LTE und LTE-Advanced Downloadgeschwindigkeiten [191]	102
Tabelle 5.1: Parameter für das Wellenausbreitungsmodell von Lee	116
Tabelle 5.2: Zuordnung nach 3GPP der RSRP Werte.....	122
Tabelle 5.3: Übersicht der getesteten Antennenmodelle.....	128
Tabelle 5.4: Zusammenfassung der unterschiedlichen Testsetups	133
Tabelle 5.5: Übersicht der Testszenarien für die zuvor definierten Testsetups	137
Tabelle 6.1: Messauswertung des Testfluges mit dem Ikarus C42	145
Tabelle 6.2: Zusammenfassung der stationären LTE-Latenzmessungen	146
Tabelle 6.3: Vergleich der Sendeleistung bei senkrechter Ausrichtung der Antennen.....	147
Tabelle 6.4: Messergebnisse von zwei identen Smartphones in unterschiedlicher Anordnung	150
Tabelle 6.5: Statistischer Korrelationsfaktor aus beiden Messungen.....	150
Tabelle 6.6: Statische Messung mit gleichen UEs in derselben Orientierung nahe einer Zelle	151
Tabelle 6.7: Skalierung der RSRP Werte für die Auswertung anhand [239]	151
Tabelle 6.8: Skalierung der RSRQ Werte für die Auswertung anhand [240].....	151
Tabelle 6.9: Skalierung der SINR Werte für die Auswertung anhand [241]	151
Tabelle 6.10: Zusammenfassung der Messwerte des Messfluges	157
Tabelle 6.11: Zusammenfassung der erfassten Parameter aus dem Testflug	165
Tabelle 7.1: UAV-Use-Cases mit Einsatzmöglichkeiten für Mobilfunk.....	176

1 Einleitung

Der Markt mit unbemannten Luftfahrzeugen, oder auch *Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)* ist eine weltweit wachsende Branche [1, 2]. Anfängen von kleinen Spielzeug- und Modellbau UAVs gibt es heute (Stand Jänner 2021) bereits einige Unternehmen, die sich auf den kommerziellen Einsatz von UAVs spezialisiert haben [2–4]. Die Möglichkeit an Anwendungen ist sehr vielfältig. Anfängen von Landvermessungen über Zustandsüberprüfungen von Straßen oder Schienen, Pakettlieferungen, Überwachung von Industrieanlagen bis hin zu Katastropheneinsätzen bei Erdbeben, Bränden oder Lawinen bieten UAVs ein breites Anwendungspotential. Weiters sollen in naher Zukunft personentragende UAVs die *Urban Air Mobility* revolutionieren.



Abbildung 1.1: Konzeptbild des personentragenden EHANG 216 [5]

Als Beispiel für die praktische Anwendung seien hier zwei aktuelle Projekte genannt. Die Österreichische Post AG hat ein Projekt 2017 gestartet, in dem sie zusammen mit der TU Graz die Möglichkeit der Paketzulieferung im ländlichen Gebiet mittels UAV untersucht hat [6]. 2019 gab es dazu ein Produktvideo. Ein weiteres namhaftes Projekt wurde ebenfalls im Jahr 2019 von der oberösterreichischen Firma FACC präsentiert. Sie planten den in China von der Firma Ehang produzierten Prototypen eines Flugtaxi (siehe Abbildung 1.1) in Österreich herzustellen und mit diesem im Jahr 2020 in den operativen Betrieb in Österreich zu gehen [7]. Aufgrund der COVID19 Pandemie und der damit verbundenen späteren Einführung der neuen EASA UAV-Regularien (mehr dazu in Kapitel 2.3) hat sich die Einführung auf unbestimmte Zeit verschoben.

An der FH JOANNEUM Graz beschäftigen sich über zehn Jahren verschiedene Arbeitsgruppen des Institutes für Luftfahrt mit dem Thema UAV. Dabei wurden besonders in der Arbeitsgruppe Avionik an diversen Forschungsprojekten zum Thema Kommunikation mit UAVs geforscht. Im Umfeld dieser Forschungsprojekte entstand diese Dissertation. In Kapitel

1 dieser Arbeit wird auf die schwierige, alte, noch in der Übergangszeit gültige, sowie die mit Anfang 2021 novellierte rechtliche Situation eingegangen, die den Lesern die komplexe rechtliche Lage näherbringen soll. In Kapitel 2 werden in den Methoden die Grundlagen der UAV-Hardware präsentiert und die Standards von aeronautischen Datenlinks, sowie aktuellen Funklinks für UAVs präsentiert. Anschließend erfolgt eine Definition des Begriffs Command and Control (C2)-Datenlink gefolgt von einer Einführung in die Mobilfunktechnik von der ersten bis zur vierten Generation.

Das Kapitel 3 behandelt die Evaluierung von Kommunikationstechnologien, die für den Einsatz bei UAVs geeignet sind. Ausgehend von Ergebnissen nationaler Forschungsprojekte wird im Speziellen die Mobilfunktechnik ob ihrer Eignung für den Einsatz für UAVs in naher Zukunft diskutiert. Dabei werden Testszenarien vorgestellt. Im Kapitel 4 werden die Ergebnisse zu den zuvor vorgestellten Testszenarien präsentiert. Eine Security-Analyse von Datenlinks schließt das vierte Kapitel ab. Das Kapitel 5 diskutiert die Ergebnisse und gibt Schlussfolgerungen zum Einsatz von Mobilfunk für UAVs. Kapitel 6 schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf zukünftige Hardware wie z.B. Mobilfunk der fünften Generation ab.

1.1 Motivation

Mit dem Namen UAV können viele Personen heutzutage noch nicht viel anfangen. Anstatt dem Begriff UAV wird umgangssprachlich häufig das Wort Drohne verwendet. Darunter stellen sich vielen Personen für den militärischen Einsatz vorgesehenen unbemannte Fluggeräte [8] vor. Prinzipiell versteht man darunter ein unbemanntes Fahrzeug, das autonom oder ferngesteuert manövriert wird. Die International Civil Aviation Organisation (ICAO) verwendet auch das Akronym Remotely Piloted Aircraft System (RPAS). Im deutschsprachigen Raum kann man anstatt UAV auch den Ausdruck unbemanntes Luftfahrzeug (uLFZ) verwenden, wie es auch von Seiten der Behörde praktiziert wird. Im Weiteren wird, auch im Hinblick auf EU-weite einheitlichere Regularien (siehe Kapitel 2.3) seitens der EASA (European Aviation Safety Agency) einheitlich von UAVs gesprochen.

In Elektro-Fachgeschäften oder auch im Online-Handel ist die Auswahl und Verfügbarkeit an unterschiedlichen UAV-Modellen mittlerweile groß. Es gibt einige bekannte Marken, allen voran die Firma DJI mit ihrem großen Portfolio von Multikoptern vom Hobbybereich bis zu industriellen Anwendungen. Viele Privatpersonen kaufen sich UAVs, um damit hochwertige Luftaufnahmen zu machen. Die wenigsten Anwender hinterfragen einerseits die rechtlichen Grundlagen für den Betrieb von UAVs oder die notwendige Technologie, die einen reibungslosen Betrieb dieser garantieren. Neben dem Consumer-Bereich entstehen auch sehr viele neue Anwendungsfälle für UAVs, daher gibt es deshalb viele Start-Ups und Unternehmen, die sich in diesem Bereich etablieren möchten. Die Definition von rechtlichen Rahmenbedingungen kommt der technologischen Entwicklung nicht nach. Das bedeutet, dass vielerorts UAVs ohne Rechtsgrundlage betrieben werden. Um einen sicheren Betrieb im entsprechenden Umfeld zu garantieren, wäre es besonders wichtig, Hardwarekomponenten von UAVs zu standardisieren, um diese auch entsprechend den Regularien für den gewählten Einsatzzweck zulassen zu können. Da es nach derzeitigem Stand (Oktober 2020) jedoch noch

keine dedizierte zertifizierte Hardware für zivile UAVs gibt, erschwert dies die Gesamtentwicklung massiv.

UAVs werden von einem Piloten entweder manuell mit Fernsteuerung oder über die Eingabe von Wegpunkten in einer Bodenstation gesteuert. Dabei fliegt das UAV autonom die vorgegebenen Wegpunkte, meist GPS-Koordinaten inklusive Höhe, ab. Die einzige Schnittstelle zwischen dem Piloten bzw. der Bodenstation und dem UAV ist dabei der Funk-Datenlink. Ein zuverlässiger Datenlink ist somit für den sicheren Betrieb eines UAVs unerlässlich, und zwar nicht nur für den Betrieb allein, sondern auch für die Zulassung und in weiterer Folge für eine kommerzielle Nutzung. Die Kommunikationsmodule aus der zivilen Luftfahrt (Kapitel 4.1) sowie aus dem Modellbau (Kapitel 4.2) können nicht einfach direkt für den Betrieb von UAVs eingesetzt werden. Daher werden in dieser Arbeit Kommunikationstechnologien, im Speziellen Mobilfunk, für den Einsatz für UAVs evaluiert.

Diese Arbeit soll einen detaillierten Überblick über die aktuelle rechtliche sowie technische Situation geben und in weiterer Folge als Unterstützung für kommende Standardisierungsprozesse seitens der Behörden dienen.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, erst einen Einblick in die komplexe rechtliche Situation, rund um die Lage vor und nach der Einführung der neuen EASA UAV-Regularien mit Beginn 2021 zu geben. Aufbauend darauf soll das Gesamt-System Unmanned Aircraft System (UAS) vorgestellt werden. In weiterer Folge wird der Stand der Technik zu verfügbaren Kommunikationssystemen, die für den Einsatz für zivile UAVs geeignet sind, gegeben. Aufbauend darauf soll anhand der Evaluierung von Mobilfunk gezeigt werden, dass die aktuelle sowie kommende Mobilfunkgenerationen für UAV-Anwendungen außerhalb des Sichtbereichs als Command and Control (C2)-Link geeignet sind. Folgende Forschungsfragen sollen im Rahmen dieser Arbeit erläutert werden:

- Welche Kommunikationsmodule ermöglichen einen sicheren Betrieb von Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)?
- Welche Module sind aus technischer Sicht einsetzbar?
- Welche Anforderungen müssen die Module für einen Betrieb im Sichtbereich erfüllen?
- Wie ändern sich diese Anforderungen, wenn man das UAV außerhalb des Sichtbereichs steuern möchte?
- Wie ändern sich diese Anforderungen, wenn man das UAV autonom fliegen lassen möchte?
- Welche Randbedingungen müssen die Kommunikationsmodule erfüllen, um eine Zulassung zu bekommen?

1.3 Problemstellung

Mit Jänner 2021 wurden die Regularien für den Betrieb von UAVs europaweit vereinheitlicht. Weiters steigen die Anwendungsfälle für UAVs im privaten wie kommerziellen Bereich stark an, wie man einem Bericht des Bundesverbands der Deutschen Luftverkehrswirtschaft entnehmen kann [2]. Viele UAVs, die sich im professionellen Einsatz befinden, werden von namhaften Herstellern erzeugt. Allerdings verwenden viele Hersteller unterschiedliche Hardware und proprietäre Software für ihre UAVs. Nach derzeitigem Stand (Frühjahr 2021) existiert somit keine dedizierte Hard- und Software für UAV Anwendungen. Dies trifft auch für den verwendeten Datenlink zu. Zur Anwendung kommt einerseits Hardware aus dem Modellbau und andererseits setzen kommerzielle UAV-Hersteller auf selbst entwickelte Systeme. Diese sind meist Weiterentwicklungen aus dem Modellbau. Wie bereits zuvor erwähnt, steigt die Anzahl an Anwendungen rasant an und es entstehen zunehmend mehr zivile Business Cases für den Einsatz von UAVs. Beispiele wären Einsätze in der Landwirtschaft [9, 10], oder Monitoring von Energieanlagen [11, 12]. Die Entwicklung der Regularien für den Betrieb von UAVs allgemein (2.1 bis 2.4) sowie die Festlegung auf dedizierte Hardware für die verwendeten Datenlinks geht nur schleppend voran im Vergleich zu den aktuellen Einsätzen und technologischen Weiterentwicklungen. Die schrittweise Annäherung an einheitlichen Vorgaben sei in den folgenden Absätzen kurz erläutert.

Der Bericht der Funkkommunikationsabteilung der Internationalen Fernmeldeunion (International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector, ITU-R) ITU-R M.2171 [13] befasst sich mit dem Frequenzbedarf für die Kommunikation unbemannter Luftsysteme (Unmanned Aircraft System-UAS), Flugsicherungssysteme (ATC)-UAS, Command and Control (C2) und Sense & Avoid. Es wurde festgestellt, dass für den Betrieb von UAS wahrscheinlich terrestrische und satellitengestützte Systeme erforderlich sein werden. Auf dieser Grundlage befasst sich ITU-R M.2233 [14] mit den technischen Merkmalen von *Beyond Visual Line-of-Sight* (BVLOS)-Anwendungen für mittelgroße/große (medium/large) UAS (M/LUAS) und kleine (small) UAS (SUAS). Es wurden Entwürfe für die Frequenznutzung für UAVs am Workshop der Europäischen Konferenz der Verwaltungen für Post und Telekommunikation (Conference of Postal and Telekommunikation Administration – CEPT) über das Frequenzspektrum für Drohnen/UAS im Jahr 2018 [15] bekannt gegeben. Konkrete Frequenzbänder für BVLOS-Anwendungen wurden jedoch nicht spezifiziert und sind bis dato nicht absehbar.

Die Non-Profit Organisation *Radio Technical Commission for Aeronautics* (RTCA) entwickelt in diversen Arbeitsgruppen Empfehlungen (Guidelines) für die Luftfahrt. Diese werden seitens der Behörden (FAA in den USA, bzw. EASA in Europa) oft als verbindliche Standards erklärt. Diese Standards tragen dann entsprechende Bezeichnungen DO-(Nummer). In Europa gibt es ebenso eine Non-Profit Organisation, die luftfahrtspezifische Empfehlungen entwickelt, die EUROCAE. Die EASA erklärt für den europäischen Raum die DO Normen mit den Bezeichnungen ED-(Nummer) und umgekehrt. Als Beispiel sei die RTCA DO-254, die *Design Assurance Guideance for Airborne Electronic Hardware* genannt, die in Europa unter dem Titel Eurocae ED-80 bekannt ist. Die EUROCAE und die RTCA entwickeln mit ihren Arbeitsgruppen

die Empfehlungen laufend weiter. Das bedeutet derzeit, dass die EUROCAE Arbeitsgruppe (Working Group – WG) WG-105 koordiniert mit der *RTCA Special Committees 228 (SC-228)* [16] sich über zukünftige UAV-Standards berät.

2015 hat die RTCA Empfehlungen für den UAV-Datenlink in Form von *Minimum Operational Standards (MOPS)* veröffentlicht, die *RTCA DO-362 (Command and Control (C2) Data Link Minimum Operational Performance Standards (MOPS) (Terrestrial)*) [17]. Parallel dazu entwickelte die EUROCAE in der WG-105 Empfehlungen für den Command, Control and Communication (C3)-Link, die *ER-012 (Command and Control and ATC Communications Operational Concept (C3 CONOPS) for Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS))* [18].

In diesen Publikationen sind Empfehlungen für Hardware für die Command and Control- (C2) und Payload-Datenlinks enthalten. Es werden auch Frequenzbänder für die Nutzung von C2-Links behandelt, darunter das L-Band (1-2 GHz), C-Band (4-8 GHz) und Satelliten Kommunikation (Satcom) in mehreren Frequenzbändern. Es wird zwischen Phase 1 MOPS im L- und C-Band für den *Visual Line-of-Sight (VLOS)*-Betrieb und Phase 2 MOPS Satcom für den *BVLOS*-Betrieb unterschieden. Die *Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems (JARUS)* veröffentlichte auch das Konzept-Dokument "Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) Required C2 Performance" [19], das in Übereinstimmung mit dem Dokument 10019 RPAS Manual [20] der Internationalen Zivilluftfahrt-Organisation (ICAO) konzeptionelle Überlegungen für die höchste Abstraktionsebene eines C2-Datenlinks beschreibt, ohne auf technologische Aspekte im Detail einzugehen. Auch mit der Einführung der neuen EU-weiten einheitlichen UAV-Regularien zu Beginn 2021 wurden keine Hardware-Spezifikationen offiziell empfohlen. Obwohl MOPS existieren, können UAV-Betreiber nicht auf kommerziell erhältliche Hardware zugreifen, die seitens der Behörden, wie z.B. in Österreich die Austro Control, problemlos genehmigt werden kann, um eine Betriebsgenehmigung zu erhalten.

Da es bisher (Stand Frühjahr 2021) keine standardisierte Hardware für eine UAV-Datenverbindung gibt, kommen deshalb einerseits Modellflugkomponenten sowie andererseits proprietäre Hardware und Mobilfunk zum Einsatz. Für den VLOS-Betrieb von UAVs sind Standardfernsteuerungen im freien Industrial Scientific Medical (ISM)-Frequenzband ausreichend. Durch die Einführung neuer Vorschriften (2.4) werden aber in naher Zukunft auch BVLOS-Flüge, die in Österreich bis Ende 2020 rechtlich nicht möglich waren, ein Thema werden. Das Problem mit proprietärer Hardware für den BVLOS-Betrieb ist, dass keine Infrastruktur vorhanden ist und aufgrund der Leistungsbegrenzung im Spektrum nicht mit beliebig starker Sendeleistung operiert werden kann. Somit bietet das Mobilfunknetz eine gute technologische Basis für UAVs. Diverse Anbieter bieten bereits entsprechende Module an [21, 22]. Weiters ist auch der kommende Mobilfunkstandard der fünften Generation (5G) für die Drohnenindustrie ein großer Hoffnungsträger [23].

1.4 Struktur der Arbeit und wissenschaftliche Beiträge

Diese Arbeit ist in acht Kapitel unterteilt. In den ersten vier Kapiteln wird auf die notwendigen Grundlagen eingegangen, die für das weitere Verständnis der Evaluierung notwendig sind. Kapitel fünf befasst sich mit unterschiedlichen Testsetups, die im Rahmen der Evaluierung entwickelt wurden und mit den damit durchgeführten Messszenarien. Die Ergebnisse sowie ein Blick auf die Datenlink-Security werden in Kapitel sechs erläutert. In Kapitel sieben werden die gesammelten Ergebnisse diskutiert sowie analysiert. Das Kapitel acht schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick die Arbeit ab.

Im Rahmen der Forschungstätigkeiten an der FH JOANNEUM rund um das Thema Kommunikationsmodule für UAVs entstanden in den letzten Jahren zahlreiche (*peer-reviewed*) Veröffentlichungen und Teile der Ergebnisse wurden in wissenschaftlichen Vorträgen auf Kongressen präsentiert. Mit der Präsentation zum Thema „*Software Defined Radio als Teil einer integrierten modularen Avionik für Remotely Piloted Aircraft Systems*“ auf dem Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2015, gefolgt von einer Netzpublikation des Papers dazu, wurde die wissenschaftliche Arbeit an diesem Thema intensiviert. Es wurden in den kommenden Jahren auf Kongressen und bei Veröffentlichungen zwei Forschungsschwerpunkte gesetzt. Einerseits wurde das Thema Kommunikation und UAVs in den (*peer-reviewed*) Veröffentlichungen „*Communication techniques for Remotely piloted Aircraft with Integrated Modular Avionics*“, IEEE 2016, „*Evaluation of Mobile Radio Links as Command-And-Control Links for Unmanned Aerial Vehicles*“, IEEE 2018, „*Evaluation of data sets for mobile radio signal coverage up to 150 meters above ground*“ und „*Evaluation of Commercial Off-The-Shelf LTE Antennas for Use on Unmanned Aerial Vehicles*“ jeweils IEEE 2020 behandelt. Andererseits wurde ebenso die Avionik-Security in den Veröffentlichungen „*Aviation Cyber Security Study*“, Netzpublikation 2017 und „*Evaluation of Cyber Security in Digital Avionic Systems*“, IEEE 2020 bearbeitet. All diese Themen bildeten die Grundlage diese Arbeit. Weitere Details dazu sind im Anhang A: Publikationen zu finden.

2 Rechtliche Rahmenbedingungen

UAVs sind von kleinen, unter 250 g leichten Hobbygeräten, bis hin zu größeren, mehrerer Kilogramm schwerer Modelle für kommerzielle Einsätze im freien Handel verfügbar. Die Fluggeräte können allgemein im Geschäft oder auch online erworben werden. Beim Erwerb ist vor allem bei kleinen bis mittelgroßen Modellen keinerlei Ausweispflicht erforderlich. Wenn es jedoch um die Inbetriebnahme der UAVs geht, wissen derzeit viele Anwender oft nicht, dass es dafür bestimmte Regularien gibt. Mit Beginn des Jahres 2021 treten EU-weit die neuen vereinheitlichten UAV-Regularien in Kraft. In den folgenden Unterkapiteln wird daher erst auf die Rechtslage für UAVs in Österreich (Kapitel 2.1) vor 2021 präsentiert, da Bewilligungen nach diesem Schema noch bis Ende 2021 gültig sind. In weiterer Folge wird auf die Rechtslage in der DACH (Deutschland, Österreich und Schweiz) Region (Kapitel 2.2) eingegangen. Dabei werden die Zulassungsbedingungen bis Ende 2020, sowie die Änderungen mit Einführung der neuen EASA-Regularien (Kapitel 2.3, geplante Einführung Anfang 2021 [24]) und die damit in Verbindung stehende SORA (Kapitel 2.5) vorgestellt.

2.1 Rechtslage in Österreich

Der Betrieb von UAVs ist in Österreich seit dem Jänner 2014 über das nationale Gesetz und den Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitshinweis Nr. 67 (LBTH. 67) [25] erlaubt. Das Luftfahrtgesetz (LFG) wurde dahingehend seit 2012 von Seiten der Gesetzgebung, im Speziellen dem Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technik (BMVIT), überarbeitet. 2013 wurde der Entwurf der Regierung übermittelt und im Mai 2013 im Nationalrat beschlossen [26]. Das LFG trat am 1. Jänner 2014 in Kraft und regelt die Betriebsgenehmigungen für UAVs anhand von Kategorien und Klassen. Zuerst soll die für die Zulassung relevante Einteilung in die Kategorien anhand der folgenden Tabelle 2.1 erörtert werden. Diese Einteilung galt für Luftfahrzeuge oberhalb der Spielzeuggrenze bis zu einem Gesamtabfluggewicht (Maximum Take-off Weight – MTOW) von 150 kg. UAVs wurden als Spielzeug deklariert, wenn sie eine maximale Einschlagenergie (Impact Energy) von 79 Joule Bewegungsenergie (§ 24d LFG) nicht überschritten. Die Einteilung erfolgte in dem Bereich dann in drei Kategorien.

Flugmodelle wurden gesondert betrachtet. Bis 20 kg Abfluggewicht (MTOW) können diese ohne Zulassung als Modellflugzeug geflogen werden. Für größere Modelle ab einem MTOW über 20 kg sollte eine separate von den Behörden unabhängige Modellzulassung seitens des AeroClub Austrias [27] erworben werden. Diese durften jedoch ausschließlich auf Modellflugplätzen zum Zwecke des Flugs selbst betrieben werden. Auf diese Kategorie wird deshalb nicht weiter eingegangen.

Unbemannte Luftfahrzeuge der **Klasse 2** durften ein Abfluggewicht von 25 kg MTOW überschreiten und sogar ohne Sichtverbindung betrieben werden. Für diese gab es keine gesonderte Zulassung als UAV. Diese mussten nach dem LFG wie ein ziviles Luftfahrzeug zertifiziert werden. Das bedeutet, für den Betrieb eines UAVs nach Klasse 2 waren alle Bestimmungen für Zivilluftfahrzeuge und deren erlassene Verordnungen anzuwenden (BGBl.

II Nr. 470/2013 [28]). Bis zur Einführung der neuen EASA Regularien mit Jänner 2021 wurde kein UAV der Klasse 2 zugelassen.

Tabelle 2.1: Einteilung der UAV-Kategorien nach dem LBTH67

Kategorie (Paragraph aus LBTH67)	Bestimmungen
Kategorie 1 (§§ 24d, 34e LFG) → Flugmodelle	Gilt als Flugmodell Hierzu zählen alle UAVs, die nur zum Zwecke des Flugs selbst und ausschließlich unentgeltlich in einem Umkreis von maximal 500m betrieben werden
Kategorie 2 (§§ 24f, 24h LFG) MTOW 5-150 kg → Klasse 1	Gilt als unbemanntes Luftfahrzeug (uLFZ) der Klasse 1: Diese Kategorie umfasst alle UAVs, die in direkter Sichtverbindung (Line-of-Sight – LOS) nicht höher als 150m über Grund (Above Ground Level- AGL) betrieben werden.
Kategorie 3 (§§ 24g) → Klasse 2	Gilt als unbemanntes Luftfahrzeug der Klasse 2: In diese Kategorie fallen alle anderen UAS für einen Einsatz im und auch außerhalb des Sichtbereichs (Beyond Visual Line-of-Sight – BVLOS)

Für die unbemannten Luftfahrzeuge der **Klasse 1** wurden entsprechende Einsatzgebiete definiert. Die erste Version aus dem LBTH67 enthielt noch die Kategorien A, B, C und D. Diese wurde etwa 2017 überarbeitet und zu folgender Abbildung 2.1 vereinfacht.

	Einsatzgebiet		
	I unbesiedelt	II besiedelt	III dicht besiedelt
Betriebsmasse bis einschließlich 5 kg	A	C	
Betriebsmasse über 5 kg und bis einschließlich 25 kg	C		D
Betriebsmasse über 25 kg und bis einschließlich 150 kg	C	D	

Abbildung 2.1: Aktuelle Kategorisierung nach LBTH67 [25]

Diese Einteilung bezog sich auf das maximale Abfluggewicht (MTOW) sowie die Besiedlungsdichte im Einsatzgebiet. Für die Kategorien A, C und D gab es separate Richtlinien zur Erlangung der Zulassung. Unabhängig von der Kategorie musste zuallererst

eine UAV Haftpflichtversicherung abgeschlossen werden. Mit der Versicherungsbestätigung konnte anschließend der Antrag für die gewünschte Kategorie bei der ACG erfolgen.

Der überwiegende Teil an UAVs, die zum Einsatz kamen wurden in der **Kategorie A** zugelassen. Für diese Kategorie musste man das entsprechende Antragsformular ([29] und Anhang) z.B. von der Webseite der Austro Control herunterladen und ausfüllen. Neben den Angaben zur Person musste auch der Name von allfälligen (anderen) Piloten angegeben werden sowie der Typ des UAVs. Hatte man ein selbst gebautes UAV, fiel der Punkt Seriennummer weg. Im Punkt 5 musste man den Grund der Flüge angeben, die ausschließlich über unbesiedeltem Gebiet durchgeführt werden durften. Es folgten als Beilagen eine Kopie der Versicherungsbestätigung und ein Lichtbildausweis des Antragstellers sowie aller Piloten. Anschließend bestätigte man noch die Auflagen für die Kategorie A. Dieser Antrag wurde per E-Mail an die Austro Control übermittelt. Nach einer gewissen Bearbeitungszeit bekam der Antragsteller die Genehmigung zugesendet inklusive einer Rechnung über die Bewilligungsgebühr von € 330. Die Bewilligung war ab dem Erhalt des Bescheids ein Jahr lang gültig. Aktuelle Genehmigungen nach den alten Regularien sind noch bis zum Ablauf gültig.

Für eine Bewilligung für die **Kategorie C** erfolgte die gleiche Prozedur. Lediglich das Antragsformular ([30] und Anhang) unterschied sich in ein paar Punkten. Der Umfang der Bewilligung erfolgte entsprechend der Kategorie C.

Luffahrtgesetz

Flugmodelle und unbemannte Luftfahrzeuge, §§ 24c ff LFG

"Spielzeug"	Flugmodell ≤ 25 kg	Flugmodell > 25 kg	uLFZ der Klasse 1	uLFZ der Klasse 2
§ 24d LFG	§ 24c LFG	§ 24c LFG	§ 24f LFG	§ 24g LFG
Betrieb in Sichtverbindung				Betrieb ohne Sichtverbindung
<ul style="list-style-type: none"> - max. Bewegungsenergie ≤ 79 Joule - max. 30 m über Grund 	<ul style="list-style-type: none"> - - Umkreis max. 500 m + - unentgeltlich + - nicht gewerblich + - im Freizeitbereich + - ausschließlich zum Zwecke des Fluges selbst 	<ul style="list-style-type: none"> - Umkreis > 500 m - gegen Entgelt - gewerblich - nicht im Freizeitbereich - nicht ausschließlich zum Zwecke des Fluges selbst 	= Zivilluftfahrzeug	
- keine Gefährdung von Personen oder Sachen	- keine Gefährdung von Personen oder Sachen		Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitshinweis Nr. 67 (LBTH 67)	Luftfahrtgesetz (LFG) Luftverkehrsregeln (LVR2014) Lufttüchtigkeit (ZLLV) Lizenzen (ZLPV)
nicht im Anwendungsbereich des LFG	keine Bewilligung erforderlich	Bewilligung ÖAeC	Bewilligung ACG	Anwendung aller Regelungen der bemannten Luftfahrt

Abbildung 2.2: Vereinfachte Übersicht über die Regularien der ACG [31]

Als Beilagen musste man zusätzlich zu der im Vorigen Absatz genannten Versicherungsbestätigung und dem(n) amtlichen Lichtbildausweis(en) auch Details über die verbaute Hardware des UAVs (nach Anlage C zu LBTH 67 [32]), eine Betriebssicherheitsanalyse (nach Anlage F zu LBTH 67 [33]), einen Lärmmessbericht (nach Anlage N zu LBTH 67 [34]) sowie einen Nachweis der Fähigkeit des Piloten einreichen. Dazu

sollte für den Praxisnachweis, neben einem z.B. AeroClub Pilotenschein auch ein Flugprogramm entsprechend der Anlage P zu LBTH 67 [35] absolviert werden. Dabei galt es, diverse Flugmanöver vor einem Prüfer durchzuführen, der das Prüfprotokoll mit seiner Unterschrift bestätigen musste. Die Einreichung erfolgte dann wiederum per E-Mail, kostet ebenfalls € 330 und war ab Erhalt des Bescheids ein Jahr lang gültig. Auch diese Genehmigungen nach den alten Regularien sind noch bis zum Ablauf gültig.

Die beiden zuvor genannten Bewilligungen waren ein Jahr lang gültig, das bedeutet, man konnte ab Erhalt des Bescheids das UAV offiziell betreiben, unabhängig von der Anzahl der Einsätze. Dies änderte sich bei der Bewilligung nach **Kategorie D**. Dabei beantragte der Nutzer eine Einzelgenehmigung für eine einzelne Flugmission. Dafür musste zusätzlich zu allen Dokumenten aus der Kategorie C Zulassung auch ein Nachweis nach Anlage D zu LBTH 67 [36] erbracht werden, der belegte, dass das UAV den Bauvorschriften der Kategorie D entspricht.

Weiters sollte man im Vorhinein eine Projektbeschreibung des Vorhabens inklusive maximaler Flughöhen sowie maximaler Fluggeschwindigkeit erstellen und einen Maßstabsplan inklusive eingezeichneter Flugroute dem Antrag beilegen. Hier galt es mit der Austro Control direkt in Kontakt zu treten, um schrittweise auf die Einzelgenehmigung hin zu arbeiten. Eine vereinfachte Übersicht über alle genannten Punkte gibt Abbildung 2.2 der Austro Control.

Als Unterstützung für die Anwender finden sich mittlerweile einige Webseiten [37] sowie auch eigene Drohnen APPs, wie z.B. *Dronespace* App für Drohnenpiloten [38] direkt von der ACG, oder auch die *Drohnen-Info* vom ÖAMTC [39]. Grundsätzlich galt und gilt, dass man sich schon vor dem Kauf eines UAVs darüber informiert, in welche Klasse und Kategorie das UAV fällt und welche Missionen man damit durchführen möchte.

2.2 Rechtslage in der Europäischen Union

Da es vor der Einführung der EASA UAV-Regularien noch keine einheitlichen Regularien in Europa gab, wird hier nur kurz auf den Stand der Regularien vor deren Einführung im Jänner 2021 im DACH (Deutschland – Österreich – Schweiz) Raum eingegangen. Für entsprechende Regularien der weiteren EU-Mitgliedsstaaten sei auf die jeweiligen Luftfahrtbehörden verwiesen [40]. In Deutschland galt unter anderem das Luftverkehrsgesetz (LuftVG), die Luftverkehrsordnung (LuftVO), die Luftverkehrszulassungsverordnung (LuftVZO), die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) und noch einige weitere [41]. Die Genehmigung wurde über die Luftfahrtbehörden der Länder geregelt. Grundsätzlich galt für den Betrieb von UAVs nach § 20 Absatz 1 Nummer 7 LuftVO [42], unabhängig vom Gewicht die Zulassungspflicht. Ähnlich wie in Österreich war die Voraussetzung für eine Zulassung in Deutschland auch der spätere Betrieb in Sichtweite des Piloten sowie ein MTOW von bis zu 25 kg. Für UAVs bis 10 kg MTOW (elektrisch angetrieben) konnte man eine Allgemeinerlaubnis beantragen, für UAVs zwischen 10 bis 25 kg MTOW musste um eine Einzel-Erlaubnis angesucht werden. Für weitere Details wird auf die Webseite des Verbands für unbemannte Luftfahrt, UAV DACH e.V. [43] verwiesen.

In der Schweiz wurden die Richtlinien für eine Zulassung von UAVs mit einem MTOW bis 30 kg über die Verordnung des Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikations-Department (UVEK) über Luftfahrzeuge besonderer Kategorien [44] geregelt. Grundlegend konnte gesagt werden, dass die Regularien in der Schweiz mehr Möglichkeiten boten als in Österreich oder Deutschland. Das lag daran, dass im nationalen Luftfahrtrecht Sonderregelungen für unbemannte Fluggeräte nur als zusätzlicher Punkt in die Verordnung neben Regeln für Hängegleiter, Drachen und Fallschirme festgelegt wurden. Mit Beschränkungen auf die Mission (Ausrüstung wie Videoaufnahmegeräte), sowie das Einsatzgebiet und die Einsatzhöhe [45], durften UAVs daher bis zu einem MTOW von inklusive 30 kg ohne Betriebserlaubnis operiert werden. Erst bei einem MTOW von über 30 kg war eine Bewilligung des Bundesamts für zivile Luftfahrt (BAZL) notwendig.

2.3 Neue Regularien nach der EASA

Die European Aviation Safety Agency, EASA hat im Juni 2019 neue einheitliche UAV Regularien erlassen, die die Vorgaben für eine Zulassung von UAVs in Europa einerseits vereinheitlichen und andererseits auch vereinfachen sollen. Das vorrangige Ziel dieser EU-weiten Richtlinien, ist eine einheitliche Regelung für den Betrieb und dem allgemeinen Umgang von UAVs festzulegen. So sollen diese unter den einzelnen EU-Ländern stark unterschiedlichen Regularien harmonisiert und so ein einheitlicher Einsatz von UAVs in allen Ländern der EU ermöglicht werden. Die neuen Regularien sollen dabei für alle zivilen UAVs für kommerzielle Bereiche, professionelle Anwendungen und für Consumer-UAVs für den privaten Gebrauch gelten.



Abbildung 2.3: Neue EASA-Kategorien für UAVs [46]

Die neuen Regularien wurden in zwei einzelnen Durchführungsverordnungen erarbeitet. Die erste entspricht den „Herstellungsvorschriften für Drohnen“ und wird als „Delegation Act“ [47] (COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2019/945) bezeichnet. Das bedeutet, dass Hersteller ihre UAVs mit dem Inkrafttreten der neuen Regularien nach den Vorschriften des Delegation Act herstellen müssen. Die zweite neue Verordnung ist die „Betriebsvorschriften für Drohnen“ und wird als „Implement Act“ [48] (COMMISSION IMPLEMENTING REGULATION (EU) 2019/947) bezeichnet. Für Piloten von UAVs heißt das, dass sie mit Inkrafttreten der neuen Regularien, den Anweisungen des Implement Acts folgen müssen.

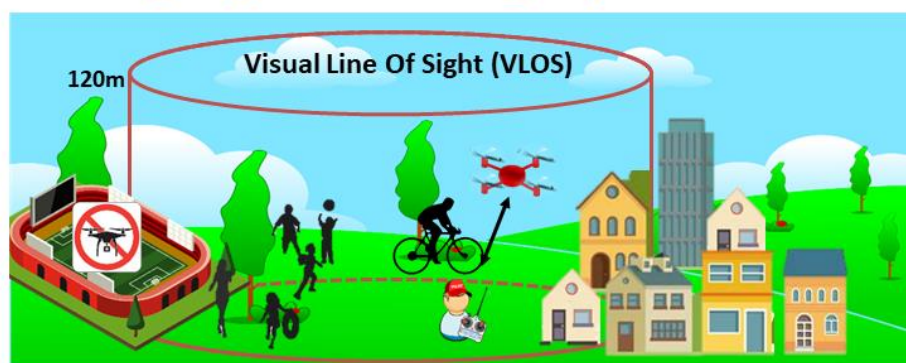
Die wichtigste Neuerung ist eine einfache Unterteilung von UAVs in drei neue Kategorien, OPEN (Offen), SPECIFIC (Spezifisch) und CERTIFIED (Zertifiziert) [49]. Das bedeutet, dass EU-weit alle zivilen UAVs in eine dieser drei Kategorien fallen, die in der gesamten Europäischen Union auch einheitlich interpretiert werden.

2.3.1 UAV-Kategorie OPEN

Diese Kategorie ist für kleine UAVs sowie Flüge mit geringem Risiko angedacht. Sie ist mehrfach unterteilt und ist die präziseste ausgeführte Kategorie, da in Zukunft die meisten UAV-Flüge, privat sowie gewerblich, in diese Kategorie fallen werden. Es gibt daher drei Unterkategorien A1, A2 und A3 für die Klasse OPEN [50]:

- **A1:** In dieser Subkategorie ist ein Flug auch in der Nähe von Menschen möglich. Ein Flug über Menschenansammlungen im Freien oder ein Flug über unbeteiligten Personen ist aber untersagt. Sollte es zu unerwarteten Überflügen von unbeteiligten Personen kommen, so muss dieser Überflug schnellstmöglich beendet werden.

Open category - Subcategory A1




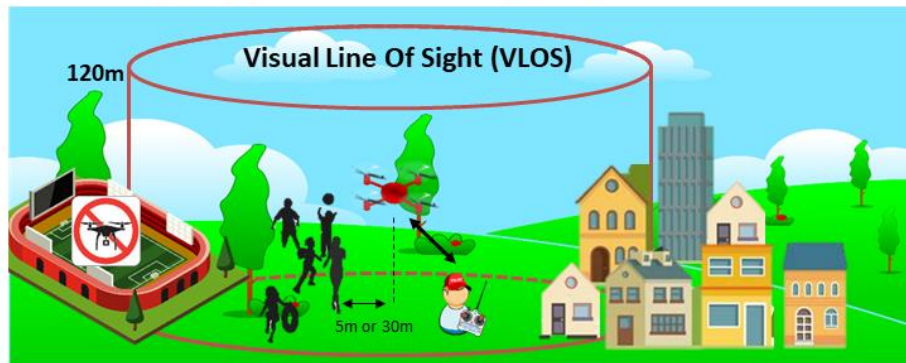
- CE  MTOM<900g
- **No fly over assembly of people**
 - reasonably expect that no uninvolved person is overflown. In case of unexpected overfly over uninvolved persons, the remote pilot shall reduce as much as possible the time during which the unmanned aircraft overflies those persons

Abbildung 2.4: EASA Subkategorie A1 [51]

- **A2:** In dieser Subkategorie muss ein sicherer Abstand zu unbeteiligten Personen von mindestens 30 Metern eingehalten werden. Eine Ausnahme bildet ein Langsam-Flug-Modus, der einen Abstand von 5 Metern erlaubt.

Open category - Subcategory A2




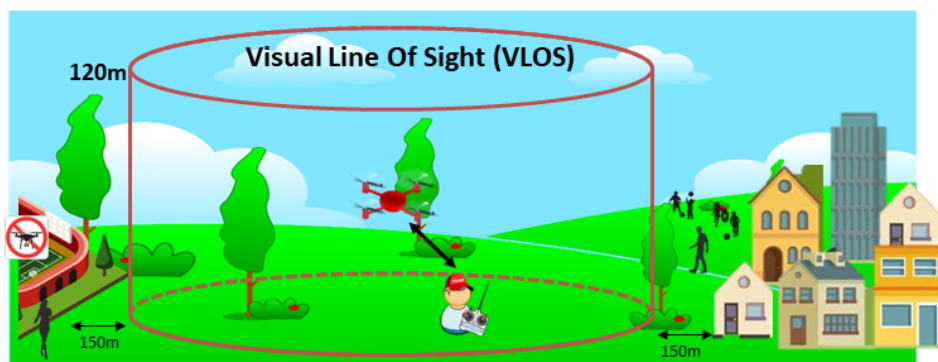
- CE  MTOM<4kg
- No fly over uninvolved people
 - UAS at a horizontal distance of at least 30 metres from uninvolved persons, or up to a of 5 metres when low speed mode function is activated

Abbildung 2.5: EASA Subkategorie A1 [51]

- **A3:** In dieser Subkategorie dürfen sich im gesamten Flugbereich keine unbeteiligten Personen befinden. Weiters gilt es auch, einen Mindestabstand von 150 Metern zu Wohn- Gewerbe-, Industrie- oder Erholungsgebieten einzuhalten.

Open category - Subcategory A3










- CE   MTOM<25kg
-   Privately built with MTOM<25kg
-    Privately built with MTOM<250g
- No fly over uninvolved people
 - conducted in an area where the remote pilot reasonably expects that no uninvolved person will be endangered within the range where the unmanned aircraft is flown during the entire time of the UAS operation

Abbildung 2.6: EASA Subkategorie A1 [51]

Allgemein gilt in der Kategorie OPEN eine maximale Flughöhe über Grund von unter 120 Metern. Der Betrieb ist nur im Sichtbereich (Visual Line-of-Sight – VLOS) gestattet, ausgenommen davon wäre das Vorhandensein von Beobachtern, die im ständigen Kontakt mit dem Piloten sind. Für Piloten gilt ein Mindestalter von 16 Jahren, wobei es für die Drohnen Risikoklasse C0 (Spielzeug) kein Mindestalter des Piloten gibt. Eine spezielle UAV

Klassifizierung nach CE Kennzeichnung, eine Registrierung des Piloten sowie ein „Drohnenführerschein“ wird verpflichtend [52]. Weitere speziellere Regeln werden in weiterer Folge durch die Risikoklassen des UAVs bestimmt. Diese Risikoklassen müssen für alle in der EU verkauften UAVs vom Hersteller angegeben werden. Das bedeutet, der Hersteller muss das UAV entsprechend dem Risiko betreffend die Eigenschaften wie Gewicht, Bewegungsenergie, Bauform, Sicherheitsoptionen zertifizieren und anschließend das UAV mit einer dem Risiko entsprechenden Plakette deutlich markieren. Darunter fallen die folgenden fünf Klassen C0 (Class0) bis C4 [53]:

Risikoklasse C0:

Darunter fallen UAVs mit einem MTOW unter 250 Gramm. Selbst gebaute UAVs und Modelle ohne Klassifizierung, aber entsprechend niedrigem MTOW werden ebenso wie die Klasse C0 behandelt. Die Hersteller müssen darauf achten, dass

- eine Gebrauchsanweisung beiliegt,
- ein Höhenlimit einstellbar ist,
- das Gerät keine scharfen Kanten aufweist und
- das Gerät einer EU-weite Spielzeug-Sicherheitsrichtlinie [54] entspricht.

Es ist kein EU-Drohnenführerschein notwendig und es darf in allen Subkategorien A1 bis A3 geflogen werden. Allerdings muss eine Haftpflichtversicherung abgeschlossen werden.

Risikoklasse C1:

Darunter fallen UAVs, deren Bewegungsenergie unter 80 Joule liegt, bzw. ein MTOW von 900 Gramm nicht überschreiten. Der Hersteller muss neben den aus C0 bekannten Vorgaben, dafür Sorge tragen, dass

- die Geschwindigkeit auf 19 m/s begrenzt wird,
- Unterlagen zur Bewegungsenergie und zur mechanischen Stabilität vorhanden sind,
- Notfalls Prozeduren, wie z.B. ein Coming Home implementiert sind,
- das Gerät eine elektronische Identifikationsnummer aufweist, die der Fernidentifikation inklusive der Übermittlung der Betreiber Nummer dient,
- es über eine Ausstattung mit einem elektronischen System zur Begrenzung der Flughöhe auf 120 Meter über Grund verfügt und
- ein Geo-Awareness System bzw. Geo-Sensibilisierungs-System mit Upload-Funktion von Daten zu Luftbeschränkungsgebieten bzw.
- automatisierte Warnhinweise bei Verletzung von Flugbeschränkungen oder niedrigem Batteriestand vorhanden sind.

Für den Piloten gilt, es muss ein Drohnenführerschein (kleiner EU Drohnenführerschein [55]) vorhanden sein und er/sie muss sich registrieren und eine elektronische Identifikation (e-ID) mittels einer EU konformen Plakette auf dem UAV anbringen. Es muss eine Haftpflichtversicherung abgeschlossen werden und man darf das UAV im Bereich A1 betreiben.

Risikoklasse C2:

In diese Klasse fallen UAVs mit einem MTOW bis 4 Kilogramm. Der Hersteller muss neben den Vorgaben aus der Risikoklasse C1 zusätzlich dafür sorgen, dass

- ein manuell zuschaltbarer Low-Speed-Modus vorhanden sein muss, wenn nahe an Personen geflogen wird

Für den Piloten gilt zusätzlich zu den Bestimmungen aus C1, dass, sofern nicht nur in der Unterkategorie A3 geflogen werden soll, auch der große Drohnenführerschein [55] für die Unterkategorie A2 vorhanden sein muss.

Risikoklasse C3:

In diese Klasse fallen UAVs mit einem MTOW bis 25 Kilogramm, sowie Eigenbauten ab 250 Gramm MTOW. Zusätzlich zu den Vorgaben der Risikoklassen C0 bis C2 gilt hier für die Hersteller zusätzlich, dass

- ein System zur Wiederherstellung des Datenlinks im Falle eines Signalverlusts vorhanden ist,
- das System auch bei Versagen eines oder mehrerer Systeme für den Piloten steuerbar bleibt, sowie
- ein sicherer Datenlink, der Fremdzugriffe auf das UAV ausschließt.

Für Piloten gilt, dass nur in der Subkategorie A3 geflogen werden darf, was aber auch nur das Vorhandensein des kleinen Drohnenführscheins voraussetzt. Weiters gilt die Registrierungspflicht, wobei auch die damit verbundene elektronische Identifikation des Piloten und UAVs kontinuierlich ausgesendet wird.

Risikoklasse C4:

In diese Klasse fallen ebenso alle UAVs mit einem MTOW bis 25 Kilogramm sowie Eigenbauten ab 250 Gramm MTOW. In diese Kategorie fallen jedoch in der Regel alle konventionellen Modellflugzeuge. Zusätzlich zu den Klassen C0 bis C3 gilt hier, dass

- kein autonomer Flug erlaubt ist und
- eine elektronische ID nur erforderlich ist, wenn das UAV eben nicht am Modellflugplatz betrieben wird.

Die Vorgaben für Piloten in C4 sind mit denen aus C3 ident.

Weitere Details zur OPEN Kategorie [56] und den Unterkategorien A1 bis A3 [51], sowie den Risikoklassen C0 bis C4 findet man auf der Webseite der EASA, im Speziellen auch im FAQ Bereich [57].

2.3.2 UAV-Kategorie SPECIFIC

Die Kategorie SPECIFIC behandelt alle UAVs, bei denen eine oder mehrere Vorgaben der OPEN-Kategorie überschritten werden [58]. Das betrifft z.B. Flüge, die höher als 120 Meter über Grund und Flüge außerhalb der Sichtweite (Beyond Visual Line-of-Sight – BVLOS) durchgeführt werden. Hierfür sind spezielle, individuell auf die Mission abgestimmte Zulassungen notwendig. Dafür soll in Zukunft eine spezielle Risikobewertung anhand eines speziellen Dokuments der SORA (Specific Operation Risk Assessment) durchgeführt werden.

Die Details zur SORA werden im Kapitel 2.5 erläutert. Da das Erstellen einer SORA sehr aufwändig ist, sollen für spezielle, sich wiederholende Missionen sogenannte Standardszenarien [59] eingeführt werden. Diese Standard Szenarien können für UAVs auch seitens der Benutzer angewendet werden, wenn diese über eine „kleine“ UAS-Operator-Lizenz verfügen. Sie wird *Light-UAS operator certificate* (LUC) genannt.

Ein LUC gilt laut EASA als Zulassungszertifikat [60]. UAV Betreiber können bei der nationalen Luftfahrtbehörde eine entsprechende Registrierung für den Erhalt einer LUC beantragen. Der Betreiber muss in der Lage sein, das Risiko eines UAV Betriebs selbst richtig einzuschätzen zu können. Die Anforderungen dafür, die von UAV Betreibern nachzuweisen sind, sind in Teil C der Verordnung (EU) 2019/947 [48] definiert. Wenn die nationale Luftfahrtbehörde dem Antrag zustimmt, stellt diese ein LUC aus und weist den UAV Betreibern somit Berechtigungen in Bezug auf Zulassungen auf Grundlage ihres Antrages zu. Diese Privilegien erlauben es dem UAV Betreiber, den Betrieb selbst zu genehmigen, ohne eine Genehmigung seitens der Behörden zu beantragen. Bei den Privilegien kann es sich um eine oder mehrere der folgenden handeln:

- Durchführung von Missionen, die unter Standardszenarien fallen, ohne die Erklärung abzugeben;
- die Selbstgenehmigung von Missionen, die vom Drohnenbetreiber durchgeführt werden und unter ein Predefined Risk Assessment (PDRA) [48] fallen, ohne eine gesonderte Genehmigung zu beantragen;
- Selbstautorisierung aller Operationen, die vom Drohnenbetreiber durchgeführt werden, ohne eine gesonderte Genehmigung zu beantragen.

Die EASA erarbeitet derzeit diese Standardszenarien. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass man für die SPEZIFIC-Kategorie zumindest alle Voraussetzungen aus der Risikoklasse C4 erfüllen muss. Alle weiteren Auflagen im Sinne von Hardwareanforderungen und Anforderungen an den Betreiber wie Piloten ergeben sich dann in weiter Folge aus der SORA.

2.3.3 UAV-Kategorie CERTIFIED

Die Kategorie CERTIFIED betrifft UAV Einsätze mit dem höchsten Risiko. Darunter fallen Spezialanwendungen, wie z.B. Industrie und Transportanwendungen von Gefahren-Gütern, falls mit dem UAV Menschenansammlungen überflogen werden oder Menschen befördert werden sollen. Dafür werden spezielle Zulassungsprozesse notwendig, sowohl für das UAV wie auch für den Betreiber, die bis zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht definiert sind. Die speziellen Auflagen für diese Kategorie werden sich voraussichtlich an der Zulassung von zivilen Luftfahrzeugen orientieren. Das erste Proposal dazu soll seitens der EASA 2021 veröffentlicht werden [61].

2.4 Änderungen in Österreich durch die neuen Regularien

Mit der EU-weiten Einführung der neuen UAV-Regularien treten diese mit dem 01.01.2021 auch in Österreich in Kraft. Aufgrund der COVID19 Pandemie hat sich der Zeitpunkt für das Inkrafttreten vom Sommer 2020 auf Jänner 2021 verschoben [24]. Es wird bei der Einführung der neuen Regularien allerdings EU-weit und somit auch in Österreich eine Übergangslösung geben. Das bedeutet, dass aktuell laufende Genehmigungen weiterhin ihre Gültigkeit behalten, neue Genehmigungen dann aber nur noch nach den neuen Regularien erteilt werden.

Der große Vorteil, den die neuen Regularien mit sich bringen, sind die Kosten. Eine Zulassung nach der OPEN-Kategorie kostet dann in Zukunft nur noch rund € 30, anstatt der € 330, die derzeit für eine Kategorie A Zulassung fällig werden. Der notwendige Onlinetest für die Einschulung wird seitens der Austro Control kostenlos angeboten. Weitere nützliche Informationen rund um das Thema Zulassung finden sich auf der Webseite www.dronespace.at [62]. Diese Webseite wird von Seiten der Austro Control extra für UAV-Anwender bereitgestellt. Um einen schnellen Überblick über die neuen Regularien zu bekommen, hilft auch die folgende Abbildung:

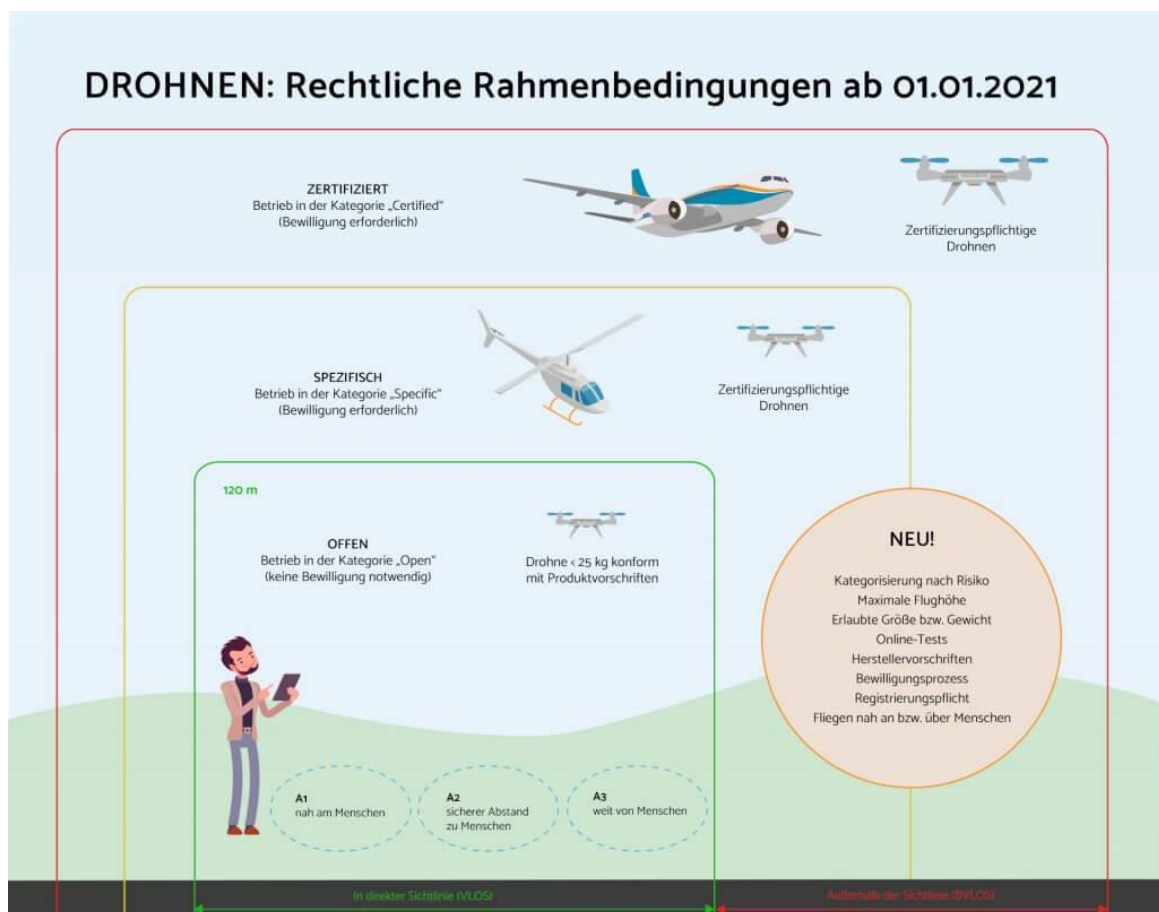


Abbildung 2.7: Einfacher Überblick der neuen EASA Richtlinien [63]

2.5 Specific Operations Risk Assessment

Das *Specific Operations Risk Assessment*, oder kurz SORA, bildet ein Werkzeug zur mehrstufigen Klassifizierung aller Risiken beim Betrieb von UAVs [64]. Dieses Risikoanalysewerkzeug wurde von der JARUS Gruppe [65] entwickelt. Die *Joint Authorities for Rule-making on Unmanned Systems* (JARUS) setzt sich aus einer Gruppe von Experten der nationalen Luftfahrtbehörden (National Aviation Agencies – NAAs) sowie regionalen Flugsicherheitsorganisationen aus der ganzen Welt zusammen. Ihr Zweck ist es, einen einheitlichen Satz von technischen, Sicherheits- und Betriebsanforderungen für die Zertifizierung und sichere Integration unbemannter Flugzeugsysteme (Unmanned Aircraft System – UAS) in den Luftraum und auf Flugplätzen zu empfehlen. Ziel von JARUS ist die Bereitstellung von Leitfäden für den Einsatz und die Zulassung von UAVs für Behörden, damit diese ihren eigenen Anforderungen entsprechend handeln und Mehrarbeit vermeiden können. Gegenwärtig tragen 52 Länder sowie die EASA und EUROCONTROL zur Entwicklung von JARUS bei.

Innerhalb von JARUS gibt es mehrere Arbeitsgruppen, die sich unter anderem mit *Flight Crew Licensing* (FCL), *Operations, Airworthiness, Detect and Avoid* (D&A), *Command and Control* (C2), *Concept of Operations* (ConOps) und der SORA befassen. Im Juni 2019 wurde eine Version 2 veröffentlicht [66]. Das Dokument legt einen ganzheitlichen Ansatz zur Bewertung von Risiken von einerseits der UAV-Mission und andererseits dem UAV selbst. Zweck der SORA ist es, eine Methodik für die Risikobeurteilung vorzuschlagen, um einen Antrag auf Genehmigung zum Betrieb eines unbemannten Flugzeugsystems innerhalb der SPECIFIC-Kategorie (siehe Kapitel 2.3.2) zu unterstützen. Aufgrund des erweiterten Risikoniveaus und der operationellen Unterschiede können für die SPECIFIC-Kategorie nicht automatisch die Sicherheits- und Leistungsanforderungen von UAVs aus der OPEN-Kategorie übernommen werden. Daher bietet die SORA einen konsistenten Ansatz zur Bewertung der zusätzlichen Risiken, die mit den erweiterten möglichen Missionen der SPECIFIC-Kategorie, wie z.B. Flüge außerhalb des Sichtbereichs, verbunden sind, die nicht durch die OPEN-Kategorie abgedeckt sind. Diese Methodik wird seitens der Behörden akzeptiert, um die Risiken einer geplanten UAS-Mission in der SPECIFIC-Kategorie zu bewerten. Dabei werden die Risiken und entsprechenden Gegenmaßnahmen schrittweise erarbeitet und mit Zahlenwerten versehen. Am Ende der Bewertung erhält man eine Zahl, die dem Gesamtrisiko der geplanten Mission entspricht. Diese muss, um eine Genehmigung zu erhalten, entsprechend den Vorgaben der Behörden gering genug sein. Dazu gibt es derzeit aber noch keine fixen Vorgaben, da sich die Genehmigungs-Prozesse über die SORA in Österreich noch in der Pilotprojektphase befinden [67].

Das Erstellen einer SORA wird anhand der Richtlinien von JARUS [64] durchgeführt. Im ersten Schritt benötigt man die Vorlage des SORA Dokuments [68]. Anschließend startet man den mehrstufigen Prozess der Risikobewertung. Seitens der JARUS Richtlinien gibt es hierbei 10 Schritte.

Bevor man mit dem Prozess startet, muss man evaluieren, ob die geplante UAV Mission als „Standard Szenario“ [69] (Standard Scenario – STS) durchzuführen ist. Diese Standard

Szenarien sollen UAV Einsätze abdecken, die in die SPECIFIC-Kategorie fallen, jedoch folgende Eigenschaften aufweisen:

- UAVs mit einer maximalen charakteristischen Abmessung (z.B. Spannweite oder Rotordurchmesser/-fläche) von bis zu 3 m und einer typischen kinetischen Energie von bis zu 34 kJ,
- Missionen außerhalb des Sichtbereichs (BVLOS),
- Missionen in spärlich besiedeltem Gebiet und
- Missionen in dafür bestimmten Lufträumen, die gefährlich oder alternativ nur eingeschränkt erreichbar sind.

Die exakte Charakterisierung kann den Richtlinien von JARUS [69] entnommen werden. Die Idee hinter den STS ist, bei sich wiederholenden und risikoärmeren Missionen die Zulassung anhand der STS zu vereinfachen und zu beschleunigen. Das bedeutet, dass eine UAV-Mission in der SPECIFIC-Kategorie, die einmal über eine SORA zugelassen wurde und den oben genannten Kriterien entspricht, seitens der Behörden (z.B. Austro Control in Österreich) zu einem STS deklariert werden kann. Die EASA hat dazu auch eine Erweiterung veröffentlicht, die Opinion No. 05/2019, „Standard scenarios for UAS operations in the ‘specific’ category“ [70]. Dabei geht es darum, die STS selbst noch in ein STS-01 und STS-02 zu unterteilen. Für STS-01 gilt VLOS Betrieb in maximal 120 Meter AGL und ein maximaler SOG von 5 m/s in besiedelten bzw. städtischen Gebieten für UAVs bis maximal 25 kg MTOW. Dazu zählen z.B. Fotoflüge. Zu STS-02 zählen BVLOS UAV-Missionen, mit einer maximalen Entfernung von 2 km zwischen Piloten und UAV, wenn Beobachter eingesetzt werden. Weiters muss der Betrieb bei maximal 120 m AGL über dünn besiedeltem Gebiet stattfinden und das UAV darf ein MTOW von 25 kg nicht überschreiten. Als Beispiel hierfür würden Wartungsflüge von Hochspannungsleitungen zählen. Detaillierte Richtlinien gibt es zu STS-01 [71] und STS-02 [72] auch von JARUS.

Fällt die geplante UAV Mission nicht in eine STS, so muss der SORA Prozess gestartet werden. Es soll mit der Einführung der neuen Regularien im Jänner 2021 auch nationale SORAs geben. Das bedeutet, für Österreich wird es eine SORA-AUT geben. Genauso gibt es mittlerweile auch eine auf die Bedürfnisse des deutschen Luftfahrtrechts zugeschnittene Version der SORA, eine sogenannte SORA-GER [73]. Das GER steht für German. Das bedeutet, diese Varianten werden in deutscher Sprache ausgearbeitet. Die klassische SORA wird jedoch auf Englisch bearbeitet und auf diese beziehen sich auch die folgenden Schritte. Laut der UAV-DACH unterscheidet sich die GER Variante aber nicht grundlegend von der Standard Variante [74]. Man kann national durchgeführte SORAs auch in weiterer Folge auf die Europäische Ebene anheben. Dazu benötigt man allerdings immer die englische Variante.

Bevor auf die einzelnen Schritte der SORA eingegangen wird, soll kurz der Ansatz erläutert werden. Ein wichtiger Punkt, den man zu Beginn des Prozesses durchführen muss, ist das Vertraut machen mit der Semantik der SORA. Zusätzlich zum Leitfaden [64] gibt es auch noch Anhänge A bis J (Annex). Die Anhänge F, G, H und J sind noch in der Vorbereitungsphase. Die verfügbaren Annexe A, B, C, D, E und I sind online [75–80]. Zur Übersicht sind alle Dokumente in Tabelle 2.2 angeführt. Der Umfang der Dokumentation zeigt, dass der Prozess

selbst einige Kenntnisse der JARUS Dokumente und Begriffe voraussetzt. Um den Ablauf möglichst kompakt zu erklären, ist der SORA Prozess in der Abbildung 2.9 als Flussdiagramm dargestellt.

In Schritt 1 müssen die geplante UAV-Mission (Operation) und die zugrundeliegenden Konzepte (Concepts) wie der gesamte Ablauf dargestellt werden. Daraus ergibt sich das Betriebskonzept, die ConOps (Concept of Operation). In Schritt 2 muss für die UAV-Mission ein sogenanntes Ground-Risk (GRC), also ein Risiko am Boden für Personen und Infrastruktur, ermittelt werden. Zur Einschätzung des Risikos muss man die Dokumente der JARUS Gruppe zur Hilfe nehmen. Aus der Einschätzung erhält man durch die Klassifizierung einen Zahlenwert für das GRC, den man im Schritt 3 finalisiert. Man kann versuchen, durch entsprechende Maßnahmen, das GRC zu senken. Dazu zählt beispielsweise das Installieren eines Fallschirms am UAV. Am Ende der Bewertung des GRC muss der resultierende Wert kleiner oder gleich 7 sein, um mit dem nächsten Schritt fortzufahren. Ist dies nicht der Fall, muss man die ConOps (das Betriebskonzept) neu auslegen und die Schritte 2 und 3 wiederholen, bis man ein GRC kleiner oder gleich 7 erreicht.

Tabelle 2.2: SORA-Dokumentation

Titel	Inhalt	Version / Status
JARUS guidelines of Specific Operations Risk Assessment (SORA) [64]	Beschreibung der Durchführung der SORA	2.0
Annex A: ConOps Guidelines on collecting and presenting system and operation information for a specific UAS operation [75]	Richtlinien zur Erfassung und Beschreibung der geplanten Mission	1
Annex B: Integrity and assurance levels for the mitigations used to reduce the intrinsic Ground Risk Classes [76]	Richtlinien zur Erfassung und Beschreibung des Risikos am Boden	1
Annex C: Strategic Mitigation Collision Risk Assessment [77]	Strategische Schadensbegrenzung für das Kollisions-Risiko	1
Annex D: Tactical Mitigations Collision Risk Assessment [78]	Taktische Schadensbegrenzung für das Kollisions-Risiko in der Luft	1
Annex E: Integrity and assurance levels for the Operational Safety Objectives (OSO) [79]	liefert Beurteilungskriterien für die Integrität (Sicherheitsgewinn) und die Zuverlässigkeit (Nachweismethode) der von einem Antragsteller vorgeschlagenen Betriebssicherheitsziele	1
Annex F: Supporting data for the Air Risk Model	Zusätzliche Charakteristiken zur Einschätzung der Air Risks	In Vorbereitung
Annex G: Supporting data for the Air Risk Model	Zusätzliche Charakteristiken zur Einschätzung der Air Risks	In Vorbereitung
Annex H: Unmanned Traffic Management (UTM) implications to SORA	Richtlinien zum Umgang mit UAVs und ATM	In Vorbereitung
Annex I: Glossary [80]	Begriffserklärung	1
Annex J: Guidance to Regulators, ANSPs, and Other Third Parties	Richtlinien für Zulassungsbehörden und ANSPs	In Vorbereitung

In Schritt 4 wird die sogenannte *Air-Risk Class* (ARC), also das Risiko in der Luft für andere Luftverkehrsteilnehmer, evaluiert. Es wird im optionalen 5. Schritt evaluiert, ob die im Schritt 4 erlangte ARC entsprechend der Mission und somit dem gewählten Luftraum entspricht, oder ob man die ARC eventuell senken kann. Wenn man beispielsweise in einem unbewohnten Gebiet weit weg von einem kontrollierten Luftraum die Mission durchführt, kann man hier die ARC senken. Details dazu findet man im SORA Anhang C [77].

Schritt 6 dient dazu, die ARC mindern. Dazu zählt z.B. die Installation eines *Detect and Avoid* Systems am UAV. Die ARC wird mit einer von vier Stufen, ARC-a (keine Gefahr) bis ARC-d (hohe Gefahr) [64] abgeschlossen. Die möglichen Minderungen sind im SORA Anhang D [78] beschrieben.

Schritt 7 beschreibt die *Specific Assurance and Integrity Levels*, oder kurz SAIL. Dabei konsolidiert man die bisherigen Risikoanalysen der GRC und ARC und überlegt die erforderlichen Maßnahmen zur Risikominderung. Das SAIL Level repräsentiert einen Vertrauensgrad, dass die geplante UAV Mission wie geplant durchgeführt wird. Nach dem Abschluss des GRCs und ARCs ist es möglich das SAIL Level in Abstimmung mit den ConOps festzulegen. Es ist unterteilt in sechs römische Ziffern I (hoher Vertrauensgrad) bis VI (niedriger Vertrauensgrad) [64].

OSO Number (in line with Annex E)		SAIL					
		I	II	III	IV	V	VI
OSO#03	UAS maintained by competent and/or proven entity	L	L	M	M	H	H
OSO#04	UAS developed to authority recognized design standards ^h	O	O	O	L	M	H
OSO#05	UAS is designed considering system safety and reliability	O	O	L	M	H	H
OSO#06	C3 link performance is appropriate for the operation	O	L	L	M	H	H
OSO#07	Inspection of the UAS (product inspection) to ensure consistency to the ConOps	L	L	M	M	H	H
OSO#08	Operational procedures are defined, validated and adhered to	L	M	H	H	H	H
OSO#09	Remote crew trained and current and able to control the abnormal situation	L	L	M	M	H	H
OSO#10	Safe recovery from technical issue	L	L	M	M	H	H

Abbildung 2.8: Auszug aus den empfohlenen OSO [64]

Den letzten Schritt im SORA Prozess stellt der Schritt 8 dar. Dabei nutzt man das zuvor ermittelte SAIL Level, um die zuvor definierten Maßnahmen zur Risikominderung innerhalb der Mission in Form von sogenannten *Operation Safety Objectives* (OSO) zu bewerten und

den damit verbundenen Grad an Robustheit zu bestimmen. Dazu enthält die SORA Richtlinie eine Tabelle [64] für eine qualitative Methodik für diese Bestimmung. Ein Auszug dieser Tabelle ist in Abbildung 2.8 dargestellt.

Diese OSO-Tabelle umfasst die Kategorien „Technische Probleme mit dem UAS“, „Verschlechterung von externen Systemen zur Unterstützung des UAS-Betriebs“, „Menschliche Fehler“ und „Widrige Betriebsbedingungen“. Jede Kategorie hat mehrere Einträge, die jeweils mit einer OSO Nummer versehen sind. Die detaillierte Beschreibung der OSO Nummern ist im SORA Anhang E [79] festgehalten.

Zu jedem OSO Eintrag ist für jede der möglichen sechs SAIL-Level ein möglicher Robustheitsgrad angegeben. Dieser wäre „O“ für Optional, „L“ für empfohlen mit geringer Robustheit, „M“ für empfohlen mit mittlerer Robustheit und „H“ für empfohlen mit hoher Robustheit. Ein Auszug der Tabelle ist in Abbildung 2.8 gegeben, die gesamte Tabelle findet man in den SORA Richtlinien [64].

Die Abschätzung des Risikos auf an die Mission angrenzende Gebiete wird im Schritt 9 durchgeführt. Dabei wird abgeschätzt, welches Risiko durch den Kontrollverlust über das UAV im Betrieb auf angrenzende Gebiete in der Luft sowie am Boden entsteht. Diese Bereiche können je nach Fortschritt der Mission variieren.

Im 10. Schritt wird das umfassende Sicherheitsportfolio der SORA für die UAV-Mission seitens der Behörden evaluiert. Der Antragsteller hat in den Schritten davor die Möglichkeit, den Behörden sowie der Flugsicherung (Air Navigation Service Provider-ANSP) darzulegen, dass für die geplante Operation die angewendeten Sicherheitsmaßnahmen eine ausreichend hohe Robustheit gewährleisten und dass der UAV Betrieb sicher durchgeführt werden kann. Somit soll anhand der begründeten Sicherheitsmaßnahmen seitens des Antragstellers für die Behörden ein ausreichendes Maß an Vertrauen gegeben werden, dass die vorgeschlagene Operation sicher durchgeführt werden kann.

Am Ende dieses Prozesses muss die Behörde dann entscheiden, ob für die geplante Mission anhand der SORA eine Genehmigung erteilt werden kann oder nicht. Sollte im ersten Schritt die Genehmigung abgelehnt werden, hat der Antragsteller die Möglichkeit, diverse Modifikationen vorzunehmen. Dabei kann man einerseits die Route der Mission anpassen (Senkung des ARCs und GRCs) oder das UAV adaptieren (ebenfalls Senkung des ARCs und GRCs). Bei erfolgreichem Erhalt einer Genehmigung kann der Betreiber die geplante Mission unter Einhaltung aller angegebenen Maßnahmen durchführen. Für jede weitere Mission, auch wenn es eine reine Wiederholung ein und derselben Mission darstellt, muss die SORA erneut durchgeführt werden. Hier besteht dann die Möglichkeit seitens der Behörden, sich oft wiederholende UAV Mission als Standard Szenarien (STS) zu definieren, die schon zuvor beschrieben wurden. In Abbildung 2.9 ist der Sora Prozess zusammengefasst grafisch dargestellt.

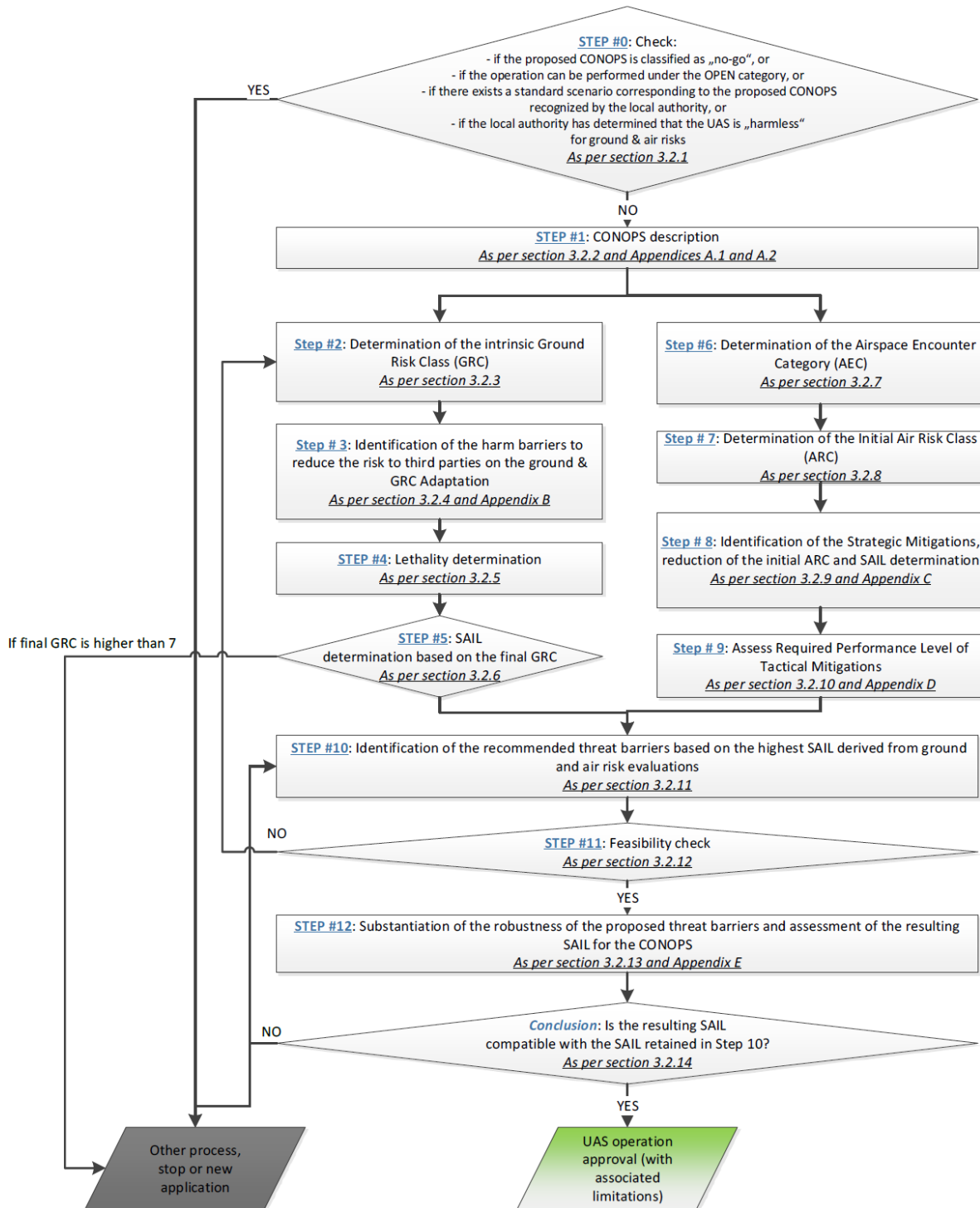


Abbildung 2.9: Der SORA-Prozess [64]

2.6 U-Space – Die zukünftige Integration von UAVs in den Luftraum

Im vorigen Kapitel wurde auf die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Zulassung von UAVs eingegangen. Wenn durch die neuen Regularien, die in Kapitel 2.3 vorgestellt wurden, die kommerziellen Anwendungen von UAVs rasant ansteigen, wird ein UAV Luftverkehrsmanagement unausweichlich. Das *Single European Sky ATM Research Programme* (SESAR) wurde seitens Eurocontrol und der Europäischen Kommission gegründet, um eine Harmonisierung, Synchronisierung sowie Vereinheitlichung der europäischen *Air Traffic Management* (ATM) Dienste zu erreichen. Neben dem klassischen ATM Diensten steht SESAR nun vor der Aufgabe, auch den zukünftigen UAV Verkehr in das klassische ATM zu integrieren. Besonders die öffentlich-private Partnerschaft *Single European Sky ATM Research Joint Undertaking* [81], SESAR-JU, die für die EU-weite Koordination der Forschungsaktivitäten im Bereich ATM als Teil des SESAR Programms fungiert, hat ihrerseits die Idee des U-Space [82] entwickelt.

Der U-Space soll eine Reihe von neuen Diensten bereitstellen, die sich auf ein hohes Maß an Digitalisierung und Automatisierung von Funktionen und spezifischen Verfahren stützen. Diese Dienste sollen einen sicheren und effizienten Zugang zum Luftraum für einen Vielzahl von UAVs bereitstellen. U-Space soll einen Rahmen schaffen, der eine Integration von UAVs in selbst dichten zivilen Luftraum ermöglicht und gleichzeitig eine Schnittstelle zum klassischen ATM bietet. Dazu wurde seitens der SESAR-JU im Jahr 2017 einen Entwurf [83] veröffentlicht, wie der U-Space operativ umgesetzt werden kann. Darin wird die schrittweise Implementierung von vier Gruppen von Diensten vorgeschlagen, die die EU-Luftfahrtstrategie und den Regulierungsrahmen für UAVs unterstützen soll:

- **U1:** U-Space Grund-Dienste (ab 2019) zur elektronischen Registrierung (e-registration), elektronischen Identifizierung (e-identification) sowie Geofencing
- **U2:** U-Space Erst-Dienste (ab 2022) für das UAV Betriebsmanagement, worunter unter anderem die Flugplanung, Fluggenehmigung, Tracking und Schnittstellen zur konventionellen Flugsicherung fallen
- **U3:** Fortgeschrittene U-Space Dienste (ab 2027), zur Unterstützung von komplexen Operationen in dicht besiedelten Gebieten wie z.B. automatisierte Detect and Avoid Systeme oder Fehlererkennungssysteme
- **U4:** Voller U-Space Dienst (ab 2035), der sowohl für das UAV als auch das U-Space System ein hohes Maß an Automatisierung, Digitalisierung sowie Connectivity bietet

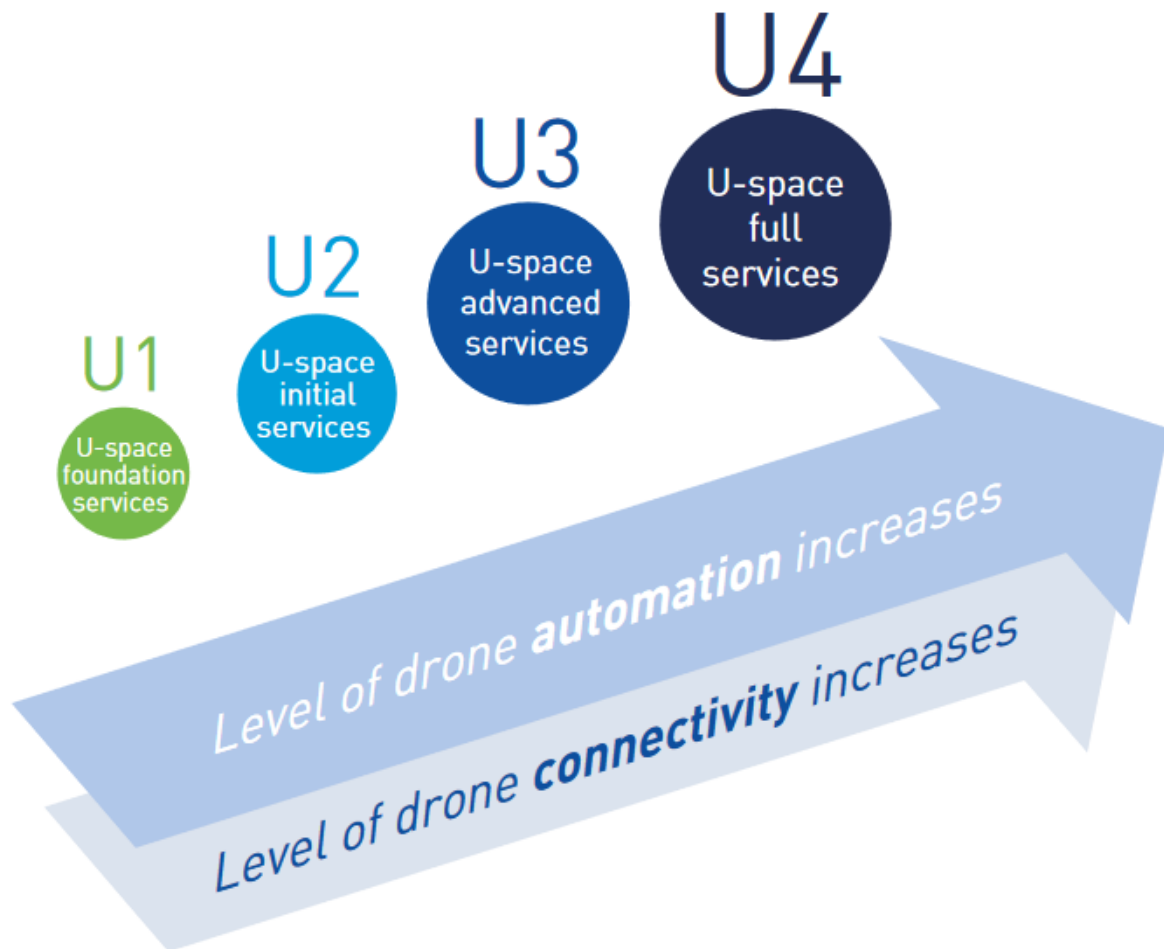


Abbildung 2.10: Schrittweise Implementierung der U-Space Dienste [83]

Im Rahmen von SESAR gibt es dazu eine Reihe von Projekten, die mit Millionenbeträgen gefördert werden, um die Entwicklung entsprechend voranzutreiben [82]. Für die UAV-Branche wird der U-Space zwingend notwendig sein. Es ermöglicht in Zukunft eine einfachere Zulassung, da das UAV in einem entsprechenden Luftraum operiert werden kann. Wenn technische Maßnahmen wie eine elektronische Identifizierung und Geofencing umgesetzt sind, kann damit auch die zivile Luftfahrt vor UAVs geschützt werden, da UAVs nur noch in den dafür vorgesehenen Lufträumen gesteuert werden können bzw. dürfen. Die Stufe 1 des U-Space sollte ab 2019 starten. Das bedeutet, dass für die genannten Technologien bereits diverse Vorschläge entstehen. Die Firma DronelQ aus Deutschland versucht gemeinsam mit der deutschen Telekom, die elektronische Identifikation über das Mobilfunknetz umzusetzen [84]. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die *Automatic Dependant Surveillance-Broadcast* (ADS-B) Technik aus der zivilen Luftfahrt auch bei UAVs einzusetzen. Fakt ist, dass es derzeit noch keine EU-weite einheitliche Lösung für die Realisierung der U-Space Stufe 1 gibt.



Abbildung 2.11: U-Space, ein gemeinsamer Luftraum für die bemannte- und unbemannte Luftfahrt [84]

3 Unmanned Aircraft System

In diesem Kapitel wird zuerst der aktuelle Stand der Technik rund um UAVs diskutiert. Die wichtigsten Komponenten eines UAVs zusammengefasst wären neben der Struktur und dem Material selbst, die verbaute Elektronik, zu der der Flugregler, die Stromversorgung, die Servos, der Motor bzw. die Motoren und der Datenlink zählen. Damit soll ein guter Überblick über das Gesamtsystem *Unmanned Aircraft System* (UAS) und dessen Komponenten UAV-Typ, Flugregler, Bodenstation, Datenlink und Payload erworben werden. Für den Ausdruck *Unmanned Aircraft System* (UAS) findet man je nach Region leicht unterschiedliche Definitionen. Es gibt ein Dokument zur Definition eines UAS seitens der ICAO [85], auf dieser liegt in weiterer Folge der Fokus. Kurz zusammengefasst versteht man unter dem Ausdruck UAS das gesamte System, bestehend aus dem gesamten Equipment, das für den Betrieb notwendig ist, wie dem Fluggerät (UAV), der Bodenstation (Ground Control Station – GCS), dem Datenlink, sowie auch dem zusätzlichen Personal, das die Datenauswertung des Payloads vornimmt. Auf den Spezialfall von *First Person View* (FPV) UAVs wird hier nicht eingegangen. Diese dienen rein sportlichen Zwecken und werden nicht kommerziell eingesetzt.

3.1 UAV-Typen

Mittlerweile gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen UAV-Typen. Hier sollen kurz die wichtigsten Varianten vorgestellt werden. Viele Modelle sind in weiterer Folge Weiterentwicklungen der hier genannten Typen. Hierbei wird nicht nach der Größe, sondern nach Typ unterschieden.

3.1.1 Fixed-Wing-UAV (Starrflügel-UAV)

Bei Fixed-Wing bzw. Starrflügel-UAVs bezieht sich der Name auf das Vorhandensein eines oder mehrerer starrer Flügel. Dabei gibt es grundsätzlich drei unterschiedliche Flügel-ausführungen, die man mit gerade, V-Stellung und Knickflügel beschreiben kann. Die Struktur ist starr und erzeugt aufgrund der Vorwärtsfluggeschwindigkeit einen Auftrieb an den Flügeln. Eine Vielzahl dieser Modelle sind von der klassischen bemannten Luftfahrt abgeleitete Versionen.

Bei der Steuerung eines Starrflügel-UAVs kommt es auf die drei Achsen an, die Längsachse, die Querachse und die Hochachse [86]. Um die Lage der Achsen zu beeinflussen, verwendet man sogenannte Ruder. Die Längsachse beeinflusst das Querruder, die Querachse das Höhenruder und die Hochachse das Seitenruder. Zur Veranschaulichung dient die Abbildung 3.1.

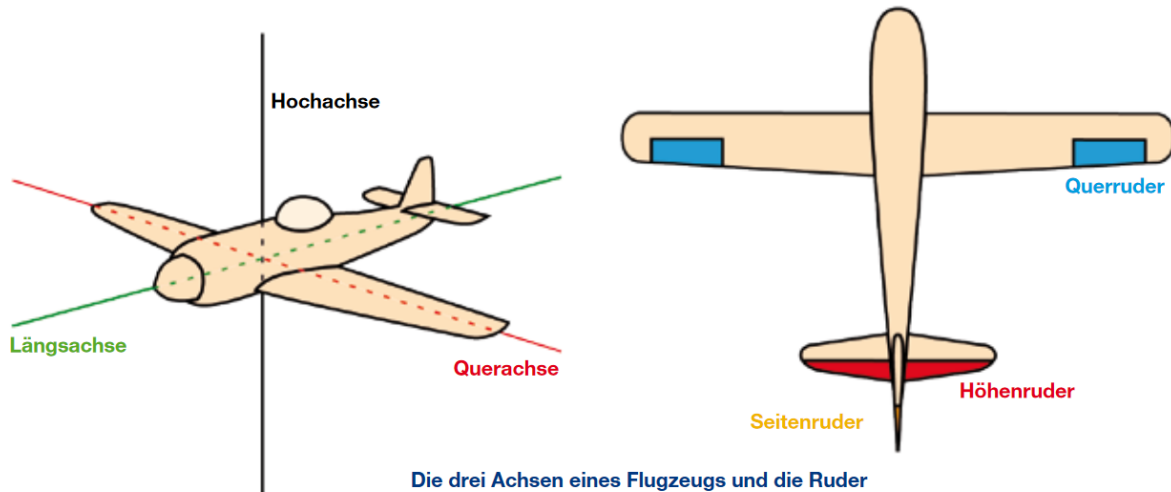


Abbildung 3.1: Das Konzept eines Starrflügel UAVs [86]

Der grundlegende Vorteil dieser klassischen Bauweise ist die Eigenstabilität. Dabei erzeugt einerseits die Tragfläche im Vorwärtsflug den Auftrieb und das am Heck angebrachte Leitwerk hält das Flugzeug stabil in der Luft. Ein Modell, das eigenstabil fliegt, kann auch kleinere Störungen der Fluglage ausgleichen, die z.B. durch Windböen hervorgerufen werden. Dabei kehrt das Flugmodell nach der Störung wieder in die Normalfluglage zurück. Um eine Eigenstabilität zu erreichen, sind das Leitwerk, die Schwerpunktlage und die V-Form der Flügel verantwortlich. Für die Steuerung des Flugmodells sind die Ruder zuständig. Das Verhältnis zwischen Eigenstabilität und Steuerbarkeit hängt stark vom Einsatzzweck ab. Ein kleines agiles Modell hat eher weniger Eigenstabilität als ein großes langsames.

Die Anordnung der Flügel wird unterschiedlich ausgeführt. Bei einem Tiefdecker sind die Tragflächen bündig mit der Rumpfunterkante angebracht. Dies stellt z.B. die häufigste Bauform bei zivilen Großraumflugzeugen dar. Bei einem Mitteldecker sind die Tragflächen in etwa mittig am Rumpf montiert und bei Schulterdeckern sind die Tragflächen bündig an der Oberkante des Rumpfes angebracht. Die Variante des Hochdeckers, bei dem die Tragflächen über dem Rumpf sind, gibt es auch, nur ist sie eher selten. Bei den meisten Modellen hat man üblicherweise auf jeder Seite des Rumpfes eine Hälfte der Tragfläche. Es gibt auch Nachbauten geschichtlicher Modelle, die als Doppel- oder gar Dreidecker, mit zwei, respektive drei Tragflächen übereinander gebaut werden. Modelle ohne Leitwerke werden Nurflügler genannt [87]. Es gibt noch eine Vielzahl von weiteren Modellbauvarianten, auf die hier jedoch nicht näher eingegangen wird.

Für den Antrieb ist bei Starrflügel Modellen meist nur ein Elektromotor verbaut. Bei größeren Modellen können auch zwei oder mehr Motoren verbaut sein. Der Antriebsstrang ist sehr simpel. Es genügt in der einfachsten Ausführungsform ein Empfänger, Servos, ein Motor und mindestens ein Akku. Der Pilot am Boden steuert dabei das UAV über den Sender. Am Empfänger am UAV sind der Motorregler und die Servos angeschlossen. Diese bekommen direkt die Steuerkommandos. Der Akku versorgt den Empfänger, den elektronischen Drehzahlregler (Electronic Speed Controller – ESC) sowie die Servos mit Energie (in gelb dargestellt).

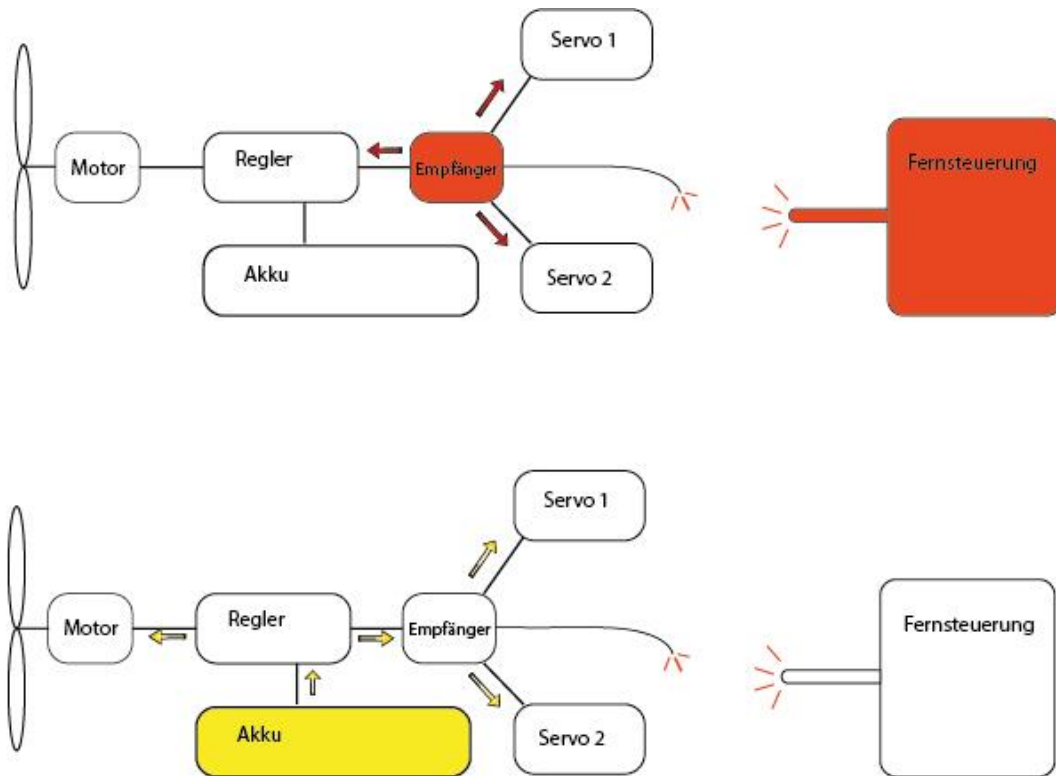


Abbildung 3.2: Einfacher Antriebsstrang eines Starrflüglers [88]

Diese einfache Variante des Antriebsstrangs ist ausreichend für den einfachen Modellflug. Möchte man das UAV kommerziell verwenden, muss man diesen Antriebsstrang erweitern und kritische Komponenten auch im Hinblick auf eine Zulassung redundant ausführen. Daher wird bei kommerziellen UAVs ein Flugregler verbaut. Ein Flugregler, aufgebaut aus einem Mikrocontroller, Sensorik und vielen Anschlüssen, hebt das Modellfliegen auf ein anderes Niveau. Man erreicht durch die Anwendung eines Flugreglers, dass das Modell allein durch die Software am Regler gesteuert werden kann (Fly-by-Wire) und man dadurch ein live Monitoring aller Komponenten im Modell erreicht (Telemetrie).



Abbildung 3.3: Einstiegsmodell F949 [89]

Somit kann man diversen unvorhergesehenen Fehlern entgegenwirken. Beispielsweise kann ein „Coming Home“ Algorithmus voreingestellt werden, der das UAV bei Verlust des Datenlinks wieder zum Startpunkt zurückfliegt. Mehr zum Thema Flugregler gibt es im Kapitel 3.2.

Ein einfaches Modell zum Einstieg in den Modellflug bietet etwa die s-idee F949, ein Cessna 182 Nachbau. Dieses Hochdecker Flugmodell weist aufgrund seiner Bauweise gutmütige Flugeigenschaften auf [89]. Dieses Flugmodell ist jedoch ausschließlich für den Modellflug konzipiert, es kann kein Payload mitgenommen werden.

Ein weiteres sehr erfolgreiches Modell ist der Skywalker 1900. Durch die Bauweise als Schulterdecker mit einem T-Leitwerk ist er sehr flugstabil. Mit diesem Modell kann auch ein gewisser Payload, ca. 500 g, transportiert werden [90]:



Abbildung 3.4: Der Skywalker 1900 [90]

Ein weiteres, häufig verwendetes Modell ist der Skywalker X8. Dieses Modell ist ein Nurflügler. Der X8 weist durch seine Bauform eine hohe Eigenstabilität in der Luft auf und ist recht robust. Im Innenraum hat man gut Platz, um Payload zu verstauen. Dabei kann man Payload bis etwa ein Kilogramm mitnehmen, je nachdem wieviel Elektronik verbaut wurde.



Abbildung 3.5: Der Skywalker X8 [91]

Es gibt mittlerweile einige kommerzielle Modelle von Starrflügel-UAVs, die auch kommerziell eingesetzt werden. Im Modellbaubereich wird in diesem Bereich sehr viel experimentiert und man findet hier unzählige Varianten. Dabei handelt es sich jedoch immer nur um einzelne Modelle, die nicht für den kommerziellen, sondern nur für den Hobbyeinsatz gedacht sind. Ein einfacher Überblick der Vor- und Nachteile sei in der folgenden Tabelle 3.1 angeführt.

Tabelle 3.1: Vor- und Nachteile eines Starrflügel-UAVs

Vorteile	Nachteile
Kann weite(re) Strecken zurücklegen (gut für z.B. Kartographie)	Muss eine Mindestgeschwindigkeit haben, um flugfähig zu sein.
Ist eigenstabil	Braucht viel Platz zum Landen
Kann bei Ausfall des Antriebs noch gleiten	Kann nicht über einer Stelle „hovern“ (in der Luft stehen“)
Kann bei einer entsprechenden Größe viel Payload transportieren	Schwieriger zu steuern (Start, Landung)

3.1.2 Single-Rotor-UAV

Single-Rotor-UAVs sind klassischen Hubschraubern nachempfunden und funktionieren nach demselben Prinzip. Das bedeutet, man hat bei einem Single-Rotor-UAV einen Hauptrotor sowie einen Heckrotor, um die Eigenrotation (rot) durch die Kraftübertragung des Antriebs auf den Hauptrotor auszugleichen (Abbildung 3.6 rechts). Dieses Prinzip eines Hubschraubers fristet unter den UAVs mittlerweile nur ein Nischendasein, wenn man nach Anzahl von verkauften Modellen geht. Durch die Rotation des Hauptrotors wird hier der Auftrieb erzeugt. Das liegt daran, dass die Rotorblätter die gleiche Form wie die Tragfläche eines Flächenflugzeugs aufweisen. Dadurch entsteht bei entsprechend schneller Rotation der nötige Auftrieb, um mit dem UAV abheben zu können. Der Antriebsstrang ist deutlich komplexer als bei Starrflügel UAVs, das heißt, ein Single-Rotor-UAV kann nicht mehr ohne Flugregler geflogen werden. Dabei übernimmt der Flugregler die Synchronisation zwischen Haupt- und Heckrotor, sowie die Ansteuerung der Neigung der Rotorblätter (Blattverstellung), um einerseits eine stabile Lage zu erhalten sowie andererseits, um das UAV zu manövrieren.

Ein besonders komplexer Punkt bei Hubschraubern ist die Blattverstellung. Dabei kann man von jedem Rotorblatt die Neigung verstellen und dadurch den Auftrieb variieren. Dabei gibt es die kollektive und die zyklische Blattverstellung [92].

Bei der kollektiven Blattverstellung wird der Winkel alle Rotorblätter gleichmäßig verstellt. Dadurch kann man den reinen Auftrieb variieren. Dies benötigt man, um mit dem Hubschrauber bzw. UAV starten zu können und in weiterer Folge zu steigen, zu schweben (hovern) oder zu sinken. Diese Antriebsart wird pitchgesteuert bezeichnet [93]. Mit Pitch bezeichnet man den Anstellwinkel der Rotorblätter. Bei pitchgesteuerten Modellen wird die Auftriebskraft ausschließlich über die Änderung der Neigung der Rotorblätter und die damit einhergehende Änderung des Auftriebs beeinflusst. Im Gegensatz dazu gibt es auch drehzahlgesteuerte Modelle. Dabei wird der nötige Schub durch die Drehzahländerung der Rotorblätter erzeugt. Beide Techniken werden für den Haupt- sowie für den Nebenrotor angewendet. Dadurch ergeben sich zwei grundsätzlich unterschiedliche Antriebsarten, drehzahl- und pitchgesteuert.

Um den Hubschrauber nach vorne zu bewegen, muss nun die Rotorebene ebenfalls nach vorne geneigt werden. Der Luftstrom durch den Rotor erzeugt somit eine Kraftwirkung nach vorne, wie in Abbildung 3.6 links dargestellt.

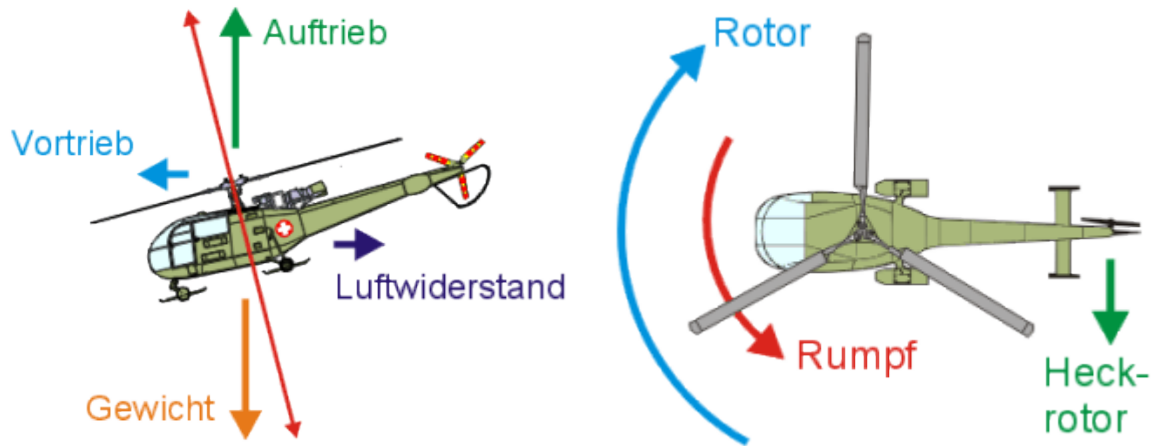


Abbildung 3.6: Grundlagen der Hubschraubertechnik [92]

Um nun einen Hubschrauber respektive ein Single-Rotor-UAV zu steuern, muss die Rotorebene in die Richtung geneigt werden, in die das UAV fliegen soll. Um die Rotorebene zu neigen, wird die Technik der zyklischen Blattverstellung angewendet. Dabei wird in einem 360° Umlauf des Rotors die Blattverstellung kontinuierlich verändert. Der Anstellwinkel ist somit z.B. höher, während das Blatt das Heck des UAVs passiert und wenn es die Front passiert, geringer. Das führt zu einem Nicken des UAVs, weil somit am Heck ein höherer Auftrieb erzeugt wird als an der Front.

Durch die Kraftübertragung des Antriebs auf den Hauptrotor entsteht eine Kraft, die den Hubschrauber in die der Drehrichtung der Rotoren (Abbildung 3.6 rechts – blau) entgegengesetzte Richtung (Abbildung 3.6 rechts – rot) rotieren lassen würde. Um den Hubschrauber ruhig in der Luft zu halten, muss daher mit Hilfe eines weiteren Rotors, dem Heckrotor, eine der Eigenrotation entgegenwirkende Kraft erzeugt werden. Die Ansteuerung des Heckrotors geschieht wiederum gleich wie die des Hauptrotors, entweder Drehzahl- oder Pitchgesteuert. Durch gezielte Beeinflussung des Schubs des Heckrotors kann der Pilot den Hubschrauber gieren lassen. Die Gierbewegung ist dabei das aufrechte Drehen des Helikopters um die senkrechte Achse.

Die größte Gefahr bei diesem Flugmodell besteht im Ausfall des Antriebs. Ein Single-Rotor-UAV kann genauso wie ein Hubschrauber nicht einfach gleiten. Allerdings kann, sofern das Modell sich in einer gewissen Höhe befindet, eine sogenannte Autorotation gestartet werden. Das bedeutet, dass im Falle eines Ausfalls des Antriebs der Pilot mittels der kollektiven Blattverstellung einen möglichst geringen Winkel der Rotorblätter einstellt, was einen hohen Luftwiderstand erzeugt. Das Modell sinkt rapide zu Boden und die Rotorblätter werden vom Luftstrahl in Bewegung gesetzt. Diese Bewegung erzeugt einen Auftrieb, der die Sinkgeschwindigkeit verringert [92].

Der in Österreich wohl bekannteste Vertreter der Single-Rotor-UAVs ist der Camcopter S-100 der Firma Schiebel. Es ist ein mittlerweile weltweit verkauftes und eingesetztes Modell. Angetrieben wird dieses Modell durch einen Verbrennungsmotor. Dadurch erhält man einerseits eine große Betriebsleistung und weiters auch eine hohe Endurance von mindestens

6 Stunden. Das UAV hat ein MTOW von 200 Kg und kann dabei eine Payload von bis zu 50 kg transportieren [94].



Abbildung 3.7: Der Camcopter S-100 der Firma Schiebel [94]

Ein weiterer Vertreter aus Österreich wäre der SensorCopter der Firma AeroEnterprise [95]. Dieses Modell ist knapp 3 Meter lang und hat eine MTOW von über 20 kg. Es wird rein elektrisch angetrieben und hat eine Flugdauer von etwa 30 Minuten. Der Haupteinsatzzweck hierbei ist Videoaufnahmen von Windkraftanlagen durchzuführen. Dafür ist der SensorCopter mit entsprechendem Kameraequipment ausgestattet.



Abbildung 3.8: Der SensorCopter der Firma AeroEnterprise [96]

Die größte Gefahr bei einem Single-Rotor-UAV geht von den schnell rotierenden Rotorflächen aus. Daher muss man im Betrieb vor allem bei Start und Landung entsprechend vorsichtig agieren. Weiters ist ein Single-Rotor-UAV mechanisch viel komplexer aufgebaut als Multirotor UAVs. Deshalb sind diese Modelle deutlich wartungsintensiver. Außerdem ist aufgrund der geringeren Verbreitung die Entwicklung im Gesamten teurer. Auf der anderen Seite ist der Antrieb wesentlich effizienter als bei Multicoptern und man kann damit selbst mit hoher Payload lange an einer Stelle schweben (hovern).

Tabelle 3.2: Vor- und Nachteile von Single-Rotor-UAVs

Vorteile	Nachteile
Ist deutlich effektiver als Multicopter	Ist mechanisch komplex aufgebaut, erfordert mehr Wartung
Hohe Traglast	Schwierig zu steuern, besonders die pitchgesteuerten Varianten
Kann lange stabil an einer Stelle schweben, auch mit hoher Payload	Teuer in Entwicklung und Erhaltung (Wartung)
Hat im Vergleich zu Multicoptern eine hohe Endurance	Verletzungsgefahr durch die Rotorblätter

3.1.3 Multirotor-UAV

Multirotor UAVs stellen die erfolgreichste Kategorie von UAVs dar. Darunter fallen alle UAVs, die über mehr als zwei Rotoren in einer Ebene verfügen. Die bekanntesten Ausführungen sind der Quadcopter, mit vier Rotoren. Weiters gibt es auch Hexacopter mit sechs und Octocopter mit acht Rotoren. Eher selten findet man Tricopter mit drei Rotoren oder andere Rotoranordnungen als die zuvor genannten.

Im Vergleich zu Single-Rotor-UAVs beherrschen Multicopter meist keine Rotorblattverstellung, sondern nutzen Fixed-Pitch Rotoren, also fixe Rotorblätter. Um einen entsprechenden Schub zu erzeugen wird einfach die Drehzahl jedes einzelnen Rotors variiert.

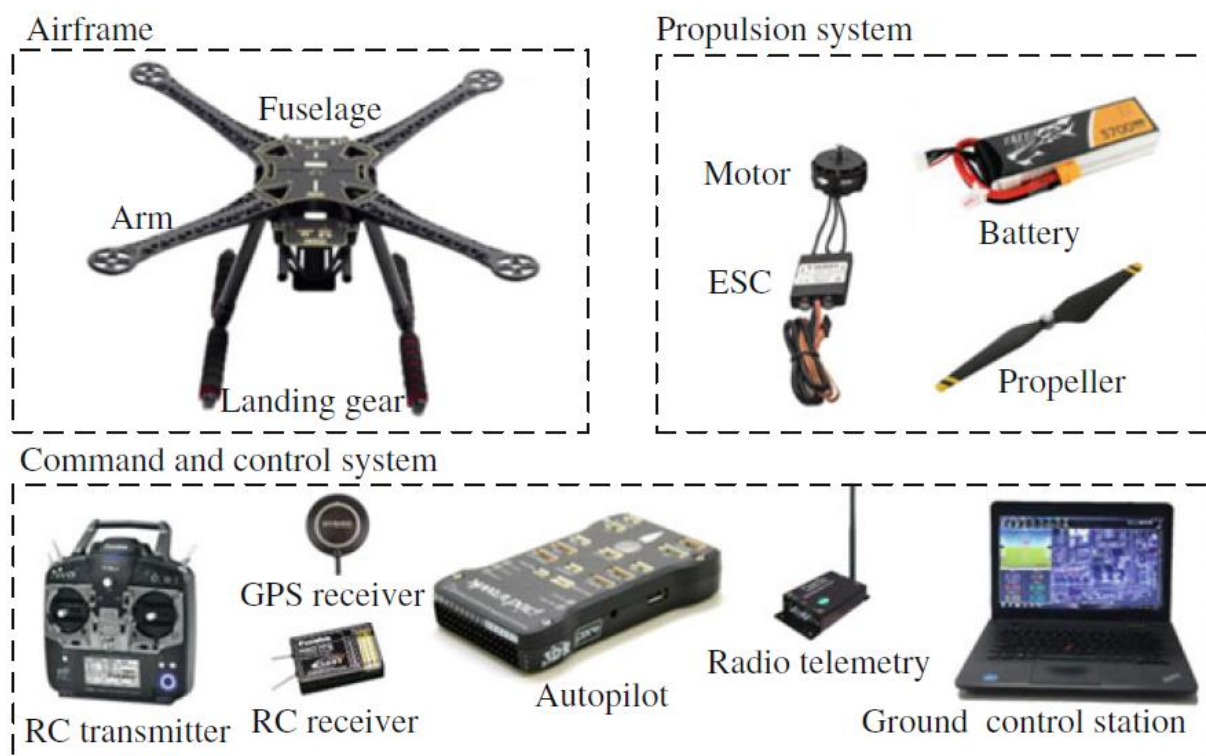


Abbildung 3.9: Grundlegende Zusammensetzung von Komponenten eines Multicopters [97]

Dadurch kann man Schubkraft und somit eine Bewegung in jede beliebige Richtung hervorrufen. Wichtig dafür ist ein entsprechender Flugregler, der die Kommandos des Piloten in die entsprechende Drehzahlsteuerung umsetzt. Der grundsätzliche Aufbau jedes

Multicopters besteht aus einem Airframe, der aus einem Rumpf (Fuselage), Armen, die als Verbindung zwischen Rumpf und den Motoren dienen, und einem Fahrwerk. Weiters gehört ein Antriebssystem, bestehend aus mehreren Motoren inklusive Rotoren, eine entsprechende Zahl von Motorreglern (Electronic Speed Controller – ESC) und eine Energiequelle dazu. Zusätzlich zählen die RC Fernbedienung, der Empfänger, der Flugregler, ein Telemetrie Modul und eine Bodenstation als Command and Control System zum Multicopter Equipment.

Weiters weisen Multicopter eine Orientierung auf. Zeigt ein Arm in Flugrichtung, spricht man von einer + Form. Zeigt der Zwischenraum zweier Arme in Flugrichtung, wird es als x Form bezeichnet. Die einzige Ausnahme ist hier der Tricopter, da aufgrund der 3 Arme hier keine x bzw. + Form möglich ist.

Tricopter:

Ein Tricopter verwendet drei Motoren mit je einem Rotor. Die Motoren können entweder in Y- oder T-Form angeordnet sein. In der Y-Form sind die Arme in einem Winkel von 120° und bei der T-Form in einem Winkel von 90° angeordnet. Aufgrund seiner Bauform ist dieses Modell sehr wendig. Da diese Bauform nicht so flugstabil ist, befindet sich bei jedem Motor ein Gyroskop (Lagesensor), um die Bewegung bzw. die Änderung der Fluglage zu erkennen. Dabei liefert der Sensor die Lagedaten und überträgt diese an den Flugregler, der anhand der Daten den Schub der einzelnen Rotoren variiert. Weiters wird im Sternpunkt ein weiterer Servo inklusive Lagesensoren angebracht, um den hinteren Rotorkopf schwenkbar zu machen. Dadurch wird der Tricopter besonders wendig und agil [98]. Somit sind Tricopter primär für spektakuläre Flugmanöver geeignet.

Tabelle 3.3: Vor- und Nachteile von Tricoptern

Vorteile	Nachteile
Sehr wendig und agil	Wenig Payload möglich
Nach vorne ein uneingeschränktes Blickfeld, durch die T-, bzw Y-Form	Bei Ausfall eines Rotors Gesamtverlust des Systems – keine Redundanz

Quadcopter:

Quadcopter verwenden vier Rotoren. Um mehr Stabilität zu erreichen, werden die Motoren gegengleich montiert, das bedeutet, benachbarte Rotoren drehen sich entgegengesetzt.

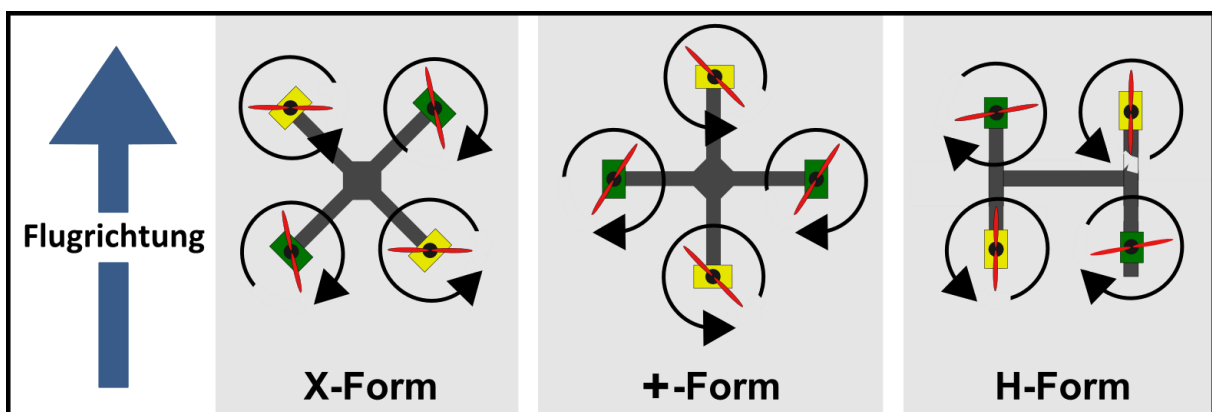


Abbildung 3.10: Quadcopter – Formen [99]

Dadurch erreicht man, dass sich die durch die Rotationskraft entstehenden Momente ausgleichen, da sich jeweils die Hälfte der Rotoren in die eine und die andere Hälfte in die andere Richtung bewegen. Dabei ergeben sich unterschiedliche Anordnungsmöglichkeiten die mit X-Form, +-Form und H-Form bezeichnet werden [99]. Die X- sowie H-Form bringt für die Montage einer Kamera Vorteile, da man ein freieres Sichtfeld hat. Die +-Form ist aufgrund der Anordnung der Rotoren etwas leichter zu steuern.

Die häufigste Form von kommerziellen Quadcoptern ist die X-Form. Letztendlich kann der Anwender aber auch zwischen X- und +-Form mittels einer Änderung der Software im Flugcontroller hin und her wechseln.

In vielen Fällen werden Quadcopter für das Mitführen einer Kamera eingesetzt. Angefangen von Hobbypiloten, professionellen Fotografen bis hin zu Behörden und Filmemachern greifen heute viele gerne zu Quadcoptern. Die einfache Steuerung und die Möglichkeit, relativ stabil die Position zu halten, sorgen dafür, dass Quadcopter für Luftaufnahmen sehr gut geeignet sind.

Tabelle 3.4: Vor- und Nachteile von Quadcoptern

Vorteile	Nachteile
Leicht zu bedienen	Keine Redundanz gegeben, bei Ausfall eines Motors droht ein Absturz
Vielzahl von Modellen verfügbar	Limitiert im Payload
Vibrationsarm und gutes Hovern möglich	Nicht energieeffizient

Hexacopter

Hexacopter verwenden sechs Rotoren. Das bringt den Vorteil, dass man mehr Schub erzeugen kann. Somit kann man mit Hexacoptern deutlich mehr Payload transportieren als ein Quadcopter.

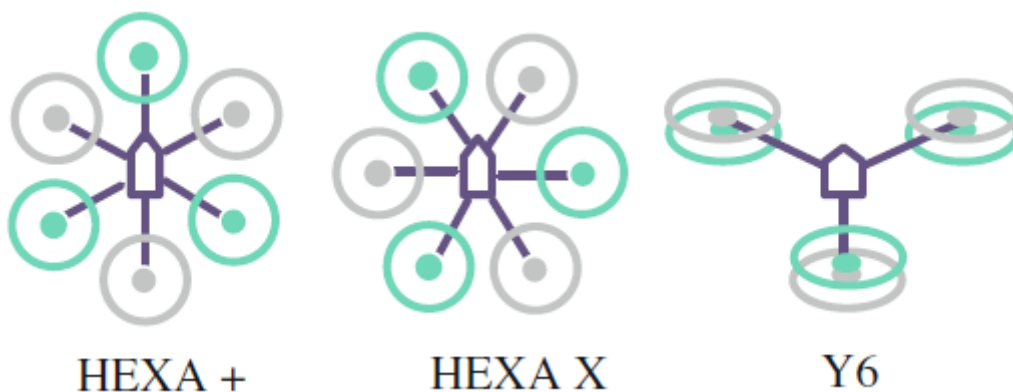


Abbildung 3.11: Mögliche Formen von Hexacoptern [97]

Weiters erhält man durch die höhere Anzahl an Motoren sowohl mehr Stabilität im Flug als auch eine Redundanz. Das bedeutet, bei Ausfall eines Motors kann man den Hexacopter noch steuern und notlanden. Hexacopter unterstützen eine größere Flughöhe, jedoch eine

geringere Manövrierbarkeit als Quadcopter. Hexacopter können in der +-Form, der X-Form, oder auch in Y- Form geflogen werden.

Durch ihre guten Flugeigenschaften und die hohe Tragfähigkeit sind diese Modelle besonders für Filmaufnahmen gefragt. Die Kehrseite sind die höheren Anschaffungs- und Wartungskosten, die den Faktor drei schnell überschreiten.

Tabelle 3.5: Vor- und Nachteile von Hexacoptern

Vorteile	Nachteile
Größerer Payload möglich (Im Vergleich zu Quadcoptern)	Teuer in der Anschaffung
Vielzahl von Modellen verfügbar	Teuer in der Wartung
Redundanz, bei Ausfall eines Motors kann noch sicher gelandet werden	Nicht energieeffizient

Octocopter

Der Schritt vom Hexa- zum Octocopter erweitert im Prinzip die Vorteile des Hexacopters, wie auch dessen Nachteile. Mit acht Rotoren lässt sich noch mehr Schub erzeugen und somit verwendet man Octocopter speziell im Schwerlast- und Profi-Filmbereich. Durch die Redundanz der vielen Rotoren geben Sie eine entsprechende Sicherheit für hochpreisiges Filmequipment. Der Nachteil sind hohe Kosten für die Anschaffung und Wartung.

3.1.4 VTOL-UAV

VTOL steht für Vertical Take Off and Landing. Es handelt sich dabei um senkrecht startende, bzw. landende UAVs. Das trifft prinzipiell auf jede Form eines Single-Rotor- oder Multicopter UAV zu. Im Speziellen werden in dieser Kategorie jedoch UAVs bezeichnet, die eine Kombination von Multicopter und Starrflügel UAV darstellen. Die Idee dahinter ist die Kombination der Vorteile beider Bauformen: Senkrecht Starten/Landen und Schweben einerseits sowie energieeffizienter Langstreckenflug andererseits.

Gerade diese Eigenschaften machen diese Modelle sehr interessant für Kartographie- und Überwachungs-Einsätze. Der Vorteil ist der einfache Start- und Landeprozess. Sobald man das Modell in der Luft hat, kann durch den sparsamen eigenstabilen Flug eine hohe Endurance erzielt werden. Es gibt mittlerweile (Stand Jänner 2021) viele kommerzielle Anbieter von VTOL-UAVs für genau die zuvor genannten Einsatzzwecke [100–102]. Dabei gibt es unterschiedliche Entwicklungen in Bezug auf die eingesetzte Technik. Auf der einen Seite werden an klassischen Starrflügel UAVs zusätzliche Motoren in einer Multicopter Bauform (Meist H-Form) montiert, um dadurch die Manövrierbarkeit eines Multicopters zusätzlich zu erreichen (Abbildung 3.12 links). Man muss bei dieser Variante weitere Motoren am UAV anbringen. Die Flugregelung ist komplexer als bei reinen Starrflügel- und Multicopter UAVs. Bei dieser Variante ist diese jedoch im Vergleich zum nächsten Modell einfacher. Nachdem dieses Modell die gewünschte Flughöhe erreicht hat, kann fließend in einen Flächenflug übergegangen werden. Die Motoren für den Senkrechtstart werden dann abgestellt. Der Rumpf des UAVs bleibt dabei immer in der gleichen Lage.

Auf der anderen Seite gibt es Modelle, die den Antrieb umschaltbar ausführen. Das bedeutet, dass die Arme, an denen die Motoren montiert sind, schwenkbar sind. Das VTOL-UAV startet senkrecht und schwenkt dann in der gewünschten Flughöhe die Motoren. Der Flugregler muss hierbei entsprechend ausgelegt sein, dass ein fließender Übergang von Schwebeflug zu Reiseflug ermöglicht wird. Dabei ändert je nach Modell der gesamte Rumpf die Lage. Ein solches Modell ist in Abbildung 3.12 (Mitte und rechts) zu sehen.



Abbildung 3.12: Unterschiedliche VTOL-Varianten [103]

Es gibt noch weitere VTOL-Modelle, auf die hier nicht weiter eingegangen wird. VTOL-UAVs erfreuen sich besonders im Surveillance Anwendungsbereich hoher Beliebtheit. Daher verlangen die Hersteller von VTOL-UAVs im Vergleich zu klassischen UAVs einen enormen Aufpreis. Da oftmals kein ausreichend großer Platz für Start und Landung von Starrflügel UAVs vorhanden ist, bieten diese UAV Modelle für diese Einsatzzwecke erhebliche Vorteile.

Tabelle 3.6: Vor- und Nachteile von VTOL-UAVs

Vorteile	Nachteile
Einfacher Start und Landevorgang	Teuer in der Anschaffung
Energieeffizienter (eigenstabiler) Flug	Teuer in der Wartung
Hohe Endurance (vor allem im Vergleich zu Multicoptern)	Komplexe Regelung (bleibt dem Anwender meist verborgen)

3.1.5 Autonomes Flugtaxi

Die mitunter spektakulärsten Neuvorstellungen im Bereich personentragende UAVs waren in den letzten Jahren die Präsentationen der sogenannten Flugtaxis. Im September 2019 gab es z.B. in Stuttgart auf dem „Vision Smart City“ Event den Erstflug des Volocopters [84]. Die oberösterreichische Firma FACC kündigte 2018 an, die Produktion der Ehang Modelle (siehe Abbildung 1.1) in Europa zu übernehmen [104]. FACC plant, diese Modelle in Österreich zuzulassen und im Laufe des Jahres 2021 den Probetrieb über unbebautem Gebiet zu starten [105]. In Deutschland gibt es neben Volocopter auch weitere namhafte Hersteller, die versuchen, in den sich noch in der Entwicklung befindenden Markt vorzustoßen. Die Firma Airbus hat z.B. den CityAirbus 2019 präsentiert. Dieses Modell soll vier Personen ca. 15 Minuten lang transportieren können. Mit 8 fixed-pitch-Rotoren und 8 100 kW Motoren, einer Größe von 8x8 Metern und einem Gewicht von 2,2 Tonnen ist das Airbusmodell ein Riese unter den geplanten Flugtaxis [106].



Abbildung 3.13: Der CityAirbus [84]

Es gibt weltweit noch viele weitere Hersteller. Neben den bereits genannten Modellen, die alle auf dem Multicopter Prinzip beruhen, gibt es auch andere Entwicklungen. Die Münchner Firma Lilium GmbH entwickelt etwa einen Lilium Jet, mit einer Vielzahl von Elektromotoren in schwenkbaren Flügeln hat. Somit ist der Lilium Jet ein VTOL-UAV. Er soll 5 Personen transportieren können, hat eine Maximalgeschwindigkeit von 300 km/h und soll eine Stunde Flugdauer bieten. 2017 hob der erste Prototyp ab und es ist geplant, 2025 in den Probetrieb zu gehen [84].



Abbildung 3.14: Der Lilith Jet soll 2025 in den Probetrieb gehen [84, 107]

Weitere Modelle wären der mittels Brennstoffzelle angetriebene Skai der US Firma Alaka'i Skai, der Nexus der US Firma Bell oder der PAV der US Firma Boeing [84]. Die Firma Bell geht gleich einen Schritt weiter. Es wird nicht nur an dem eVTOL Bell Nexus 4EX gearbeitet, sondern gleichzeitig auch mit einem eigens dafür angestellten Softwareteam ein Infrastrukturmanagement namens AerOS entwickelt. Damit will man die Organisation und Buchung der Flüge bis hin zur Wartung gleich vom Start weg als ein „Mobility-as-a-Service“ anbieten. Aus diesem Grund wurde eine Partnerschaft mit Uber eingegangen [108].

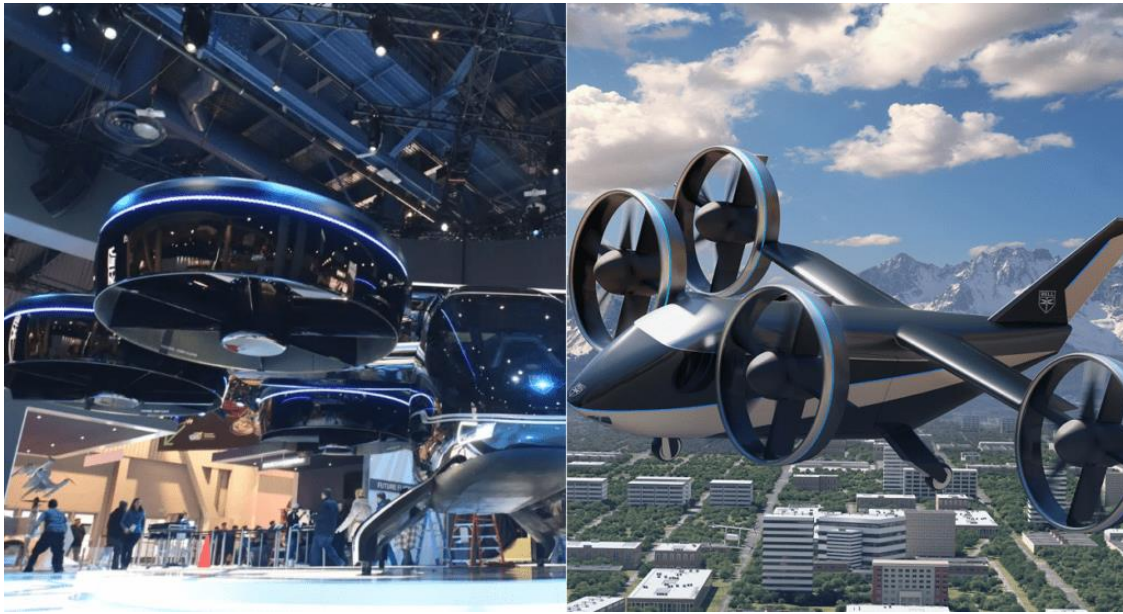


Abbildung 3.15: Der Bell 4EX soll 2023 als „Mobility-as-a-Service“ an den Start gehen [108]

Da mit den neuen Regularien (siehe 2.3) die Zulassungsrichtlinien für diese Flugmodelle (Kategorie CERTIFIED, Kapitel 2.3.3) vereinheitlicht werden sollen, ist zu erwarten, dass, sobald die erste Zulassung erteilt wird, es noch viele weitere Firmen geben wird, die in diesen Markt vorstoßen möchten. Seitens der EASA wurden 2019 Sonderbedingungen für die Zulassung von Hybrid VTOL-Flugzeugen, die Kategorie für diese Flugtaxi, veröffentlicht [109].

		Failure Condition Classifications			
Maximum Passenger Seating Configuration		Minor	Major	Hazardous	Catastrophic
Category Enhanced	-	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL B	$\leq 10^{-9}$ FDAL A
Category Basic	7 to 9 passengers	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL B	$\leq 10^{-9}$ FDAL A
	2 to 6 passengers (see note A)	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL C	$\leq 10^{-8}$ FDAL B
	0 to 1 passenger (see note A)	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-6}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL C

[Quantitative safety objectives are expressed per flight hour]

Abbildung 3.16: Die EASA-Sicherheitsziele für verschiedene Ausfallbedingungen, definiert nach Flugstunden [109]

Darin werden auch quantitative Sicherheitsziele für unterschiedliche Flugzeugkonfigurationen angegeben. Diese sind an die hohen Safety-Anforderungen der Luftfahrt angelehnt und beinhalten eine Klassifizierung der Ausfallbedingungen nach Flugstunden, wie in Abbildung 3.16 zu sehen ist. FDAL steht dabei für *Functional Development Assurance Level* aus der ARP4754A [110], die die essenziellen Richtlinien für die Entwicklung von Flugzeugsystemen darstellen und von der SAE (ehemals Society of Automotive Engineers) und EUROCAE 2010 veröffentlicht wurden.

Die Frage nach dem allgemeinen Bedarf und einer breiten Akzeptanz in der Bevölkerung für diese neue Technologie wird hier nicht thematisiert. Es gilt jedenfalls zu bedenken, dass einerseits große technische und rechtliche Hürden noch zu bewältigen sind, ehe eines dieser Modelle offiziell abheben kann bzw. darf. Ab dann wird es neue Fragen zu klären geben: wo werden diese Luft-Taxis fliegen (In welchen Städten? Gibt es eigene Flugkorridore?), wie laut werden diese sein, wann dürfen sie fliegen (Sind Nachtflüge erlaubt?), wo sollen sie starten und landen etc.

3.2 Flugregler

Der Flugregler (Flight Control System – FCS) bildet die zentrale Recheneinheit eines modernen UAVs. Im Modellflug ist bei Starrflügel-Modellen meist nur ein Empfänger am Flugmodell verbaut, der die Steuersignale des Piloten direkt an die Servos und Motoren weitergibt. Bei modernen UAVs, vor allem Multicoptern und VTOL-UAVs, ist durch das einzelne Ansteuern von Motoren ein Flug nicht mehr möglich. Ein Flugregler übernimmt dabei die Aufgabe der Flug-Regelung und wandelt die Steuersignale des Piloten in entsprechende Steuersignale für die einzelnen Motoren um. Das FCS verfügt über Lagesensoren, sogenannten IMUs (Inertial Measurement Unit), GNSS Empfänger, Barometrischen Drucksensoren und einem Microcontroller inklusive vieler weiterer Schnittstellen. Auf dem Microcontroller läuft eine entsprechende Autopiloten Software, in der die Flugregelung, meist basierend auf Proportional-Integral-Differenzial (PID) Regelung, umgesetzt ist. Je nach Flugmodell werden die Parameter der Software leicht verändert, um so die Regelung anzupassen [97].

Der große Vorteil, der sich durch den Einsatz von Flugreglern ergibt, ist, dass das Steuern des UAVs erheblich vereinfacht wird, da der Flugregler für eine allzeit stabile Lage des UAVs sorgt. Der Pilot muss daher nur noch Richtungen vorgeben, die der Regler in Steuerkommandos für die Motoren sowie Servos übersetzt. Diese Eigenschaft ist die Voraussetzung für einen autonomen Flug. Dabei wird dem Regler für eine Mission eine Anzahl an Flug- bzw. Wegpunkten übermittelt. Diese beinhalten die geographischen Koordinaten sowie die Höheninformation. Vor dem Flug kann man weitere Parameter festsetzen wie Steig- und Sinkgeschwindigkeit, Steig- und Sinkwinkel, Reisegeschwindigkeit, Kurvenradien und viele mehr. Der Regler muss dabei die folgenden Aufgaben erfüllen [97]:

1. **Wahrnehmung:** Anhand von GNSS, Höhe- und Lage-Sensorik muss der Regler jederzeit in der Lage sein, die aktuelle Position des UAVs festzustellen. Die Refresh-

Raten der Sensoren liegen bei 5 (GPS) bis 1000 Hz (IMU). Der Regler muss aus dieser Information die Position sowie die Lage in der Luft berechnen.

2. **Kontrolle:** Der Regler muss anhand der Vorgaben des Piloten bzw. der Wegpunkte der Mission basierend auf seiner aktuellen Lage berechnen, wie das UAV weiter vorankommt. Dabei müssen die Steuersignale für die Motorsteuerung (ESC) genauso wie die für die Servos berechnet werden.
3. **Entscheidung:** Vor allem im autonomen Modus muss anhand der aktuellen Lage und des Zustandes des UAVs jederzeit entschieden werden wie das UAV zum nächsten Wegpunkt kommt, ob der Wegpunkt erreicht werden kann und ob im Fehlerfall ein Notfallprogramm (z.B. return home) gestartet wird.

Der Flugregler stellt somit die Hauptkomponente in einem UAV dar. Dies führt automatisch dazu, dass an dieser Stelle Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden müssen, um einen Ausfall zu verhindern. Ein Ausfall eines Flugreglers führt zwangsläufig zum Absturz des UAVs, deshalb gibt es in jedem Flugregler gewisse Redundanzen. Dazu zählen unter anderem mehrfach ausgeführte Sensorik, redundante Stromversorgung und Notfallalgorithmen.

Die Auswahl an Flugreglern ist mittlerweile groß. Einerseits sind kommerzielle Flugregler wie z.B. von Micropilot [111] verfügbar und andererseits haben sich große Open Source Plattformen namens Pixhawk [112] und ArduPilot [113] entwickelt. Pixhawk hat die Pixhawk Reference Standards für UAV Hardware veröffentlicht, nach der kompatible Hardware frei entwickelt werden kann. ArduPilot setzt vermehrt auf die Unterstützung von Linux basierten Single-Board-Computern (SBC) mit entsprechenden Erweiterungen für den Einsatz als Flugregler. Beide sind mit Open Source UAV Software wie Px4 [114] oder ArduPilot [115] kompatibel. Für weitere Informationen zu den weiteren Open Source Flugreglern, z.B. Skarky2 oder Paparazzi sei auf [116, S. 11-20] verwiesen. Der Vorteil kommerzieller Flugregler ist, dass für den Zulassungsprozess Funktionsparameter garantiert werden und im Problemfall der Hersteller kontaktiert werden kann. Diese Systeme sollen einfach funktionieren und zuverlässig – „Plug-and-Play“ – sein. Kommerzielle Systeme wie z.B. von DJI gehen sogar noch einen Schritt weiter und haben Monitoring Systeme aktiv, die falsche Steuerbefehle seitens des Piloten nicht annehmen. Durch ein optisches System zur visuellen Hinderniserkennung namens Guidance werden Kollisionen über den Flugregler verhindert [117]. Dadurch können auch nicht geübte Personen mit Hilfe dieser Flugregler das UAV steuern. Diese Systeme weisen dafür keine Programmier-Schnittstellen (Application Programming Interfaces – APIs) auf, um etwas am System zu adaptieren. Im Gegensatz dazu erfolgt durch die große Verbreitung von Open Source Plattformen wie z.B. Pixhawk im kommerziellen wie auch im Hobbybereich, dass diese kontinuierlich weiterentwickelt werden. Durch die vielen unfallfreien Flugstunden wächst das Vertrauen in die Plattformen. Der große Vorteil der Open Source Hardware sind deren frei zugängliche APIs. So können versierte Anwender den Flugregler auf ihre Bedürfnisse hin vollständig anpassen. Die Hardware des Pixhawk4 ist in der folgenden Tabelle 3.7 zusammengefasst.

In den letzten Jahren gab es vielseitige Open-Source-Flugregler-Software-Entwicklungen. Manche Versionen waren eher spezialisiert auf bestimmte Airframes bzw. Anwendungen (FPV

UAVs). Einen Überblick über aktuell noch weiterentwickelte Software ist ebenfalls in [116, S. 11-20] zu finden.

Tabelle 3.7: Hardware des Pixhawk4 (FMUv5) [112]

Hardware	Eigenschaften
Hauptprozessor STM32F765	32 Bit Arm® Cortex®-M7, 216MHz, 2MB Speicher, 512KB RAM
IO Prozessor STM32F100	32 Bit Arm® Cortex®-M3, 24MHz, 8KB SRAM
Sensoren	<ul style="list-style-type: none"> • Beschl./Gyro: ICM-20689 • Beschl./Gyro: BMI055 • Magnetometer: IST8310 • Barometer: MS5611
GPS - ublox Neo-M8N	GPS/GLONASS Empfänger; integriertes Magnetometer IST8310
Schnittstellen	<ul style="list-style-type: none"> • 8-16 PWM Ausgänge (8 vom IO, 8 von der FMU) • 3 dedizierte PWM/Capture Eingänge an der FMU • Dedizierte R/C Eingänge für CPPM • Dedizierte R/C Eingänge für Spektrum / DSM und S.Bus mit analog / PWM RSSI Eingang • Dedizierter S.Bus servo Output • 5 general purpose serial Ports (GPIO) • 3 I2C Ports • 4 SPI Busse • Bis zu 2 CAN Busen für dual CAN mit serielltem ESC • Analoge Eingänge für die Spannung / Strom von 2 Batterien
Energie System	<ul style="list-style-type: none"> • Power Modul Output: 4,9 ~ 5,5 V • USB Power Input: 4,75 ~ 5,25 V • Servo Rail Input: 0 ~ 36 V
Abmessungen/Gewicht	<ul style="list-style-type: none"> • Gewicht: 15,8 g • Abmessungen: 44x84x12 mm
Temperaturbereich	<ul style="list-style-type: none"> • -40 ~ 85° C

Zwei Software-Varianten sind vielseitig in Bezug auf Umfang und Anwendung auf verschiedene Airframes und somit stark verbreitet, Px4 und ArduPilot. Px4 startete 2008 als ein Projekt eines Studenten der ETH Zürich, Lorenz Meier [118].

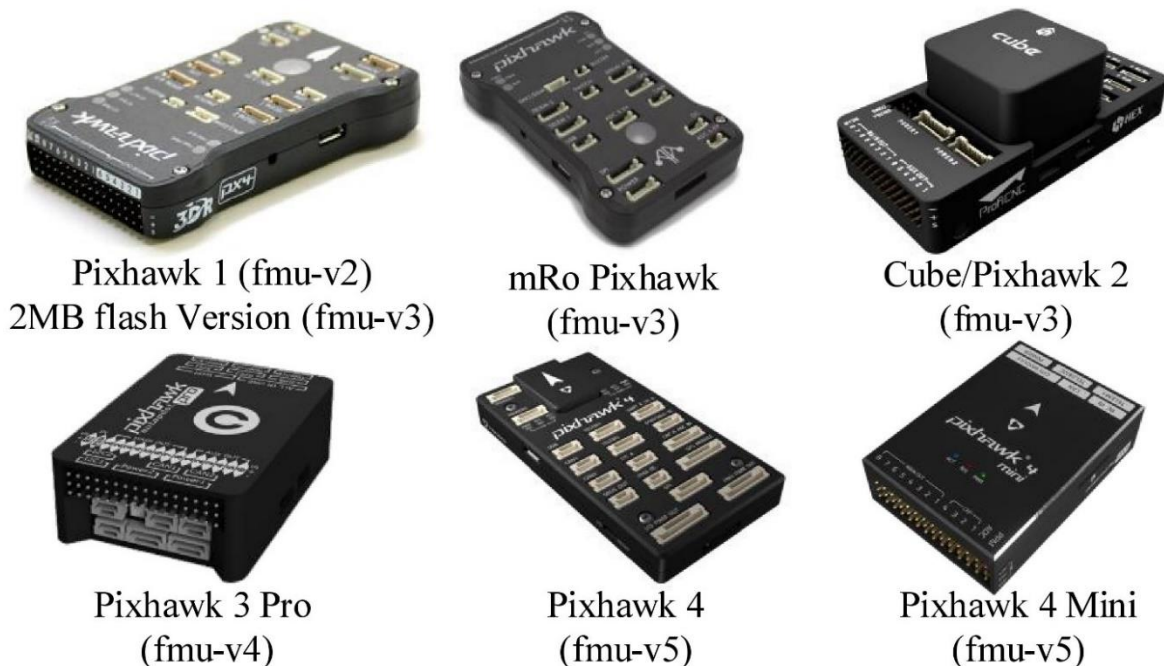


Abbildung 3.17: Übersicht über verschiedene Pixhawk Modelle [119]

Das Team rund um Meier gewann den Micro Air Vehicle Competition Preis mit ihrer selbst gebauten Hard- und auf Open Source Treibern basierenden Software, dem sie den Systemnamen **Pixhawk** gaben. 2011 wurde die Hard- und Software getrennt. Die Software musste aufgrund von nicht kompensierbaren Fehlern nochmals von Grund auf neu geschrieben werden und im Jahr 2013 war die erste stabile Version der Px4 Software geboren. Parallel dazu wurden die ersten beiden Hardware Varianten des Pixhawk entwickelt, die mit Flight Management Unit Version 1 und 2 (FMUv1 und FMUv2) benannt wurden.

In einer Kooperation mit 3D Robotics und auch aufgrund der Öffnung der Hardware gegenüber der ArduPilot Software konnte eine weitere Verbreitung erreicht werden. Es wurde 2014 die Dronecode Foundation gegründet, in der die Entwicklung der Px4 Software, sowie des MAVLink Protokolls, der MAVSDK und Bodenkontrollstations-Software QGroundControl Station auf wirtschaftlich unabhängiger Open Source Basis vorangetrieben werden sollte. Die Px4 Community umfasste 2019 knapp 10000 Anwender, 600 Personen, die aktiv an der Entwicklung beteiligt sind, und es wurden gemeinsam über 1,5 Millionen Zeilen Code geschrieben. Um die Open-Source-Idee zu erhalten und auch voranzutreiben wurde die Firma Auterion gegründet.

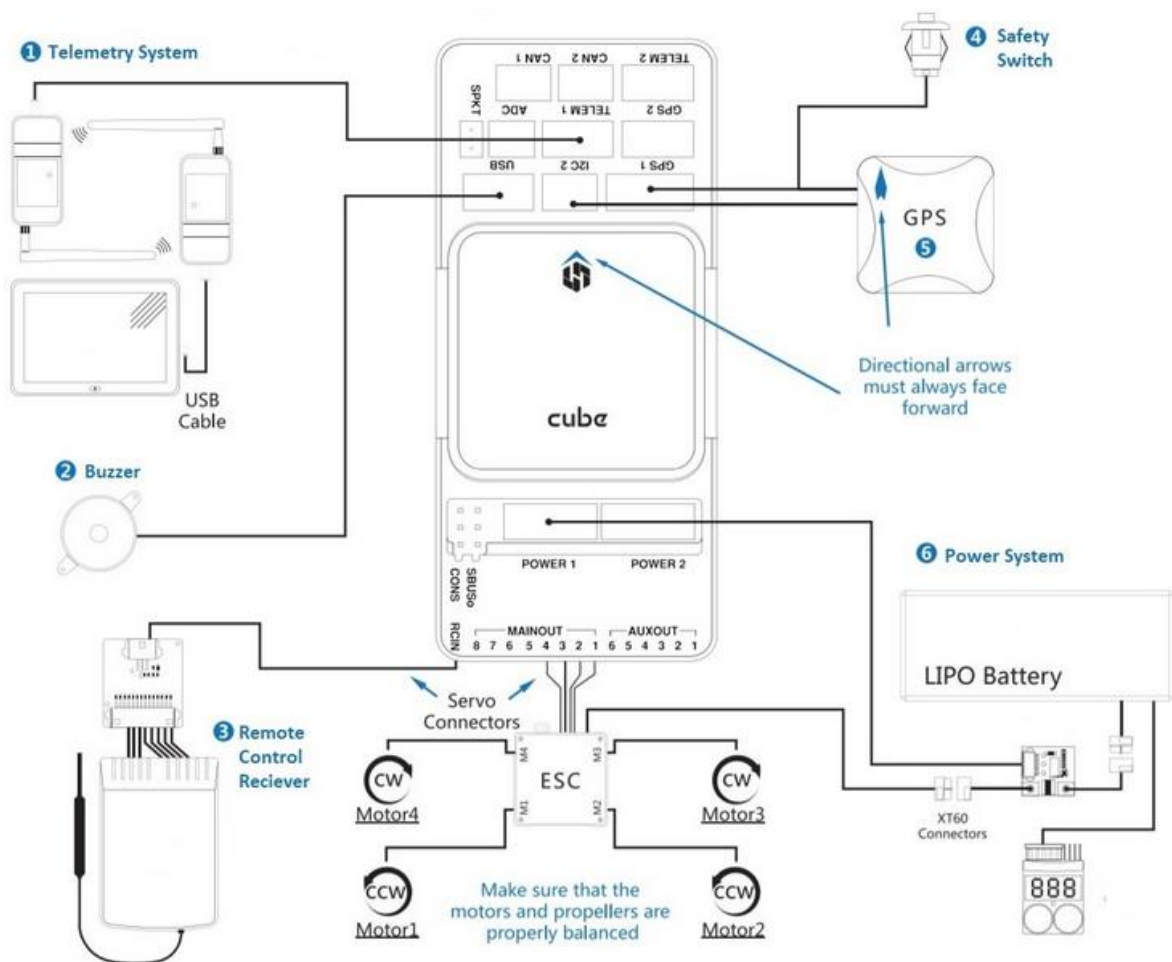


Abbildung 3.18: Hex Cube Black Verdrahtung

Das nächste Ziel von Auterion ist das Produkt Skynode, ein voll industrietauglicher Flugregler basierend auf Px4, MAVLink und der MMUv5 [120]. **MAVLink** ist dabei ein leichtgewichtiges Nachrichtenprotokoll, das speziell für die Kommunikation für UAVs entwickelt wurde. Nachrichten werden dabei im XML-Format zwischen MAVLink Systemen ausgetauscht. Ausgehend von einer Referenzvariante, einem sogenannten common.xml, kann man die XML-Dateien für Systeme spezifizieren und erhält „Dialekte“ [121]. Die Hardware, auf der die Px4 Software läuft, umfasst unterschiedliche Pixhawk Varianten wie dem Holybro Pixhawk 4 (FMUv5), Drotek Pixhawk 3 Pro (FMUv4), Hex Cube Black (FMUv3) und einige mehr. Um einen Eindruck des Aufbaus der UAV Hardware mit einem Pixhawk zu bekommen, ist in Abbildung 3.18 eine Hex Cube Black Verschaltung angeführt.

ArduPilot startete mit der Gründung von 3D Robotics 2009 [113]. Chris Anderson und Jordi Munoz veröffentlichten im selben Jahr das erste ArduPilot Board sowie die dazu passende ArduPilot Software. 2010 wurde der ArduPilot 1 (APM1) über 3D Robotics veröffentlicht. Die Entwicklung weiterer Versionen folgte und 2012 wurde die Hardware auch für alternative Software zugänglich gemacht. 2016 wurde die unabhängige ArduPilot Foundation als Non-Profit Organisation gegründet. Nach Unstimmigkeiten mit DroneCode wurde die ArduPilot Partners Group gegründet, über die die Software kontinuierlich weiterentwickelt wird. Diese ist auch abseits von UAV Anwendungen einsetzbar. Das ArduPilot Projekt entwickelte auch die Bodenkontrollstations-Software Mission Planner [122]. Die ursprünglich selbst entwickelte Hardware wurde für die rechenintensive Software zu langsam.

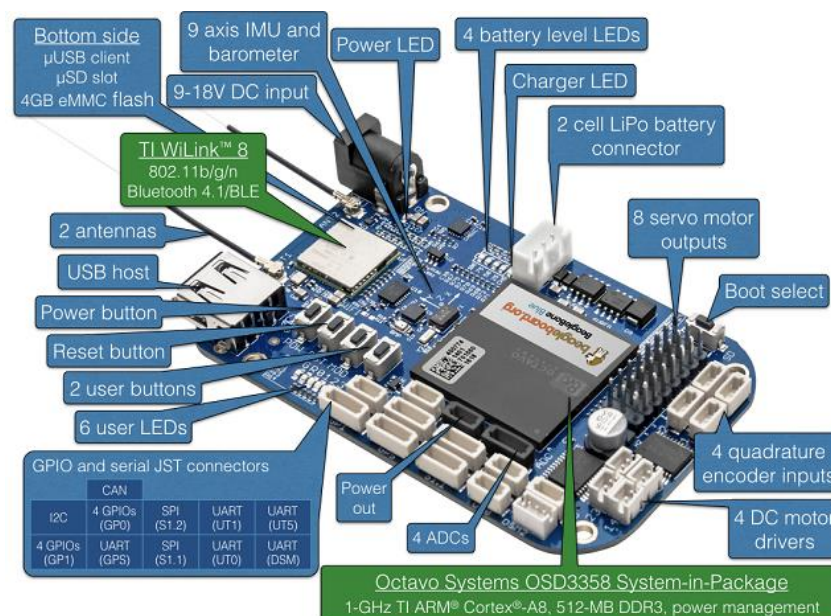


Abbildung 3.19: Der Beagle Bone Blue [123]

So fokussierten sich die Entwickler in Richtung Linux *Single-Board-Computer* (SBC). Der Beagle Bone Blue wäre hier als Beispiel zu nennen. Dieses System ist ein SBC mit einem ARM-Cortex-A8 SOC mit 1 GHz, 512 MB Ram, 4 GB eMMC Speicher und zwei 32-Bit 200 MHz programmierbaren Echtzeit-Einheiten (programmable real-time-units, PRUs). Neben

einer IMU und einem Barometer sind viele Schnittstellen für Erweiterungen vorhanden. Weiters ist 802.11bgn Wi-Fi sowie Bluetooth 4.1 integriert. Das System läuft mit einer Debian Linux Distribution [123].

Eine weitere Hardware, auf der die ArduPilot Software läuft, wäre der NAVIO2. Das NAVIO2 ist dabei lediglich ein Shield für einen Raspberry SBC, das die nötige Sensorik, Schnittstellen und einen I/O Co-Prozessor beherbergt und somit einen Raspberry Pi in einen Flugregler umwandelt. Diese Systeme zeigen, dass ein Flugregler mittlerweile schon eine recht hohe Rechenkraft besitzt und mitunter komplex aufgebaut ist. Auf den Webseiten der beiden großen Softwarelieferanten Px4 und ArduPilot sind dutzende Projekte verlinkt und Dokumentation für beliebige UAV Airframes ist in großem Ausmaß verfügbar. Weiters gibt es durch die breite Community auch immer die Möglichkeit, sich über diverse Foren auszutauschen. Für private Anwender bieten diese Plattformen einen leichten Einstieg in die Steuerung von UAVs. Für professionelle und kommerzielle Anwender bieten diese Plattformen spezielle Software Development Kits (SDKs), mithilfe derer eine Vielzahl an Funktionen manuell spezifiziert werden können. Dies erfordert jedoch gute Programmierkenntnisse und ein Verständnis des Gesamtsystems.

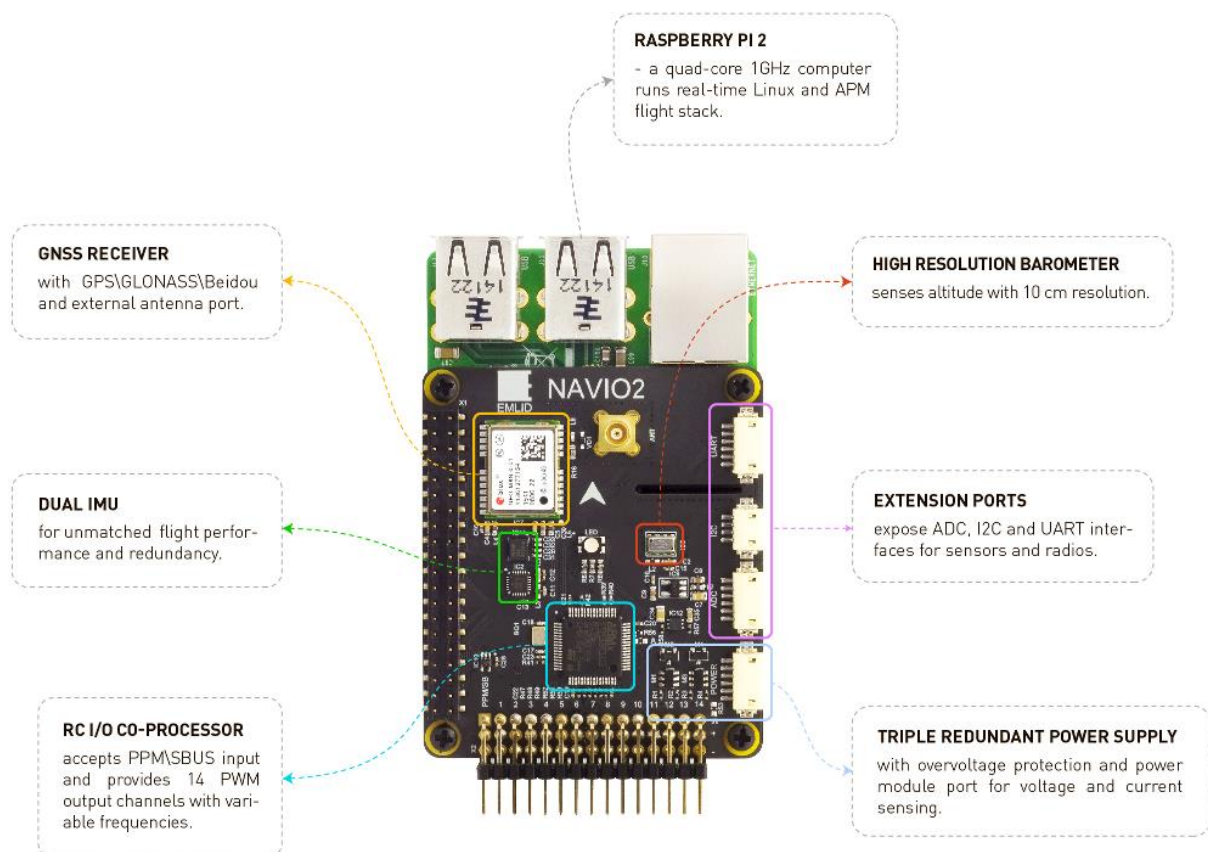


Abbildung 3.20: Ein Raspberry Pi 2 mit dem NAVIO2 Shield [124]

3.3 Bodenstation

Im kommerziellen Bereich kann eine UAV-Mission nicht mehr ohne eine Bodenstation (Ground Control Station – GCS) durchgeführt werden. Eine GCS dient dem Piloten als Unterstützung, um den Flug sicher durchführen zu können. In der Flugvorbereitungsphase wird die Karte des Operationsgebiets in die GCS Software geladen. Es können schon vor dem Flug diverse Fixpunkte der Mission angegeben werden, wie Startpunkt (Home), diverse Wegpunkte sowie ein Geofencing, also eine Definition von Flugverbotszonen. Noch vor dem Start hilft die GCS dem Piloten den Status des UAVs zu überprüfen und den Flugregler zu initialisieren. Wichtig ist dabei unter anderem das Kalibrieren eines Drucksensors oder Geschwindigkeitssensors. Während des Fluges kann der Pilot mit der Bodenstation den Zustand des UAVs kontrollieren. Dabei werden dem Piloten die Telemetrie-Informationen wie Geschwindigkeit über Grund (Speed over Ground – SoG), Höhe über Grund (Above Ground Level – AGL), Absolute Höhe, GNSS-Position, Akkustand, Steigrate etc. angezeigt. Meist wird auch eine Karte eingeblendet, auf der das UAV sich als Symbol bewegt. Dabei ist der bereits geflogene Pfad als Linie eingezeichnet und kommende sowie bereits passierte Wegpunkte sind gekennzeichnet. In manchen Fällen ist es auch möglich, je nach Ausstattung des UAVs, sich auch ein Live Bild anzeigen zu lassen. Am Ende des Fluges kann der Pilot die Logfiles extrahieren und darin alle Daten des Fluges finden. Damit kann man den Flug im Nachhinein auch auf der GCS simulieren.



Abbildung 3.21: DJI Groundstation (GS) Pro auf einem iPad [125]

Als Hardware kommen unterschiedliche Systeme zum Einsatz. Kommerzielle UAV Hersteller wie z.B. DJI setzen für Private und Semi-Professionelle Anwender auf Handheld Geräte als Bodenstation. Dabei wird z.B. ein Smartphone oder Tablet direkt an die Fernsteuerung geklemmt. Das Device ist entweder per Kabel und/oder drahtlos mit der Steuerung verbunden. Hierbei werden die gesamten Daten des UAVs über einen Datenlink zwischen dem UAV und dem Controller gesendet. Der Controller übergibt die Telemetriedaten dann an die GCS App, die die Anzeige am Tablet veranlasst [125]. Während DJI hier auf Geräte der Firma Apple setzt, stellen andere Anbieter auch GCS-Software für Android bereit. Als Beispiel dazu wäre die Firma UAventure genannt [126]. Diese Firma vertreiben Komplettlösungen für Starrflügel, Multicopter und VTOL-UAVs. Darunter fallen auf der Px4 Software basierende Flugregler und eine für Android geschriebene Software als GCS.

Für einfache Missionen mögen diese auf Touch basierenden Systeme ausreichend sein. Im professionellen Einsatz wird man bevorzugt auf computergestützte Systeme zurückgreifen. Die im vorigen Kapitel genannten Flugregler-Software Hersteller Px4 und ArduPilot entwickelten jeweils eine eigene GCS-Software. Seitens Px4 wurde die QGroundControl Software [127] entwickelt. Diese ist auf Windows, Mac, Linux und den mobilen Betriebssystemen Android und iOS lauffähig. Es wird sowohl die ArduPilot als auch die Px4 Software unterstützt, sowie auch jede weitere Flugregler-Software, die über das MAVLink Protokoll kommuniziert.

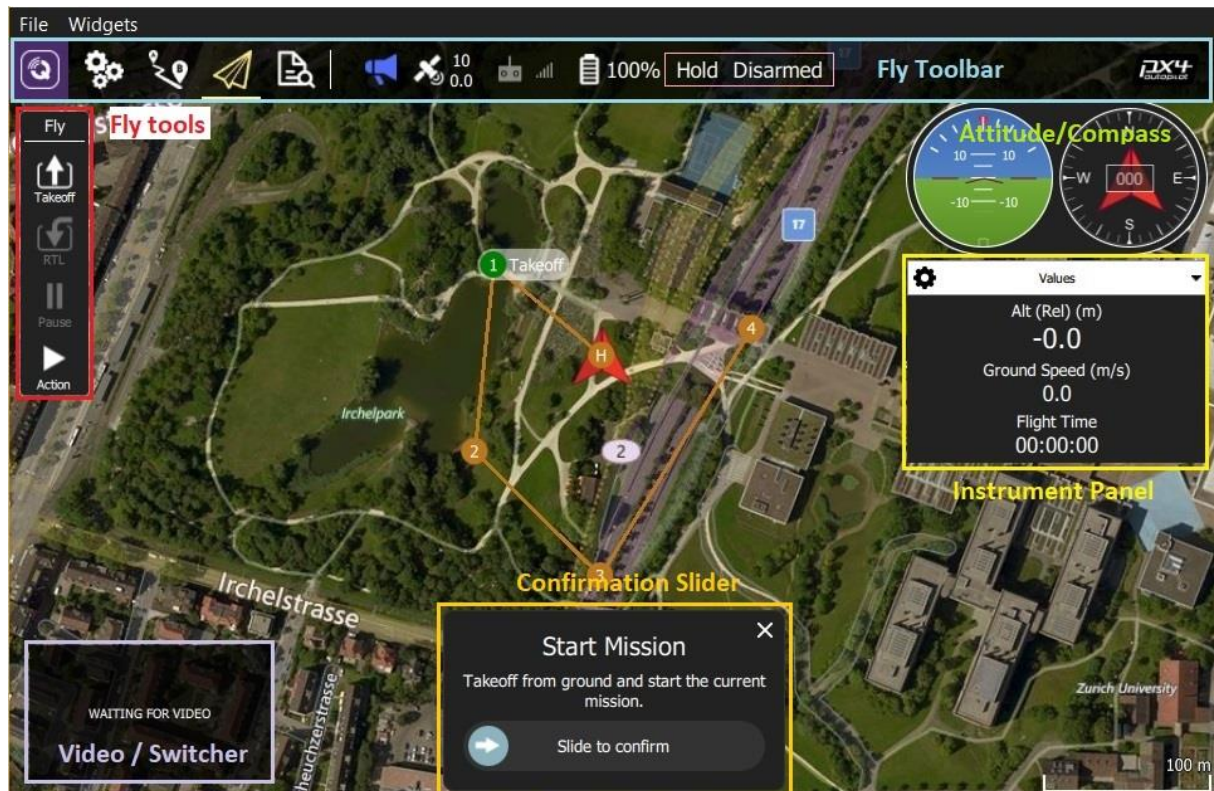


Abbildung 3.22: Eine zuvor programmierte Mission in der QGroundControl Software starten [127]

Der Umfang der jeweiligen Software ist enorm. Es bedarf einer gewissen Einarbeitungszeit. Das UAV muss dazu als erstes über einen Telemetrie Datenlink mit der Bodenstation verbunden sein. Wenn die Verbindung erfolgreich hergestellt ist, sieht man sofort den Status

des UAVs. Es können eine Vielzahl an Parametern (adaptierbar) wie Höhe, Geschwindigkeit, Steig-/Sinkgeschwindigkeit, Lage, Akkukapazität, aktueller Stromverbrauch etc. angezeigt werden. Zusätzlich gibt es einen künstlichen Horizont, der an die klassische Luftfahrt angelehnt ist. Bei Erstinbetriebnahme ist es wichtig, in der Software den entsprechenden Airframe des UAVs (z.B. Starrflügel-, Quad- oder Hexacopter UAV) auszuwählen. Dazu gibt es einsteigsfreundliche Menüs in der jeweiligen Software. Anschließend gilt es, die Sensorik zu kalibrieren, dazu gibt es eine Anleitung. Es gilt auch, die Fernsteuerung (Remote Controller – RC) auf die Vorlieben des Piloten anzupassen. Sind alle Vorbereitungen getroffen, muss das UAV innerhalb der Software aktiviert werden. Das wird durch die Funktion „Arm“ erreicht. Erst nach der Aktivierung reagiert das UAV auf Eingaben der Fernsteuerung durch den Piloten. Vor dem Start ist unbedingt noch ein Reichweitencheck durchzuführen. Dieser lässt sich über ein spezielles Programm in der Fernsteuerung aktivieren, wobei diese dann mit reduzierter Sendeleistung arbeitet. Der Pilot geht dann rund 50 bis 100 m vom UAV weg und testet, ob die Servos einwandfrei funktionieren.

The screenshot shows the Mission Planner software interface. At the top, there are menu options: FLIGHT DATA, FLIGHT PLAN, INITIAL SETUP, CONFIG/TUNING, SIMULATION, TERMINAL, HELP, and DONATE. Below the menu is a toolbar with icons for various functions. The main display area shows a satellite map with a flight plan consisting of five waypoints (1-5) and a 'Home' location. The waypoints are connected by yellow lines. On the right side, there is a 'Zoom' slider and an 'Action' panel with buttons for 'Load WP File', 'Save WP File', 'Read WPs', and 'Write WPs'. Below the map, there is a 'Waypoints' table with columns for Command, WP Radius, Loiter Radius, Default Alt, Absolute Alt, Verify Height, Lat, Long, Alt, Delete, Up, Down, Grad %, Dist, and AZ.

	Command	WP Radius	Loiter Radius	Default Alt	Absolute Alt	Verify Height	Lat	Long	Alt	Delete	Up	Down	Grad %	Dist	AZ
1	WAYPOINT	0	0	0	0		-35.0407928	117.8277898	100	X	🏠	🏠	95.7	104.5	1
2	WAYPOINT	0	0	0	0		-35.0406786	117.8260410	100	X	🏠	🏠	0.0	159.7	275
3	WAYPOINT	0	0	0	0		-35.0417239	117.8251612	100	X	🏠	🏠	0.0	141.2	215
4	WAYPOINT	0	0	0	0		-35.0428395	117.8259873	100	X	🏠	🏠	0.0	145.1	149
5	WAYPOINT	0	0	0	0		-35.0427165	117.8274572	100	X	🏠	🏠	0.0	134.5	84

Abbildung 3.23: Wegpunkte programmieren im Mission Planner [128]

3.4 Datenlink

Der Datenlink stellt die drahtlose Verbindung zwischen dem UAV und dem Piloten her. In derzeitigen Arbeitsgruppen zur Definition von Kommunikationsstandards für UAVs wird dabei von Control and Non-Payload Communication (CNPC) gesprochen. Nach derzeitigem Stand gibt es, wie schon im Kapitel 1.3 erwähnt, keine dedizierten Vorgaben, welche Hardware bzw. welche Frequenzen für den UAV-Datenlink verwendet werden sollen. Als UAV-Datenlink werden alle Funkverbindungen zwischen dem Piloten, der Bodenstation und dem UAV bezeichnet. Bei kleinen kommerziellen UAVs wird oft nur ein einziger Datenlink basierend auf einer Technologie eingesetzt. Je komplexer die Anwendung wird, desto wichtiger ist es, den

Steuer- und den Telemetrie Link technologisch zu trennen. Dadurch erhöht man auch die Robustheit. Voraussetzung ist ein modularer Flugregler, der mehrere Eingänge für weitere Empfänger hat. Dies wären z.B. die im Kapitel 3.2 vorgestellten Pixhawk Modelle. Die für den C2- sowie Telemetrie-Datenlink in Frage kommenden Technologien werden im Kapitel 4.3 vorgestellt.

3.5 Payload

Von UAV-Modellen kommerzieller Hersteller wie z.B. DJI kennt man auch die Möglichkeit, ein live-Video aus der Luft an die Bodenstation (GCS) zu übertragen. Diese Videodaten sind nicht flugrelevant und werden als Payload bezeichnet. Der Payload wird bei kleinen und mittelgroßen UAVs meist gemeinsam mit den Telemetriedaten über ein und denselben Datenlink an die GCS, meist ein Tablet- oder auch Laptop-PC, gesendet. Bei speziellen Anwendungen reicht jedoch die Bandbreite des C2-Links nicht aus, um die zusätzlichen Payload-Daten an die GCS zu senden, ohne die Performance des C2-Datenlinks zu beeinflussen. Aus diesem Grund muss für die Payload Daten eine breitbandige Datenübertragungstechnik bereitgestellt werden.

4 Datenlinktechnologien

In diesem Kapitel wird im Speziellen auf die Wichtigkeit des Datenlinks eingegangen, da dies essenziell für die Steuerung des UAVs ist. Deshalb soll im Kapitel 4.1 zuerst ein grundlegendes Verständnis über aeronautische Datenlinks geschaffen werden. Anschließend wird der Stand der Technik rund um den Modellbau vorgestellt. Davon abgeleitet werden die zum Einsatz kommenden Datenlink-Technologien von UAVs präsentiert, die größtenteils auf der Technik aus dem Modellbaubereich basieren. Weiters wird der Begriff *Command and Control* erläutert. Der Stand der Technik zum Mobilfunk schließt das Kapitel ab.

4.1 Stand der Technik für aeronautische Datenlinks in der zivilen Luftfahrt

Für einen sicheren Flugverkehr stellen aeronautische Kommunikationsmethoden eine grundlegende Technologie für ein modernes Luftverkehrsmanagement (Air Traffic Management – ATM) dar. Anfängen von reiner Sprachkommunikation, die einen Austausch der Piloten mit dem Bodenpersonal ermöglichte, entwickelten sich aufgrund des erhöhten Flugverkehrsaufkommens und der limitierten Frequenzressourcen digitale Kommunikationstechniken, sogenannte Datenlinks [129, S. 191-192]. Das führte dazu, dass Dutzende Routinemeldungen automatisiert an das Air Traffic Management gesendet werden. Das Luftfahrtmanagement konnte dadurch vereinfacht werden. Um einen Überblick über die zugrunde liegende Technik zu bekommen, werden analoge sowie digitale aeronautische Kommunikationstechniken vorgestellt.

Die gesamte drahtlose Kommunikation in der Luftfahrt findet in einem geschützten Frequenzbereich statt. Unter der Anleitung der ICAO wurde entsprechend der Beschränkungen der Internationalen Fernmeldebehörde (ITU) die Datalink-Kommunikation der zivilen Luftfahrt in den verfügbaren Frequenzbändern eingeschränkt [130]. In der Kommunikationstechnik für die zivile Luftfahrt unterscheidet man Sprach- und Datenkommunikationstechniken. Durch die technologische Weiterentwicklung verteilte sich in den letzten Jahren ein Großteil der ursprünglichen Sprachkommunikation über UKW-Frequenzen hin zur digitalen Datenkommunikation. Das bedeutet, dass Piloten bei Routinemeldungen sich nicht mehr manuell über Sprachfunk bei den Lotsen melden, sondern stattdessen dieser digitale Kurzmitteilungen übermittelt werden.

Der UKW-Sprechfunk in der Luftfahrt wird weiterhin im Frequenzbereich des VHF-Bands von 117,975 bis 137,00 MHz betrieben. Die Kanalbandbreite liegt je nach Höhe des Flugzeuges bei 8,33 kHz für Flüge unterhalb und bei 25 kHz oberhalb etwa 6000 m. Technisch wird für das Sprachsignal eine Amplitudenmodulation im Zweiseitenband (ZSB) Verfahren verwendet. Von der Funktionsweise ist der aeronautische UKW Funk gleich dem terrestrischen, es wird „Push-to-Talk“ (PTT) verwendet. Das bedeutet, es kann zu einem Zeitpunkt immer nur gesendet oder empfangen werden. Möchte man senden, muss man die entsprechende Taste am Endgerät bedienen. Eine Übersicht der Spezifikationen ist in Tabelle 4.1 ersichtlich.

Tabelle 4.1: Spezifikationen des luftfahrtspezifischen UKW-Sprachfunks [129, S. 192]

Parameter	Wert
Frequenzbereich	117,975 – 137,000MHz
Kanalraster	8,33 und 25kHz
Bandbreite	8,33 und 25kHz
Modulation	AM, ZSB
Polarisation	Vertikal
Sendeleistung	Ca. 10 – 40W
Reichweite	Bis 200NM

Zusätzlich zum UKW-Sprachfunk wird für größere Reichweiten neben der Satellitentelefonie auch noch KW-Sprechfunk eingesetzt. Entsprechend der SARPs [131] wird nur das obere Seitenband verwendet (Single Side Band, SSB). Somit ist die gesamte Leistung im Nutzsignal und wird durch die Peak Envelope Power (PEP), die Hüllkurvenspitzenleistung, beschrieben. Die Eigenschaften sind in der folgenden Tabelle 4.2 zusammengefasst.

Tabelle 4.2: Spezifikationen des luftfahrtspezifischen KW-Sprachfunks [129, S. 200]

Parameter	Wert
Frequenzbereich	2,800 – 22,000MHz
Kanalraster	1 kHz
Bandbreite	4kHz
Modulation	AM, SSB
Polarisation	Horizontal, SSB
Sendeleistung	Ca. 100W (PEP)

Zusätzlich zur noch bestehenden analogen Sprachkommunikation spielt die digitale Datenkommunikation eine wichtige Rolle. Der Flugverkehr wächst stetig (ausgenommen seit dem COVID19-bedingten Einbruch des Flugverkehrs 2020) und die Anzahl an Sprachkanälen (UKW sowie KW) ist limitiert. Weiters erfährt auch die Luftfahrtbranche stetig technologische Weiterentwicklungen. Aus diesem Grund wurden digitale Kommunikationstechniken eingeführt, die die Kommunikationsengpässe kompensieren sollen.

Das *Aircraft Communications and Reporting System* (ACARS) operiert bereits seit 50 Jahren als einfacher Datenlink für die zivile Luftfahrt. Es dient dem Austausch von operationellen Daten zwischen den Flugzeugen und dem Air Traffic Management. Darunter fallen Statusinformationen wie Abflug-, Treibstoffstands-, Positions- und Kursmeldungen sowie deren Aktualisierungen. Die Übertragung der ACARS-Nachrichten wird einerseits über spezielle Kanäle des UKW-Sprachfunks (Siehe Tabelle 4.1 für dessen Spezifikationen) durchgeführt. Es wird dabei im Umkreis von 200 nm Frequenzumtastung (Frequency Shift Keying, FSK) verwendet und man erreicht damit Datenraten bis 2400 bit/s. In Gebieten ohne Funkabdeckung wird andererseits Satellitenkommunikation eingesetzt. Für die Satellitenkommunikation werden entsprechende ICAO-Standards (SARPs) unterstützt. Das bedeutet, dass die eingesetzten Systeme derzeit den Performance Standard Klasse B erfüllen

und in Zukunft auch Klasse A unterstützen sollen [132]. Dazu zählen INMARSAT Iris und Iridium Certus. Die Satellitenkommunikation (Aeronautical Mobile Satellite Service, AMSS) stellt für die Boden-Luft-Kommunikation außerhalb der VHF und HF Reichweite einen Kommunikationskanal im *Aeronautical Telecommunication Network* (ATN) dar.

Auf dem KW-Band wird von ARINC der sogenannte HD Data Link (HFDL) eingesetzt (für Spezifikationen siehe [129]). Dieser wird auch als HF-ACARS, ARINC 753, ARINC 635 oder HF-DATALINK bezeichnet. ARINC hat dazu die Spezifikation im Dezember 2000 veröffentlicht [133]. Ziel dieses Datenlinks ist die Bereitstellung eines digitalen Datenlinks für hohe Reichweiten für Flugzeuge, die über keinen Satellitenlink verfügen. Als Modulation wird eine zwei-, vier- oder acht-fache Phasenumtastung (Phase Shift Keying, PSK) eingesetzt und man erreicht damit Übertragungsraten bis 1800 bit/s.

In den 1990ern wurde seitens der ICAO an neuen Technologien für den physischen Layer von aeronautischen Datenlinks geforscht. Dabei entstand das Konzept des VHF Data Link oder VHF Digital Link (VDL) [134]. Es wurden unterschiedliche Versionen definiert, die mit dem Zusatz *Mode* bezeichnet wurden. VDL Mode 1 und Mode 2 wurden bis 1994 komplett validiert. Mode 1, der ACARS als physikalische Grundlage verwendete, wurde aus den ICAO Standards gelöscht, da es rein für Validierungszwecke entworfen worden war. Mode 2 wurde die Hauptversion, die bis heute im Einsatz ist. Diese wurde kompatibel zum OSI/ISO-Referenzmodell spezifiziert. Dieser Mode wurde seitens der EUROCONTROL in deren Link2000+ und CASCADE Programm als Datenlink-Technologie implementiert und seitens der *Single European Sky* (SES), einer Europäischen ATM-Kommission, 2009 als primärer Datenlink adaptiert [129]. Seitens der ICAO sind dafür drei Layer spezifiziert worden, der *Subnetwork*-, *Link*- und *Physical*-Layer [134].

Der *Subnetwork* Layer entspricht den Anforderungen des ICAO *Aeronautical Telecommunication Network* (ATN)-Standards, der ein Ende-zu-Ende-Datenprotokoll spezifiziert. Dabei werden Verbindungen über mehrere Luft-Boden- und Boden-Teilnetze hergestellt, bei denen u.a. auch VDL (Luft-Boden) zum Einsatz kommt.

Der *Link* Layer besteht aus zwei Sublayern. Einem Data Link Service- und dem Media Access Control (MAC)-Sublayer. Das *Data Link-Protokoll* basiert auf den ISO-Standards, die für den *High-Level Data Link Control* (HDLC)-Einwahlzugriff auf X.25-Netzwerke verwendet werden. HDLC ist ein bitorientiertes, codetransparentes, synchrones Datenübertragungsschichtprotokoll und X.25 beschreibt eine ITU-T Standardprotokollsuite für paketvermittelte Datenkommunikation in Wide Area Netzwerken (WAN)-Netzen. Es bietet Flugzeugen einen erfolgreichen Verbindungsaufbau zu einer Bodenstation und definiert ein Adressierungsschema für Bodenstationen. Das MAC-Protokoll ist eine Version von Carrier Sense Multiple Access (CSMA) [134].

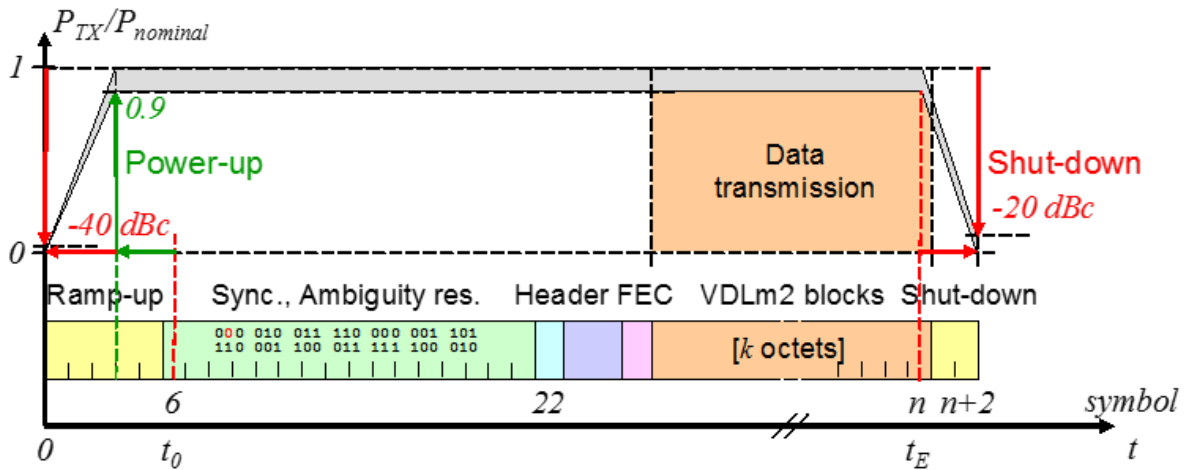


Abbildung 4.1: Setup eines VDL2-Burst mit vorgesetzter Trainingssequenz [129, S. 214]

Im *Physical Layer* verwendet VDL-Mode 2 Reed-Solomon-Kodierung zum Fehlerschutz im physikalischen Layer. Danach wird der binäre Datenstrom auf grey-coded Symbole gemapped.

Die Symbolrate beträgt 10 500 Symbole pro Sekunde. Auf dem Übertragungskanal wird D8PSK-Modulation verwendet und das Leistungsspektrum ist durch einen Kosinus-Roll-off-Filter bandbegrenzt. Die eigentliche VDL-Mode 2 Aussendung setzt sich aus einer Trainingssequenz und der Datensequenz zusammen (Abbildung 4.1). Der Kanalabstand zwischen zwei Nachbarkanälen beträgt 25 kHz (Tabelle 4.3). Der der eigentlichen Datenübertragung vorangestellte Header (Trainingssequenz) dient zur Stabilisierung der Sendeleistung und ermöglicht die Synchronisation des Empfängers auf die bevorstehende Übertragung. VDL-Mode 2 stellt bis heute einen Kommunikationskanal im Aeronautical Telecommunication Network (ATN) zur Verfügung. Es ist die bis heute meist verwendete aeronautische Datenlinktechnologie.

Tabelle 4.3: Modifikation des VDL-Mode 2 Minimum Operational Performance Standard [129, S. 213]

Parameter	Wert
Datenrate	31 500 Bit/s
Symbolrate	10 500 Symbole/s
Symbolerstellung	$\{b_{0,LSB}[n-2] b_1[n-1] b_{2,MSB}[n]\} \rightarrow s[k]$
Codierung der Symbole	Gray-Coding
Modulation	D8PSK
Frequenzband	118,000 (108,050) – 136,975 MHz
Kanal Bandbreite	25 kHz
Kanal Zugriff (MAC)	Carrier Sense Multiple Access (CSMA)
Synchronisation	Über die Base Station

Der ICAO Standard für VDL-Mode 3 definiert ein Protokoll, das Flugzeugen sowohl Daten- als auch digitalisierte Sprachkommunikation ermöglicht. Der Standard wurde von der FAA mit Unterstützung der US-Forschungsorganisation Mitre entwickelt. Durch die zusätzliche Unterstützung digitalisierter Sprache wurde das VDL-Mode 3-Protokoll wesentlich komplexer

als VDL-Mode 2. Die Daten- und digitalisierten Sprachpakete laufen in *Time Division Multiple Access* (TDMA)-Slots, die von Bodenstationen zugewiesen werden. Die FAA implementierte um 2003 ein Prototypsystem, konnte in weiterer Folge aber die Fluggesellschaften nicht davon überzeugen, ihre Flotten mit VDL-Mode 3 Avionik auszustatten und gab 2004 die Implementierung auf.

Das VDL-Mode 4 Protokoll ist ein ICAO Standard, mit dem Flugzeuge Daten mit Bodenstationen und anderen Flugzeugen austauschen können. VDL-Mode 4 verwendet ein *Self-organized Time Division Multiple Access* (STDMA) Protokoll, das es ermöglicht, selbstorganisierend zu sein. Das bedeutet, es ist keine Master-Bodenstation, die die Kommunikation koordiniert, erforderlich. Dadurch war dieser Standard viel einfacher zu implementieren als VDL-Mode 3. Im November 2001 wurde dieses Protokoll von der ICAO als globaler Standard eingeführt. Seine primäre Funktion war es, eine physikalische Schicht auf der VHF-Frequenz für Kollisionsverhinderungssysteme wie ADS-B und Multilaterationen (MLAT) bereitzustellen. Es wurde jedoch seitens der Flugzeugindustrie für ADS-B das 1.090-MHz-Band des Mode-S-Datenlinks als primäre Technologie festgelegt [129].

Das Medium VDL-Mode 4 kann für Luft-Luft-, Luft-Boden- sowie Boden-Luft Kommunikation eingesetzt werden. Es eignet sich am besten für kurze Nachrichtenübertragungen zwischen einer großen Anzahl von Nutzern, z.B. für die Bereitstellung von Situationsbewusstsein, *Digital Aeronautical Information Management* (D-AIM), etc. Dabei sind einerseits direkte Punkt-zu-Punkt (P2P)-Verbindungen und andererseits auch Punk-zu-Multipunkt Verbindungen (Broadcast) möglich. Die Modernisierung des Flugverkehrsmanagements in Europa hat zur bodenseitigen Implementierung von ADS-B und den Luft-Boden-Austausch mit VDL-Mode 4-Systemen geführt. In Verkehrsflugzeugen werden weiterhin die operationellen Implementierungen von ADS-B auf dem Mode-S-Datenlink und von *Controller Pilot Digital Link Communication* (CPDLC) der VDL-Mode 2 verwendet. VDL-Mode 4 stellt einen weiteren Übertragungskanal im ATN Netzwerk dar [129].

Durch den wachsenden Luftverkehr wurde ACARS stark ausgelastet und daher seitens der ICAO ein neuer Standard, das *Future Air Navigation System* (FANS) empfohlen. Darin wurde auf die Verwendung der um 1996 entwickelten *VHF Data Links* (VDL) hingewiesen. Boeing und Airbus haben jeweils ihre eigene Implementierung des FANS-Konzepts der ICAO entwickelt, die als FANS-1 bzw. FANS-A bekannt sind, weshalb diese Implementierungen oft als FANS-1/A bezeichnet werden. Die FANS-1/A-Kommunikation wird hauptsächlich für die Übergabe von Freigaben und für ATC-Operationen verwendet, wenn sich die Flugzeuge En Route befinden, da die Reaktionszeit sowohl von Fluglotsen als auch von Piloten für die Flugsicherheit nicht entscheidend ist. Die Fans-1/A Spezifikationen sind im ARINC 622 und EUROCAE ED-100/RTCA DO-258 festgehalten. Auch aktuelle Verkehrsmaschinen wie der A-380 und die Boeing 787 sind FANS-1/a fähig.

Das Mode-S-Konzept wurde in den 70er Jahren vom MIT Lincoln Lab entwickelt und von der *Federal Aviation Administration* (FAA), der *Aircraft Owners and Pilots Association* (AOPA) und der Transponderherstellergemeinschaft koordiniert. Es verwendet gepulste Hochfrequenz (HF)-Übertragung unter Verwendung eines 1030 MHz-Trägers für die Boden-Luft-

Kommunikation (1090 MHz für Luft-Boden) mit differentieller Phasenumtastung (DPSK) und erreicht eine Datenrate von 4 Mbps [129, S. 221-223]. Es unterstützt einerseits eine Punkt-zu-Punkt (P2P)-Kommunikation sowie andererseits einen Broadcast Modus und kann dabei Aussendungen, sogenannte Squitter, verschicken. Es unterstützt dabei kurze Datenfelder, die mit *Short Squitter* (56 Bit) für *Mode-S Elementary Surveillance* (ELS) und lange Datenfelder, die mit *Extended Squitter* (112 Bit) für *Mode-S Enhanced Surveillance* (EHS) bezeichnet werden. Im *Extended Squitter* wird weiters zwischen einem kurzem (Standard Length Message, SLM) und einem langen (Extended Length Message, ELM) Datenfeld unterschieden. Dabei können neben der 24 Bit ICAO Identifikationsnummer auch weitere Informationen ausgesendet werden. Die Spezifikationen sind in den SARPs für den Mode-S-Datenlink zusammengefasst [131].

L-DACS1 und L-DACS2 waren Technologien für eine zukünftige L-Band-Datenverbindung (L-Band Digital Aeronautical Communication System) und wurden im Rahmen von SESAR [135] entwickelt. L-DACS1 ging aus dem europäischen Projekt B-VHF (Broadband-VHF) und seinem Nachfolger B-AMC (Broadband-Aeronautical Multicarrier Communication) hervor und verwendet ein orthogonales Frequenzmultiplex (OFDM)-Modulationsschema. Das System ist als Luft-Boden- und Luft-Luft-Verbindung konfiguriert und bietet eine bidirektionale Datenübertragung. L-DACS2 greift auf Elemente von GSM zu und ermöglicht so den Einsatz kommerzieller Hardware. Die möglichen Datenraten betragen bis zu etwa 200 kbit/s (L-DACS2) bzw. 1400 kbit/s (L-DACS1) [129, S. 224-226]. Seitens ICAO sollte eine Entscheidung zwischen den beiden Technologien, deren Standards innerhalb des SESAR JU WP15 entwickelt werden, etwa im Jahre 2010 gefällt werden [136]. Für LDACS1 wurde die Standardisierung seitens der Firma Frequentis und dem DLR vorangetrieben, während LDACS2 nicht aus der Projektphase herauskam. So wurden noch 2014 seitens dem DLR die Vorzüge von LDACS1 gegenüber LDACS2 erwähnt [137]. Ab etwa 2015 wurde aus LDACS1 lediglich LDACS und es ist seither der einzige Kandidat für das SESAR *Future Communication Infrastructure* (FCI) Programm. Im Jahr 2019 wurde in Kooperation des DLRs mit Rhode und Schwarz (und weiteren Partnern) ein Demonstrator aufgebaut und innerhalb eines über das deutsche Luftfahrtforschungsprogramm (LuFo) geförderten Projekts MICONAV (Migration towards Integrated COM/NAV Avionics) erste Flugversuche mit dem LDACS-Datenlink durchgeführt [138].

All diese vorgestellten Datenlinktechnologien dienen unterschiedlichen Anwendungen. Sie werden als physikalische Schicht (des OSI Schichtmodells) von unterschiedlichen Diensten verwendet und bilden somit die Grundlage des sogenannten Communication, Navigation, Surveillance / Air Traffic Management (CNS/ATM)-Services. Das *Aeronautical Telecommunication Network* (ATN) stellt dabei ein umfassendes Netzwerk dar, das VHF-Data Link, Mode-S-Datenlink, Satcom und HFDL als Übertragungstechnologien verwendet. Seitens ICAO wurde in den SARPs anhand des OSI-Schichtenmodells eine Architektur definiert, die Luft-Luft-, Luft-Boden- und Boden-Boden-Kommunikation innerhalb eines Netzwerkes ermöglicht. Ein ATN Router übernimmt in den boden- wie luftseitigen Subnetzwerken die OSI Layer 3 Switching Funktion und leitet Datenpakete innerhalb der Subnetzwerke sowie zu den externen Schnittstellen (Luft-Boden) weiter. Innerhalb eines Flugzeuges stellt eine

Communication Management Unit (CMU) die Mensch-Maschine-Schnittstelle dar. Diese sorgt für die Auswahl der verfügbaren und geeigneten Übertragungstechnik [129, S. 226-227].

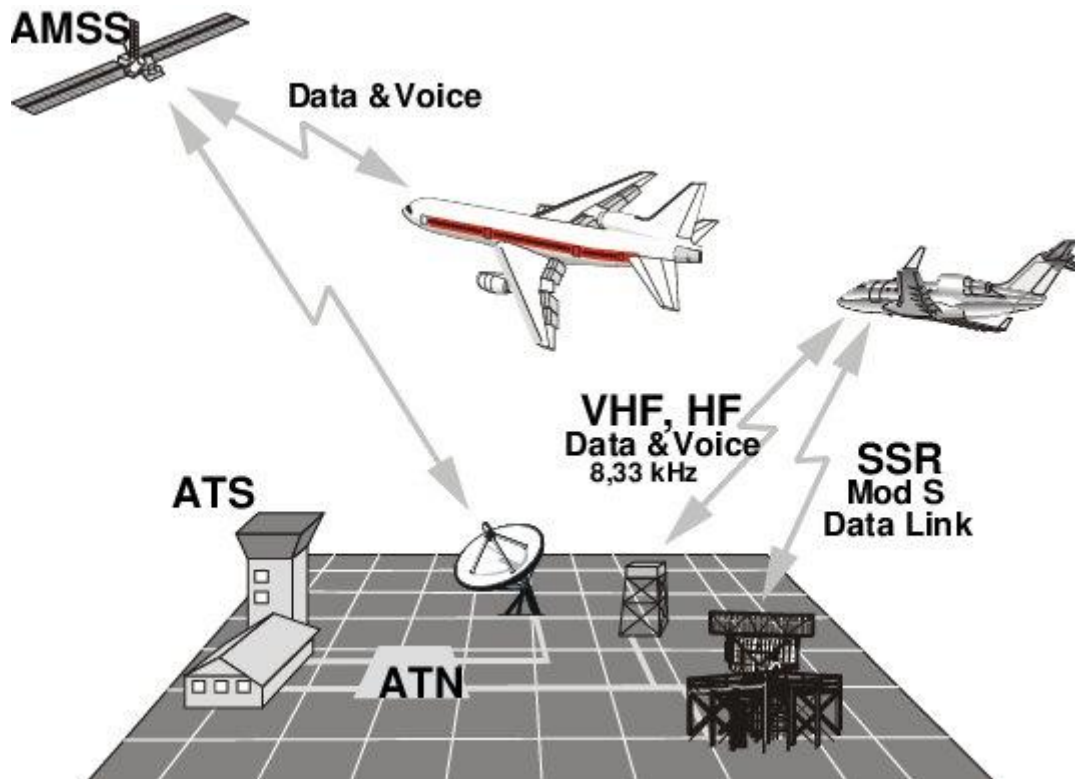


Abbildung 4.2: CNS/ATN Kommunikation über das ATN [139]

Durch das ATN wurden mehrere Luft-Boden sowie Luft-Luft-Dienste realisiert [129]:

- **Automatic Dependent Surveillance – Broadcast** (ADS-B): Mit ADS-B wurde eine Technologie zur Kollisionsvermeidung eingeführt. Über das ATN werden dazu einerseits der Mode-S (hochfliegend) sowie der VDL-Mode 4-Datenlink zur Verfügung gestellt. Dabei wird in regelmäßigen Abständen neben der GNSS Information auch ein *Position-Velocity-Time* (PVT)-Vektor von allen ADS-B-fähigen Luftfahrtteilnehmern ausgesendet (Broadcast). Darin befinden sich Informationen über geometrische Länge und Breite, geometrische Höhe, Geschwindigkeit in der Luft und über Grund, Luftdaten und Qualitätsangaben zu allen Informationen. Dadurch lässt sich bodenseitig eine einfache Luftraumüberwachung auch ohne Radar Technik realisieren. Es wird als *Secondary Surveillance Radar* (SSR) eingesetzt.
- **Controller Pilot Digital Link Communication** (CPDLC): Seit 2009 existiert das *Controller Pilot Data Link Communications* (CPDLC), eine auf der VDL-Mode 2-Datenlink Technologie basierende Technik, um zwischen Fluglotsen und Pilot zu kommunizieren. CPDLC ist ein Zwei-Wege-Datenlink, mit dem Fluglotsen nicht dringende "strategische Nachrichten" als Alternative zur Sprachkommunikation an ein Flugzeug übermitteln können. Die Nachricht wird auf einem Flugdeck-Sichtgerät angezeigt. Die CPDLC-Anwendung bietet Luft-Boden-Datenkommunikation (A/G) für den Flugsicherungsdienst. Sie ermöglicht eine Reihe von Datenverbindungsdiensten,

die den Austausch von Kommunikationsmanagement- und Freigabe-/Informations-/Anforderungsmeldungen ermöglichen, die der Sprachphraseologie der Flugsicherungsverfahren entsprechen. Darunter fallen Services wie *Data Link Initiation Capabilities* (DLIC), *ATM Communication Service* (ACM), *ATC Clearances Service* (ACL), *ATC Microphone Check Service* (AMC), *Departure Clearance* (DCL) und *Downstream Clearance Service* (DSC) [140].

- **Traffic Information Service – Broadcast** (TIS-B): Über einen Uplink stellt das ATN die Flugverkehrsinformation dar
- **Flight Information Service – Broadcast** (FIS-B): Bereitstellung von Informationen zum Wetter sowie zum Ab- und Anflug
- **Ground Based Augmentation System** (GBAS): Stellt einen Datenlink dar, der GPS-Korrekturdaten für Präzisionsanflüge bereitstellt
- **Aeronautical Mobile-Satellite Service** (AMSS): Umfasst satellitenbasierte Kommunikation

Durch die stetige Zunahme des zivilen Flugverkehrs besteht die Notwendigkeit nach erhöhter Bandbreite für die aeronautischen Datenlinks. Dazu wurde seitens SESAR JU das *Future Communication Infrastructure* (FCI) Programm initiiert. Dabei soll durch neue moderne Datenlinks die Bandbreite erhöht werden, die Anzahl der Teilnehmer im Vergleich zum ATN größer sein und andererseits die Datenkommunikation IPv6 basierend von statten gehen. Sprache und Daten sollen Boden-Boden-, Boden-Luft- sowie Luft-Luft-seitig rein digital übertragen werden.

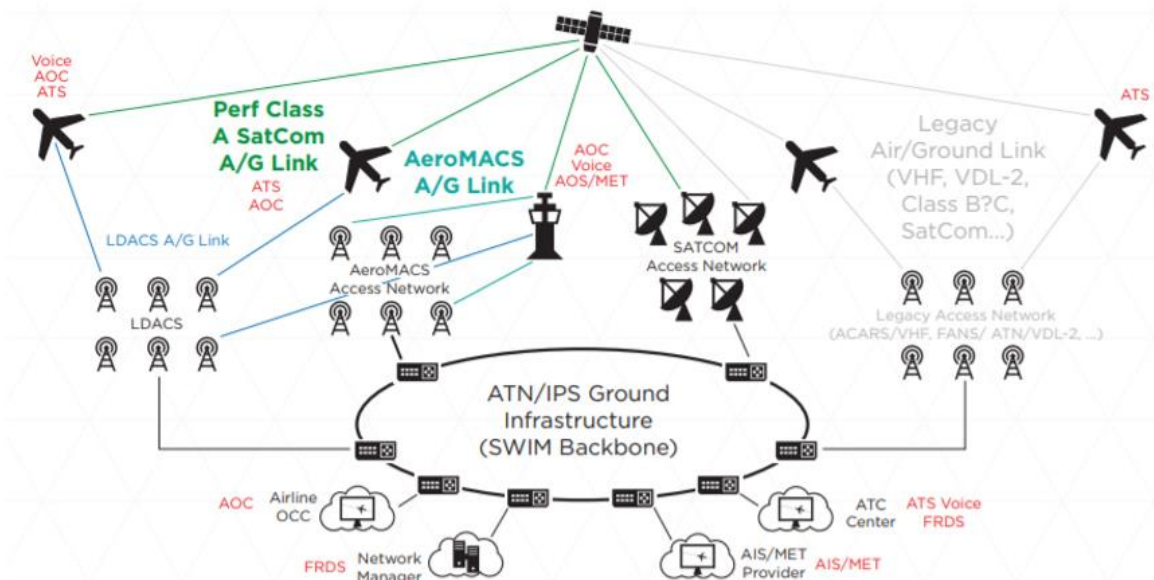


Abbildung 4.3: Die Zukunft des aeronautischen Datenlinks - FCI [141]

Dazu wird im speziellen die Entwicklung und Standardisierung von *L-band-Digital Aeronautical Communication System* (LDACs) vorangetrieben, als neue, ähnlich einem Mobilfunknetz aufgebauter Datenlink-Technologie, die für die Boden-Luft- und die Luft-Luft-Schnittstelle vorgesehen ist. Gemeinsam mit der für die Boden-Boden-Kommunikation bereits zugelassenen AeroMACS Technologie und Satcom im Performance Mode A soll LDACs das Luftfahrtnetzwerk der Zukunft darstellen. Eine Übersicht des Aufbaus des geplanten Netzwerks ist in Abbildung 4.3 zu sehen. Die Standardisierung von LDACs wird seitens SESAR und den daran beteiligten Industriepartnern (Frequentis, DLR) über Forschungsprojekte vorangetrieben. Eine Fertigstellung des Standards wird mit 2022 erwartet. Ab dann können es die Fluggesellschaften übernehmen [142].

4.2 Stand der Technik von Datenlinks für den Modellsport

Mit der Einführung von Modulationstechniken entwickelte sich auch die Modellsportszene. Ab etwa 1960 gab es die Möglichkeit, durch Modulation eines Trägersignals (anfangs Amplitudenmodulation, AM) mehr Informationen an den Empfänger zu senden. Das ermöglichte ab diesem Zeitpunkt erweiterte Steuermöglichkeiten, da Steuerbefehle für mehrere Servos bzw. Motoren über die Funkfernsteuerung (Remotecontroller, RC) gesendet werden konnten. Für den Modellflug wurden länderspezifische Frequenzbereiche festgelegt. Diese sind auf der Webseite der *FAI Aeromodelling Commission* (CIAM) für viele Länder dargestellt [143]. In der DACH Region wäre das das 35 MHz-Band, das bedeutet einen Frequenzbereich von 35,010 bis 35,200 MHz in 10 kHz Schritten. Jeder Schritt bedeutet einen Kanal und jeweils ein Kanal konnte nur von einem Anwender betrieben werden. Dies erforderte sogenannte Frequenztafeln auf den Modellsportplätzen, da pro Kanal nur ein Modell gesteuert werden konnte. Ab den 2000er Jahren wurden RCs im 2,4 GHz ISM-Band (2,40 bis 2,48 GHz) eingeführt. Diese lösten die bis dahin fast 50 Jahre alte ursprüngliche Technik ab. Der entscheidende Vorteil war, dass durch die neue Kanalcodierung alle Anwender im selben Frequenzband die Modelle steuern konnten, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen. Es erfordert lediglich eine erste Synchronisierung des Senders auf den Empfänger, das sogenannte Binding. Nach dem Binding können mehrere Personen störungsfrei auf derselben Frequenz ihre jeweiligen Modelle steuern.

Bezüglich der Reichweite ist man einerseits von der Sendeleistung und andererseits von der Wellenausbreitung abhängig. Die Wellenlänge berechnet sich mit der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c und der Frequenz f für unterschiedliche Frequenzen aus folgender Formel:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Für 35 MHz ergibt sich daraus eine Wellenlänge von 8,57 m und für 2,4 GHz von 12,5 cm. Da man im Modellflug selten direkte Hindernisse im Sichtbereich hat, erfährt die Wellenausbreitung den größten Einfluss durch positive und negative Interferenzen. Dies lässt sich leicht anhand der Fresnel Zone erklären. Die meist im Modellsport eingesetzten

Stabantennen strahlen die größte Sendeleistung vertikal zur Antenne rundum aus (In Abbildung 4.4 entlang der Linie d). Entlang der sogenannten Hauptsendekeule wird die elektromagnetische Welle mit der größten Intensität abgestrahlt. Es gibt allerdings auch Nebenkeulen, die nach oben und unten abgestrahlt werden. Somit kann die Nebenkeule (In Abbildung 4.4 entlang der Linie a) über den Boden reflektiert auch an den Empfänger gelangen (Linie b). Die reflektierten Wellen benötigen für ihren längeren Weg mehr Zeit als das direkte *Line-of-Sight* (LOS) Signal und so entsteht zwischen dem reflektierten und LOS Signal eine Phasenverschiebung. Dadurch kommt es zu einer Überlagerung der elektromagnetischen Wellen am Empfänger. Diese kann positiv sein, dabei überlagern sich die positiven Amplituden (Phasenverschiebung von $-180^\circ < \varphi < +180^\circ$), oder auch destruktiv, wenn sich eine positive mit einer negativen Amplitude überlagert.

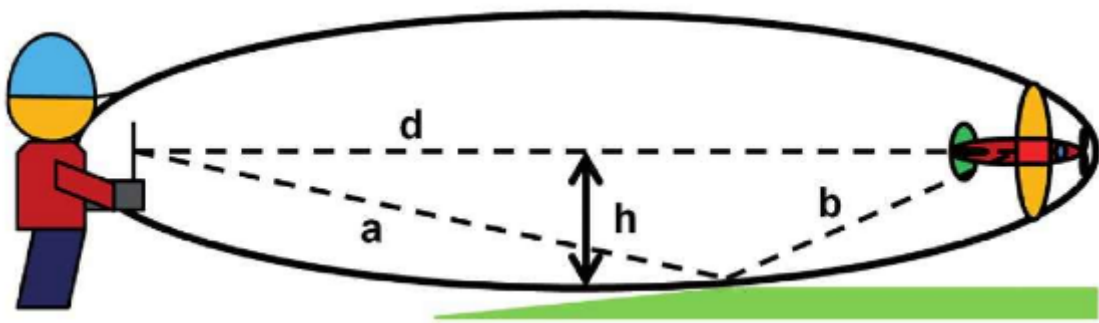


Abbildung 4.4: Fresnel Zone im Modellsport [144, S. 37]

Die positive Überlagerung führt zu einem verstärkten Signal, während die destruktive Interferenz sogar einen kompletten Signalverlust hervorrufen kann. An jedem Randpunkt Fresnel der Zone gilt:

$$a + b - d = \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

Das bedeutet, dass im Falle der horizontal polarisierten elektromagnetischen Welle an jedem Randpunkt der Fresnel Zone destruktive Interferenz auftritt, da sich die direkte Welle immer mit der jeweils um 180° phasenverschobenen Welle destruktiv überlagert. Das bedeutet weiters, dass man innerhalb der Fresnel Zone einen sicheren Empfang hat. Anhand der Höhe des Senders kann man die Dimension der Fresnel Zone abschätzen:

$$h = \sqrt{\frac{d \cdot \lambda}{4}} \quad (3)$$

Das würde bei 100 Metern Abstand einer Höhe von 1,76 Metern entsprechen. Für größere Distanzen empfiehlt sich daher eine erhöhte Position des Senders.

Eine weitere wichtige Kenngröße von elektromagnetischen Wellen ist die Polarisation. Die elektromagnetische Welle besteht aus elektrischen und magnetischen Feldkomponenten, die jeweils als vektorielle Größen \vec{E} und \vec{B} angegeben werden. Diese stehen im freien Raum jeweils aufeinander sowie zur Ausbreitungsrichtung x normal (Abbildung 4.5). Die Richtung

der elektrischen Feldkomponente wird dabei als Polarisation bezeichnet. Für den besten Empfang sollte daher die Sende- und Empfangsantenne gleich orientiert sein.

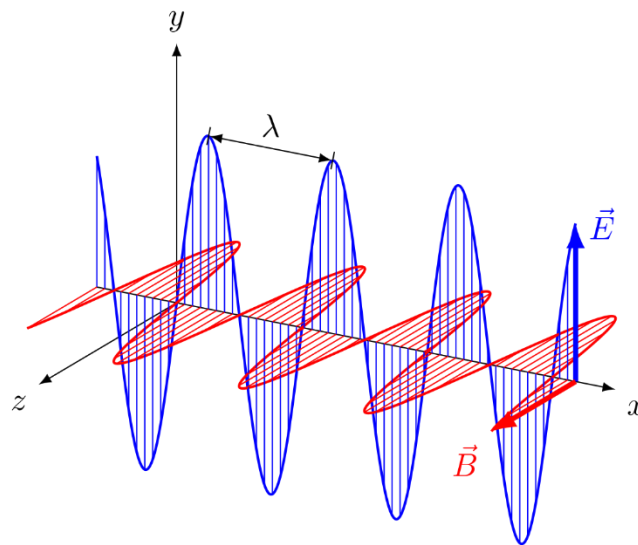


Abbildung 4.5: Linear polarisierte elektromagnetische Welle im Vakuum mit Ausbreitungsrichtung x und den dazu senkrechten vektoriellen Größen des elektrischen Feldes (blau) und der magnetischen Flussdichte (rot) [145]

Das Ende einer offenen ungeschirmten Leitung nennt man Antenne. An ihr entsteht eine elektromagnetische Welle beim Übergang der leitungsgebundenen Energie (sinusförmiger Strom) an die Umgebung (Luft). Die einfachste Form einer Antenne stellt ein Dipol dar (siehe Abbildung 4.6). Darunter kann man sich die jeweils um 90° aufgeklappten Platten eines Kondensators vorstellen.

Die Grundlage für die Antennentechnik bilden dabei die Maxwell-Gleichungen. Diese vier partiellen Differenzialgleichungen beschreiben die Erzeugung von elektrischen und magnetischen Feldern und stellen ein zusammenhängendes System dar. Die Gleichungen beschreiben die Wirbelfreiheit von elektrischen Feldern, das Ampèresche Gesetz, die Poisson-Gleichung und die Quellenfreiheit eines Magnetfeldes. Weitere Details dazu findet man in [146, S. 31-32].

Die leitungsgebundene Energie die in Form sinusförmigen Stroms zugeführt wird, erzeugt an den beiden Polen ein sich ständig änderndes elektrisches sowie magnetisches Feld, das in Summe die abgestrahlte elektromagnetische Welle ergibt. Entsprechend der Länge des Dipols (ausgedrückt in Bezug auf die Wellenlänge λ), der in die Kategorie der Linearantennen fällt, ergibt sich Abstrahlcharakteristik. Diese wiederum sagt aus, in welche Richtung die größte Intensität abgestrahlt wird [146, S. 67].

Der **Herzsche Dipol** (Abbildung 4.6 rechts oben) gilt dabei immer als **Referenzmodell**, als sogenannter Isotropenstrahler (ideal). Zu diesem idealisierten Modell existiert ein mathematisches Modell, mit dem reelle Systeme verglichen werden.

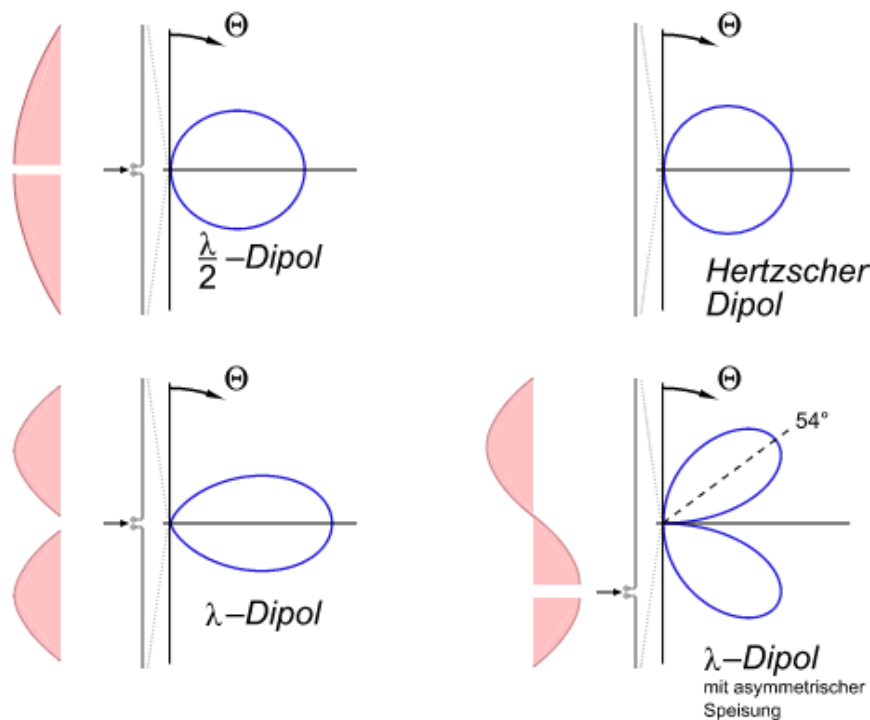


Abbildung 4.6: Dipol, Strom- (rot) und Winkelverteilung der Strahlung (blau) bei unterschiedlichen Wellenlängen [147]

Somit kann man die Intensität der Abstrahlung von Antennen in einen Zahlenwert erfassen, den sogenannten Gewinn. Zuvor muss der Wirkungsgrad einer Antenne bekannt sein. Dieser besagt, wieviel der zugeführten elektrischen Eingangsleistung P_E in elektromagnetische Strahlleistung P_S umgewandelt wird. Ein Teil geht als Verlustleistung P_V verloren [146, S. 77].

$$P_E = P_S + P_V \quad (4)$$

Aus (4) lässt sich dann der Antennenwirkungsgrad η als Verhältnis der zugeführten Leistung zur abgegebenen Leistung definieren [146, S. 77]:

$$\eta = \frac{P_S}{P_E} \quad (5)$$

Anders ausgedrückt ist der Wirkungsgrad η auch definiert als der Quotient aus Gewinn G bezogen auf den Isotropenstrahler zum Richtfaktor D der Antenne: [146, S. 77]

$$\eta = \frac{G}{D} \quad (6)$$

Der Richtfaktor D wird auch als Strahlungsgewinn bezeichnet, der die Leistungssteigerung in Richtung ϑ (Elevation) und φ (Azimut) angibt, die im Vergleich zur in allen Richtungen abgestrahlten Leistung steht. Somit kann die Bündelungseigenschaft der Antenne ausgedrückt werden [146, S. 77]. Der Gewinn kann dann als Produkt des Richtfaktors mal dem Antennenwirkungsgrad angegeben werden [146, S. 79]:

$$G = D \cdot \eta \quad (7)$$

Bei RCs für den Modellsport kommen meist einfache Stab oder Dipolantennen zum Einsatz. Zur Vereinfachung wird eine ähnliche Abstrahlcharakteristik für beide Typen angenommen.

Für den RC ergibt sich dann ein Abstrahlverhältnis, wie in Abbildung 4.7 links zu sehen ist. Das bedeutet, dass die größte Sendeleistung rundum horizontal von der Antenne weg abgestrahlt wird. Die gesendete elektromagnetische Welle ist linear polarisiert. Um nun auch am Empfänger die größtmögliche Leistung zu empfangen muss die Empfangsantenne gleich ausgerichtet sein (siehe dazu Abbildung 4.7 rechts). Das liegt an der Polarisation, also der vektoriellen Ausrichtung des elektrischen Feldes der Welle.

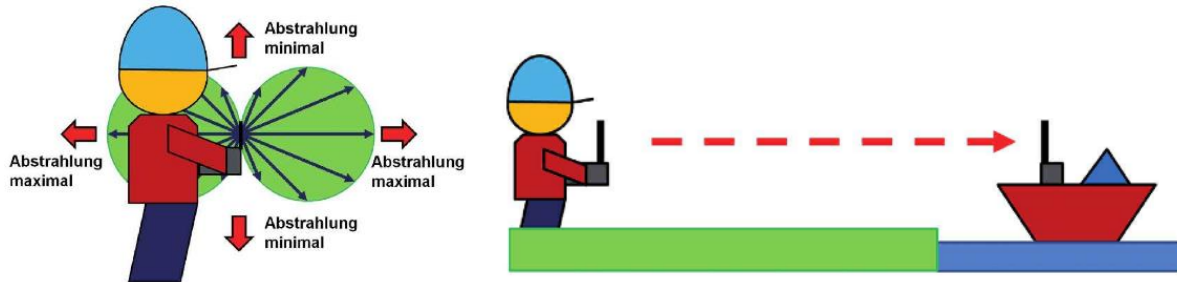


Abbildung 4.7: Abstrahlcharakteristik RC-Antenne (links) und Polarisation (rechts) [144, S. 45-46]

Es gilt zu bedenken, dass die Abstrahlung an diesen Antennen kugelförmig ist. Weitere Details dazu sind in Kapitel 4.5 zum Thema Mobilfunkantennen zu finden.

Um die Abstrahlcharakteristik am RC zu verbessern, werden neben Stab- und Dipolantennen auch Patch- sowie Diversity-Antennen eingesetzt. Eine Patchantenne ist dabei eine $\lambda/2$ lange Platte. Dahinter befindet sich ein Dielektrikum und dahinter eine weitere Platte, die als Reflektor wirkt. Dadurch ergibt sich bei der Patchantenne eine größere Richtwirkung als bei Linearantennen. Weiters gibt es auch kaum Abstrahlung in andere Richtungen. Das bedeutet, dieser Sender sollte immer in Richtung des Modells zeigen. Diversity Antennen erfreuen sich laufend großer Beliebtheit.

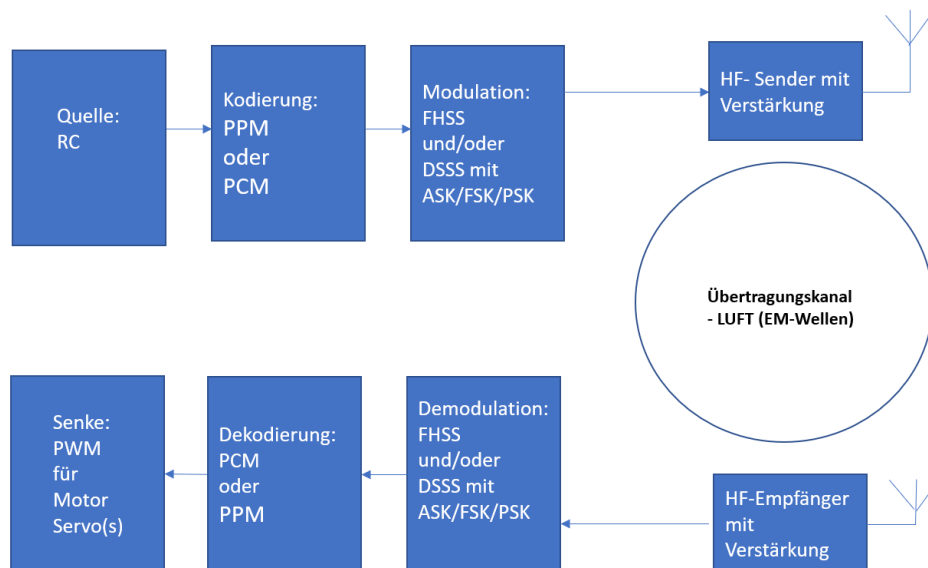


Abbildung 4.8: Blockschaftbild des RC-Übertragungskanal

Dabei werden einfach zwei Linearantennen in unterschiedlicher Orientierung verwendet. Idealerweise versetzt man dabei die Antennen um 90° , um dadurch zwei um 90° versetzte

elektromagnetische Wellen abzustrahlen. Dabei kann man sicherstellen, dass je nach Lage des Empfängers immer zumindest ein Teil der gesendeten Welle empfangen werden kann.

In Abbildung 4.8 ist der Übertragungskanal dargestellt. Es zeigt den Weg des Eingangssignals, welches über einen Knüppel an der Fernsteuerung erzeugt wird, bis hin zum Servo oder Motor am UAV. Es wird kurz auf die einzelnen Blöcke eingegangen.

Der Quellblock stellt die Eingabe des RCs dar, dies wären beispielsweise die Steuerknüppel. Je nach Vorliebe des Piloten kann entweder der linke oder rechte Knüppel für die Steuerung um die drei Achsen und der jeweils andere für den Schub verwendet werden. Die Stellung des Knüppels wird direkt digitalisiert und liegt als pulsweitenmoduliertes Signal (PWM) vor. PWM bezeichnet eine Modulationsart, bei der innerhalb einer fixen Periodendauer die Länge des Pulses der Information entspricht. Das bedeutet, der Puls ist für eine gewisse Zeit entsprechend der modulierten Information HIGH und für die restliche Zeit der Periode LOW. Die einzelnen PWM Signale werden als Kanäle bezeichnet. Sie werden hintereinander übertragen und haben dabei eine fixe Reihenfolge. Bei z.B. 8 Kanälen werden acht PWM Signale zu einem Frame vereint. Als Ergebnis wäre das, wie in Abbildung 4.9 zu sehen, dass Kanal 1 die Stellung für den Servo 1 (Ausschlag in eine Richtung), Kanal 2 für den Servo 2 (Ausschlag in die andere Richtung) angibt und dass Kanäle 3 bis 8 keinen Ausschlag erzeugen (Mittelstellung). Zum Abschluss des Frames wird eine Synchronisierungssequenz angehängt.

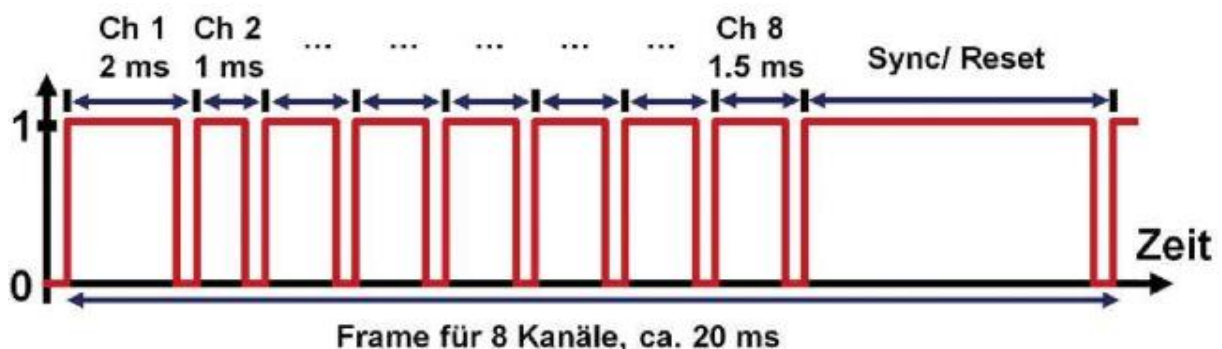


Abbildung 4.9: Acht PWM Kanäle werden zu einem Frame zusammengehängt [144, S. 62]

Alternativ wird hierfür auch die Puls-Pausen-Modulation (PPM) verwendet. Diese invertiert das PWM Signal. Dabei ist der Puls immer gleich lang, jedoch die Pause zwischen den Pulsen ist unterschiedlich.

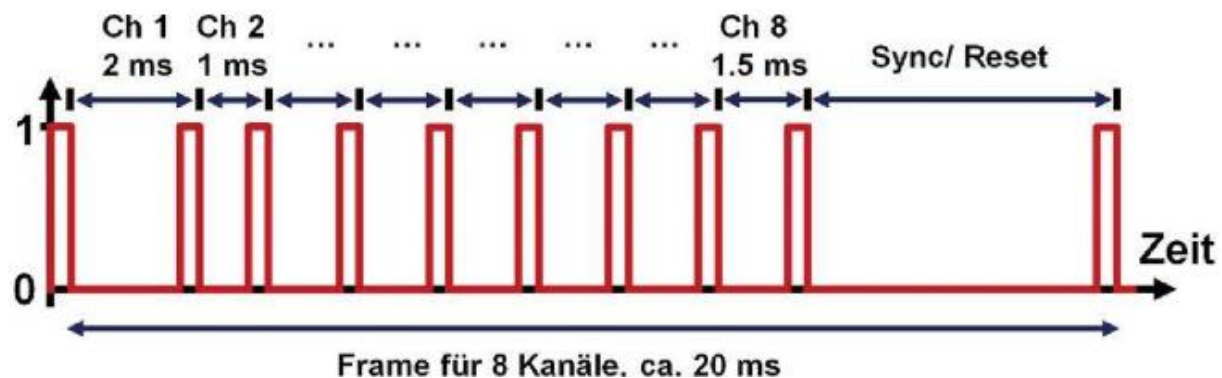


Abbildung 4.10: Frame aus 8-Kanälen mit PPM-moduliert [144, S. 62]

Es handelt sich bei dieser Modulationsart um eine speziell im Modellbau zur Anwendung kommende Technik. Diese ist nicht zu verwechseln mit der Puls-Positions-Modulation (ebenfalls PPM) aus der Nachrichtentechnik. Der Frame von zuvor würde dann so aussehen:

Ein gesamter Frame hat eine Dauer von 20 ms und wird danach wiederholt. Das bedeutet, dass die Stellung der Servos entsprechend 1/0,02-mal, also 50-mal pro Sekunde aktualisiert wird.

Eine weitere Modulationsart, die verwendet wird, ist die Puls-Code-Modulation (PCM). Dabei wird die Stellung des Knüppels über einen Analog-Digital-Umsetzer (ADU) direkt in einen Binärwert ausgegeben. Je nach Auflösung des ADUs, typische Werte wären 8 bis 12 Bit, ergibt sich ein Zahlenraum zwischen 0 bis 2^n-1 , wobei n die Auflösung des ADUs bezeichnet. Für einen 12 Bit ADU würde das einen Bereich von 0 bis 4095 entsprechen. Die Länge des zu übertragenden Frames muss dann an die Auflösung des ADUs angepasst werden. Bei einem Wert für die Lage des Knüppels von beispielsweise 1445 würde das einem Binärwert von 010110100101 entsprechen. Ein solcher Zahlenwert entspricht dann wiederum einem Kanal. Für einen gesamten Frame müssen dann jeweils 8 Digitalwerte hintereinander gehängt werden. Zum Abschluss des Frames wird ein Prüfbit gesendet, welches die letzte Stelle der Summe aller einzelnen Binärwerte des Frames darstellt. Die Erstellung der Prüfsumme sowie deren Integration in den Frame ist jedoch Herstellerspezifisch [144, S. 64].

PPM, PWM und PCM beschreiben allesamt die Basisband-Modulation und bilden die in Abbildung 4.8 zu sehenden Blöcke Kodierung bzw. Dekodierung, bei der im Empfängerpfad die PPM bzw. PCM-Signale wieder in für analoge Servos umsetzbare PWM-Signale umgewandelt werden. Es gibt auch digitale Servos, die z.B. PCM-Signale direkt in eine Aussteuerung umsetzen. Um das Basisbandsignal nun über den Übertragungskanal mittels Hochfrequenztechnik (HF) zu übertragen, müssen die jeweiligen Digitalwerte des Basisbands mit einem HF-Trägersignal gemischt werden. Der Träger hat dabei eine Frequenz im ISM-Band zwischen 2,40 und 2,48 GHz. Beim Binding wird dabei der Kanal, also der exakte Frequenzbereich zwischen Sender und Empfänger, abgestimmt. Bei der Trägermodulation kann entweder die Amplitude, die Phase oder die Frequenz in Abhängigkeit des Binärwertes des Basisbandsignals manipuliert werden.

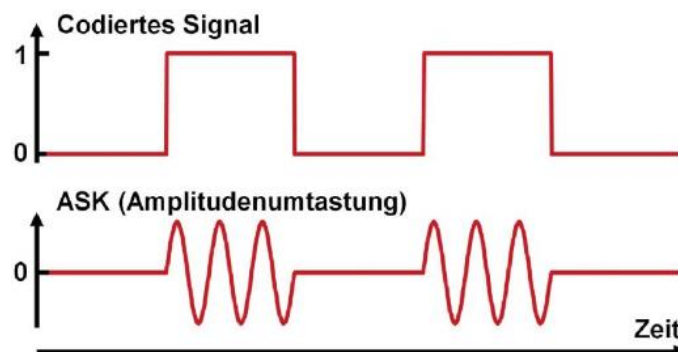


Abbildung 4.11: Amplitude-Shift-Keying [144, S. 67]

Dabei spricht man von „Shift-Keying“, wobei dann ASK (Amplitude), PSK (Phase) und FSK (Frequenz) als digitale Modulationsarten zum Einsatz kommen. Das bedeutet für die ASK,

dass bei einer 0 (logisch LOW) im Basisband der Träger entweder mit einem kleinen Wert oder null und eine 1 (HIGH) mit einem größeren Wert für die Amplitude des Trägers dargestellt wird (Abbildung 4.11).

Wird die Amplitude zwischen 0 (LOW) und einem fixen Wert (HIGH) alternierend gesendet, wird auch von *On-Off-Keying* gesprochen. Das bedeutet, der Träger wird bei einer digitalen null aus- und bei einer digitalen eins eingeschaltet. Diese Technik kommt nur noch selten zum Einsatz, da bei einem schlechten Empfang die Amplitude sehr geschwächt und somit fälschlicherweise als null interpretiert werden kann.

Das *Frequency-Shift-Keying* (FSK) ist eine Modulation, bei der der Frequenz des Trägers je nach digitalem Inputwert LOW oder HIGH entweder ein kleines Δf abgezogen oder hinzugefügt wird. Die allgemeine Formel für einen sinusförmigen Träger wäre:

$$u_T = \hat{u} \cdot \sin(2\pi f_T + \varphi) \quad (8)$$

Das heißt in diesem Fall, dass der Träger mit zwei unterschiedlichen Frequenzen gesendet wird. Dem Basisbandwert 0 (LOW) würde dann beispielsweise die Frequenz $f_L = f_T - \Delta f$ zugeordnet und dem Wert 1 (HIGH) die Frequenz $f_H = f_T + \Delta f$, wobei f_T die Frequenz des Trägersignal ist. Die zu sendenden Signale ergeben sich jeweils aus Formel (8), wenn man für f_T die Werte für f_L und f_H einsetzt. Der Empfänger, der nach dem Binding f_T kennt, kann nun durch Vergleichen der Frequenzen die Werte 0 und 1 detektieren. Dieses Verfahren ist robuster als das ASK und kann für PPM sowie PCM Basisbandsignale verwendet werden [144, S. 68].

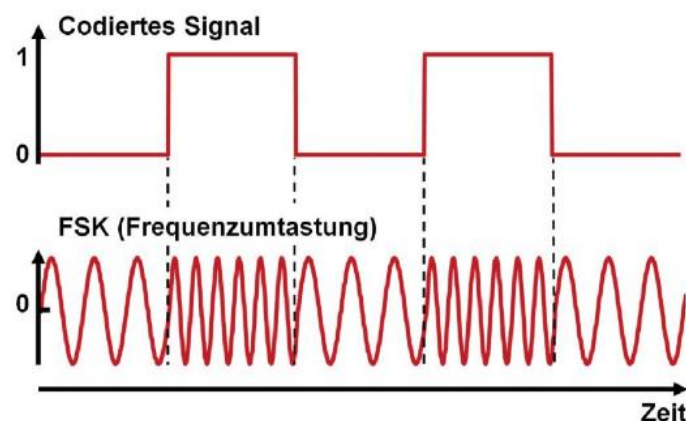


Abbildung 4.12: Frequency-Shift-Keying [144, S. 67]

Beim *Phase-Shift-Keying* steckt die Information in den Phasensprüngen. Das bedeutet, man variiert an der Formel (8) des Trägers den Parameter φ , die Phase. Für einen Basisbandwert 0 (LOW) wird z.B. φ auf 0° gesetzt und für 1 (HIGH) auf 180° . Dadurch ergeben sich die in Abbildung 4.13 zu sehenden Phasensprünge. Am Empfänger wird nun das Trägersignal mit dem Empfangssignal verglichen. Liegt keine Phasenverschiebung vor, ist eine 0 detektiert, liegt eine 180° Phasenverschiebung vor, eine 1.

Die genannten digitalen Modulationsarten sind alle in ihrer einfachsten Form erklärt. Das bedeutet, die hier angewendeten Varianten beschreiben binäre Verfahren. Somit wird beispielsweise die gerade beschriebene PSK auch BPSK, also *Binary-Phase-Shift-Keying*

bezeichnet, da nur zwei Zustände (binär) damit moduliert werden. Bei höherwertigen Modulationen werden die Parameter Amplitude, Frequenz und Phase eingeteilt durch Zweierpotenzen feiner differenziert. Bei einer QPSK (Quadratur-PSK) könnte man z.B. zwischen 2^2 Symbolen unterscheiden. Es kommen so vier unterschiedliche Phasen zum Einsatz. Weiters gibt es auch differenzielle Modulationsverfahren, wie die DPSK (Differential-PSK). Dabei werden die Phasensprünge immer nur bei einer Änderung des Eingangswertes durchgeführt. Dabei würde am Empfänger der Vergleich zum Träger wegfallen, da eine Phasenänderung einer Bitänderung (0 zu 1 bzw. 1 zu 0) entspricht.

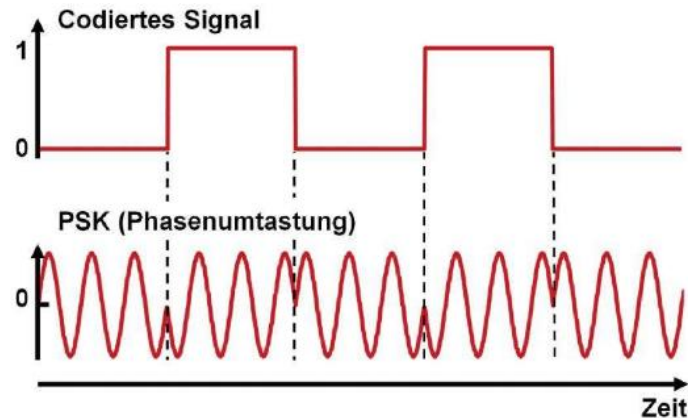


Abbildung 4.13: Phase-Shift-Keying [144, S. 68]

Die wohl wichtigste Eigenschaft der modernen RCs ist die Fähigkeit der Frequenzspreizung. Dies ist notwendig, um im sehr stark frequentierten 2,4 GHz ISM-Band die notwendige Störfestigkeit zu erreichen, die einen sicheren Betrieb des UAVs ermöglichen. Bei dieser Technik geht es darum, das schmalbandige Trägersignal, dessen Frequenz zwischen 2,40 und 2,48 GHz liegt, in ein Signal mit einer größeren Bandbreite verteilt über das gesamte nutzbare Spektrum überzuführen. Die dabei zum Einsatz kommenden Techniken sind das *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS) und *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS). Um näher auf diese Techniken eingehen zu können, wird zuvor der Informationsgehalt in Bit I einer Nachricht definiert. Dieser ergibt sich aus:

$$I = B \cdot T \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_S}{P_N} \right) = B \cdot T \cdot D \quad (9)$$

- I Informationsmenge in Bit
- B Bandbreite des Signals in Hz
- T Signaldauer in s
- D Dynamik, ein Maß für die Störanfälligkeit
- P_S Signalleistung
- P_N Störleistung

Die Bandbreite B bezieht sich auf einen Frequenzbereich. Der nutzbare Frequenzbereich im 2,4 GHz ISM-Band wäre 83 MHz, von 2,40 bis 2,483 GHz. Die Signaldauer hängt von der Modulationsart sowie der Länge der zu übertragenden Frames ab. Bei den zuvor vorgestellten binären Modulationsarten wird in einem Schritt eine Informationseinheit (Bit) übertragen. Die Dynamik ist ein Maß, das den Leistungsunterschied zwischen dem gesendeten Signal und dem Rauschen angibt. Dies ist für eine Übertragung annähernd konstant. Das Prinzip der Frequenzspreizung ist nun, anstatt einer großen Menge an Information mittels starker

Sendeleistung innerhalb eines schmalen Frequenzbereiches zu senden, die Informationen in kleinere Teile auf mehreren Frequenzbereichen verteilt mit geringerer Sendeleistung zu versenden.

Das *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS) ist ein Frequenzspreizverfahren, das die Frequenzspreizung durch regelmäßiges Ändern der Trägerfrequenz (= hopping) im nutzbaren Frequenzbereich umsetzt. Dabei wird das 2,4 GHz ISM-Band von 2,40 bis 2,83 GHz in 79 (F_1 bis F_{79}) 1 MHz Kanäle unterteilt [148, S. 161]. Manche Systeme verzichten auf Kanäle und führen jeweils ein unteres und oberes Schutzband (Guardband) ein [149]. Der gesamte Datenstrom wird geteilt in kleine Pakete. Die kleineren Datenpakete werden jeweils innerhalb eines sogenannten Hops übertragen. Bevor die Übertragung starten kann, muss der Empfänger synchronisiert werden. Das geschieht beim „Binding“. Die Auswahl der jeweils nächsten Subbänder wird im Sender vor dem Datenübertragungsstart über einen *Pseudo Random Number* (PRN) Generator festgelegt und nennt sich das Hopping Muster. Diese Information wird durch das Binding auch dem Empfänger mitgeteilt. Nach dem Binding startet die Datenübertragung bei einem zufälligen Subfrequenzband F_i , im Beispiel in Abbildung 4.14 z.B. bei F_2 . Nach jedem Hop, also der Übertragung eines kleinen Teils der Daten hüpfet der Sender und Empfänger, der das Hopping-Muster ebenso kennt, auf ein anderes Subfrequenzband, im Beispiel F_4 . Dieser Prozess wird fortgesetzt und es ergibt sich ein für diese Übertragung spezifisches Hopping-Muster. Die eigentliche Übertragung findet jeweils über 1 MHz breite (schmalbandig) Kanäle statt. Da aber durch das Hopping die gesamte verfügbare Bandbreite des ISM 2,4 GHz-Bandes ausgenutzt wird, spricht man bei dieser Technik ebenso von einem Frequenzspreizverfahren.

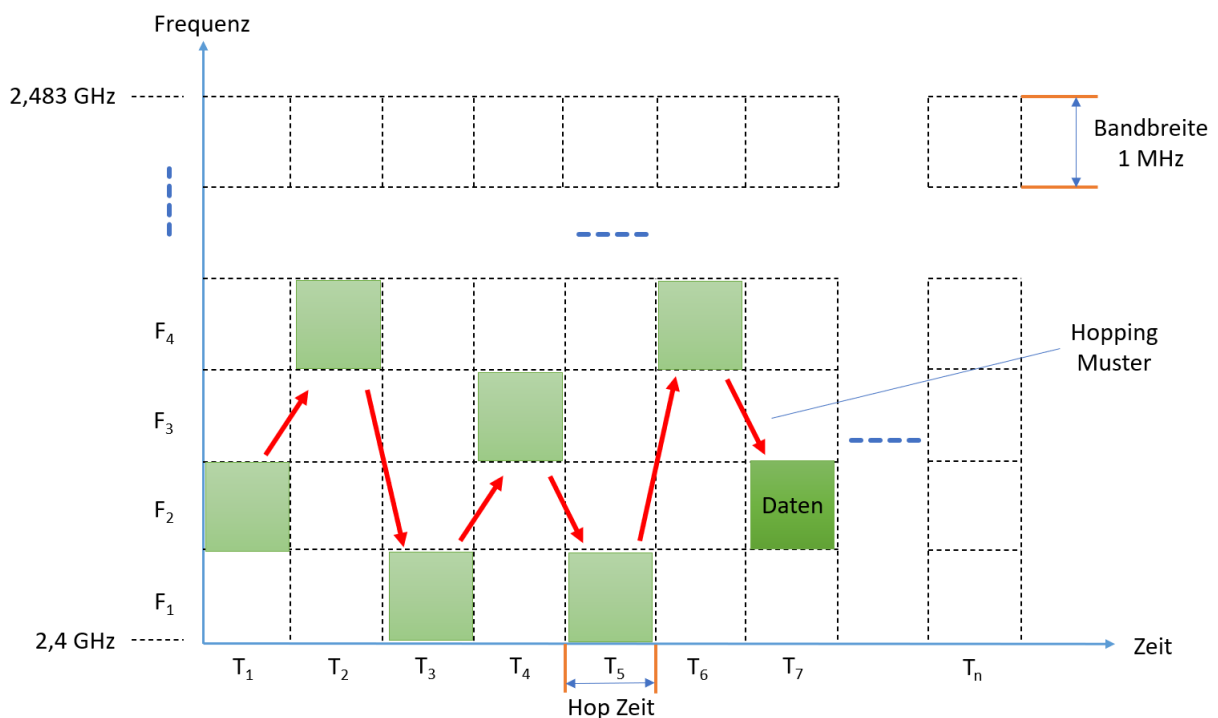


Abbildung 4.14: FHSS – Beispielhaftes Hopping-Muster

Man unterscheidet *Slow-Hopping*, bei dem mindestens ein Bit pro Hop übertragen und *Fast-Hopping*, wo maximal ein Bit pro Frequenzsprung übertragen wird. Technisch setzen das viele Hersteller von RCs unterschiedlich um. Das FHSS kommt jedenfalls nach der digitalen Modulation, wie z.B. FSK, zum Einsatz, bei der die Daten (PPM, PWM) auf einen Träger mit einer Frequenz in etwa der Mitte des ISM 2,4 GHz-Bandes moduliert werden. Das von einem sogenannten Frequenzsynthesizer erzeugte Δf wird am Mischer zum FSK modulierten Signal hinzugemischt. Der Synthesizer wählt das Δf anhand der über PRN bestimmten *Hopping-Sequenz*. Am Empfänger ist dieselbe *Hopping-Sequenz* bekannt und mittels des Synthesizers wird erst das Δf vom Träger entfernt (Dehopping) und anschließend kann das Signal digital demoduliert werden, um das PWM Signal für die Servos und Motoren aus dem Datenframe zu erhalten (Abbildung 4.15).

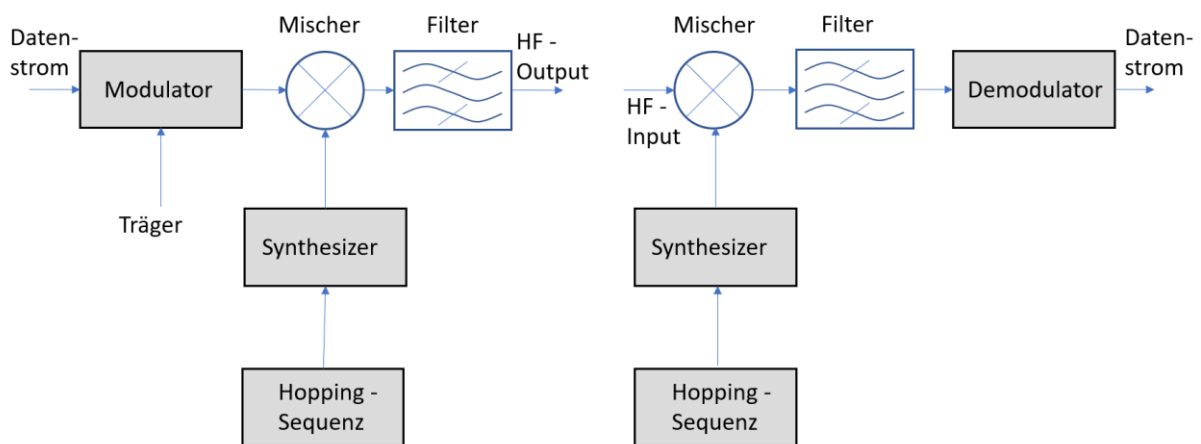


Abbildung 4.15: Schematische Darstellung des Senders und Empfängers für FHSS

Beim parallelen Betrieb vieler FHSS RCs ergeben sich durch die 79 Subkanäle auch Hops, in denen ein oder mehrere RCs ihre Daten senden. Dies führt zwar in diesem Fall für alle in diesem Hop verweilenden RCs zum Verlust von Daten (im Bereich ein Bit), was aber leicht kompensiert werden kann. Beispielsweise wird ein korrupter Frame, bei dem durch den Fehler die Prüfsumme nicht stimmt, im Empfänger einfach verworfen. In dieser kurzen Zeit (im ms Bereich) bleibt die Stellung der Servos unverändert.

Eine weitere Frequenzspreiztechnik, die auch bei RCs zum Einsatz kommt, ist das *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS). Diese Technik kommt u.a. auch beim Mobilfunk der dritten Generation (Universal Mobile Telecommunications System, UMTS) oder dem Wi-Fi Standard 802.11b zum Einsatz. Das Grundproblem ist wiederum, dass bei einer schmalbandigen Übertragung eine Störung im selben Frequenzbereich die Übertragung stark beeinflusst. Das Ziel dieser Technik ist wiederum, das Signal bei gleichem Informationsgehalt über einen größeren Frequenzbereich zu spreizen. Im Empfänger findet die Entspreizung statt, bei der das Nutzsignal rekonstruiert wird. Durch den Vorgang selbst wird die schmalbandige Störung auf das ganze Band verteilt und bleibt so ohne großen Einfluss. Den Gewinn, den man dabei erzielt, kann man folgendermaßen beschreiben [148, S. 163]:

$$G \approx \frac{B_{gespr.}}{B_{orig.}} = \frac{R_{ch}}{R_S} \tag{10}$$

Dieser ist einerseits das Verhältnis der gespreizten Bandbreite zur originalen Bandbreite bzw. das Verhältnis der gechipten Rate zur Signalrate. Aus dieser Formel lässt sich ableiten, dass man die ursprüngliche Signalrate mit vielen wechselnden Pegeln, sogenannten Chips, erweitern muss, um einen großen Gewinn zu ermöglichen. Die Chips werden durch einen *Pseudo-Random-Number* (PRN) Generator erzeugt. Es wird der Datenstrom dann vor der beispielsweise BPSK Modulation mit den Chips multipliziert. Es ist entscheidend, dass sich die Pegel der Chips um ein Vielfaches schneller ändern als die der Nutzdaten. Das Verhältnis der beiden wird als Spreizfaktor bezeichnet.

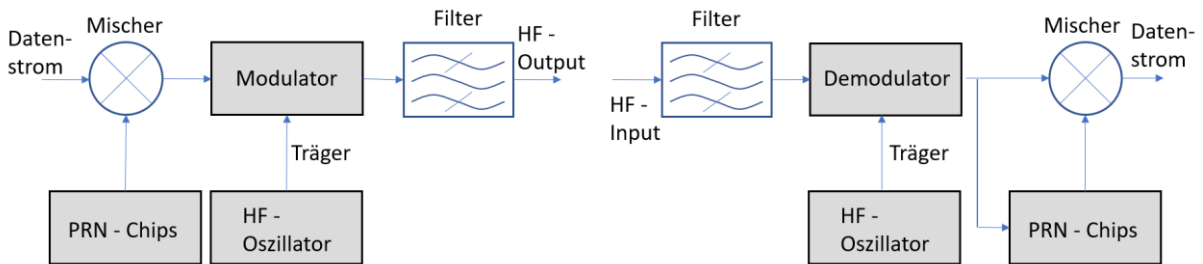


Abbildung 4.16: Schematische Darstellung des Senders und Empfängers für DSSS

Die PRN Sequenz hat eine deutlich höhere Frequenz als der Datenstrom. Wie in Abbildung 4.17 zu sehen wird die PRN-Sequenz mit den Nutzdaten logisch XOR verknüpft. Dadurch ist die Information der Nutzdaten in der höherfrequenten Chip-Sequenz enthalten.

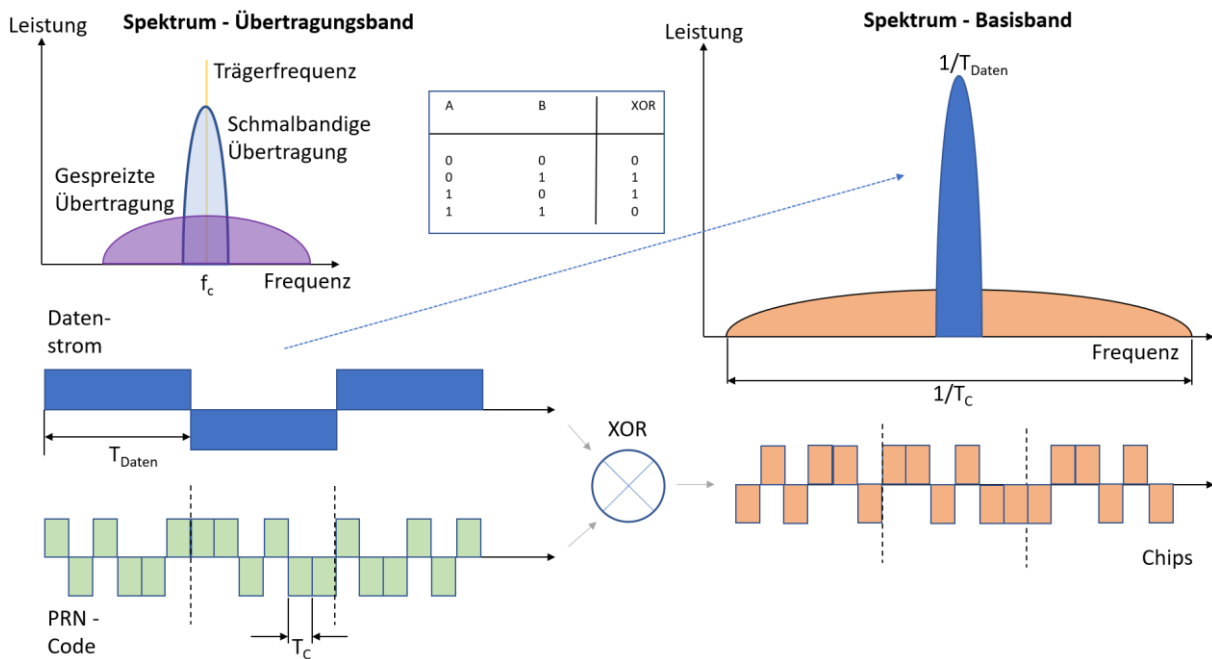


Abbildung 4.17: Die Verknüpfung des höherfrequenten PRN-Codes mit den Nutzdaten ergibt eine Spreizung bei DSSS

Mischt man nun dieses höherfrequente Basisbandsignal zum hochfrequenten Trägersignal f_c ergibt sich daraus ein im Übertragungsspektrum besser verteiltes und somit gespreiztes Signal

(Abbildung 4.17 oben links in lila). Durch die Spreizung ist die Störanfälligkeit des breitbandigen Signals geringer. Eine meist schmalbandige Störung würde hier bei einzelnen Chips Fehler verursachen. Diese Fehler lassen sich jedoch leicht am Empfänger, z.B. durch Mittelwertbildung, korrigieren. Am Empfänger wird erst der Träger entfernt. Danach wird die empfangene Chip Sequenz wieder logisch XOR verknüpft und man erhält wieder den ursprünglichen Datenstrom. Mögliche Fehlerkorrekturen wurden in Abbildung 4.16 nicht berücksichtigt.

In der Praxis werden diese beiden hier idealisiert dargestellten Verfahren von den Herstellern oft modifiziert. Weiters gibt es auch Kombinationen beider Verfahren, entweder dass zuerst mittels DSSS nur wenig spreizt und dann FHSS anwendet, bzw. auch umgekehrt. In Diversity-Systemen, die zwei voneinander unabhängige Sender und Empfänger haben, können auch je Sender- und Empfängerpaar unterschiedliche Hopping Sequenzen (FHSS) bzw. unterschiedliche PRN Sequenzen (DSSS) zu Einsatz kommen, um die Robustheit zu erhöhen. Dadurch ergeben sich oft herstellerspezifische Bezeichnungen wie AFHSS (Advanced FHSS), DMSS (Dual Modulation Spectrum System), DSM2 (Digital Spectrum Modulation 2), DSMX (Digital Spectrum Modulation X), FASST (Futaba Advances Spread Spectrum), FHSS-4T oder S-FHSS [144, S. 77]. Das führt in weiterer Folge dazu, dass jeweils Sender- und Empfänger-Hardware vom selben Hersteller sein muss, da diese spezifischen Spreizvarianten nicht untereinander kompatibel sind.

Eine weitere wichtige Signaleigenschaft ist die Sendeleistung. Bevor darauf eingegangen wird, sollen die Abstrahleigenschaften einer Antenne betrachtet werden. In der Funktechnik muss zwischen dem Nah-, dem Übergangs- (Fresnel-Region) und dem Fernfeld (Fraunhofer-Region) unterschieden werden. Das Nahfeld ist die direkte Umgebung zur Antenne, wo Rückwirkungen das elektromagnetische Feld beeinflussen.

Tabelle 4.4: Nah-, Übergangs- und Fernfeld von Antennen [146, S. 40]

Typ	Definition
Nahfeld	Näherungsweise $r < 0,1\lambda$
Übergangsfeld (Fresnel-Region)	Allgemein $r = 0,62 \cdot \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$ oder näherungsweise $0,1\lambda \leq r \leq 4\lambda$
Fernfeld (Fraunhofer-Region)	Große Antennen: $r = \frac{2D^2}{\lambda}$ Kleine Antennen: $r = \frac{1}{2\pi} \lambda$ oder näherungsweise: $r > 4\lambda$

Im Fernfeld breitet sich die elektromagnetische Welle unabhängig von der Antenne im Raum als ebene Welle aus. Die Bereiche sind in Tabelle 4.4 nach [146, S. 40] definiert über die Wellenlänge λ , den Abstand von der Antenne r und die größte Ausdehnung der Antenne D . Bei 2,4 GHz beträgt die Wellenlänge etwa 12 cm. Das bedeutet, das Fernfeld fängt etwa bei 48 cm an. Daraus ergibt sich eine Betrachtung für die Sendeleistung für 2,4 GHz RCs rein auf das Fernfeld. Für das Verständnis der Sendeleistung soll zuvor die allgemeine Formel für die Strahlungsdichte im Fernfeld anhand der Abstrahlung eines (idealen) isotropen Strahlers betrachtet werden:

$$S = \frac{P_S}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (11)$$

P_S stellt dabei die in Raum abgegebene ideale Wirkleistung der Strahlungsquelle dar und der Quotient die Kugelfläche. Das bedeutet, man geht bei der Strahlungsdichte im Fernfeld von kugelförmiger Abstrahlung aus. Die Leistungsdichte nimmt also mit dem Quadrat zur Entfernung ab. Die Leistung am Empfangsort P_r , also üblicherweise an der Empfängerantenne (Receiver, r), ist definiert durch:

$$P_r (W) = S \cdot G \cdot A_W = S \cdot G \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (12)$$

A_W ist dabei die Wirkfläche einer isotropen Antenne und G stellt deren Gewinn dar [150, S. 191]. Eine direkte Definition der Sendeleistung gibt es nicht. Nach (4) kann sie als Differenz der in die Antenne eingespeisten Energie weniger der Verlustleistung gesehen werden. Eine andere Betrachtung ist die äquivalente isotrope Strahlungsleistung (equivalent isotropically radiated power) EIRP. Diese ist definiert als das Produkt der der Antenne zugeführten Leistung P_S und dem dimensionslosen Antennengewinn G_i bezogen auf die Strahlleistung des Isotropenstrahlers [146, S. 902]:

$$EIRP (W) = P_S \cdot G_i \quad (13)$$

Die EIRP stellt somit eine Wirkleistung dar, die einem verlustlosen isotropen (in alle Richtungen gleichmäßig abstrahlend) Strahler zugeführt werden muss, damit dieser die gleiche Leistung wie die betrachtete Antenne in ihrer Hauptstrahlrichtung liefert [146, S. 903]. Für den Betrieb von RCs ist der EIRP ein wichtiger Faktor, denn über diesen Wert sind die rechtlichen Rahmen bezüglich der erlaubten Sendeleistung definiert. Dazu existieren die Normen EN 300440, die eine EIRP von 10 mW ohne und EN 300328, die eine maximale EIRP von 100 mW für Systeme mit FHSS vorgeben [144, S. 78]. Aufgrund der hohen Dichte an Teilnehmern (z.B. Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, RCs) im ISM 2,4 GHz-Band werden diese beiden Normen ständig überarbeitet. Dabei gibt es adaptive und nicht adaptive Ansätze. Der nicht adaptive Ansatz wäre dabei eine zeitliche Beschränkung der Aussendung. Beispielsweise wird ein HOP bei FHSS anstatt durchgehend mit 10 mW nur für 1/10 der Zeit, aber dafür mit 100 mW gesendet. Im Mittel ergeben sich daraus wiederum nur 10 mW EIRP. Der adaptive Ansatz beschreibt z.B. die Technik „listen before talking“ LBT. Dabei wird die aktuelle Belegung des gesamten Frequenzbandes evaluiert und die eigene Sendeleistung adaptiv daran angepasst. Die Problematik, die hier existiert, ist, dass weltweit viele Hersteller nach unterschiedlichen bzw. teilweise auch nach gar keinen Normen ihre RCs herstellen. Das bedeutet, dass eine nicht in der EU erworbene Fernsteuerung unter Umständen sich nicht an die hiesigen Normen hält. Das kann zu einer massiven Störung im ISM-Band führen, denn wenn ein System durch eine zu starke Sendeleistung das Band blockiert, kommt es bei allen anderen Systemen zu Störungen.

Es gibt mittlerweile auch Hersteller, die auf andere Frequenzen ausweichen. Im *First Person View* (FPV)-Bereich wird im DACH-Raum das 5,8 GHz-Band verwendet. FPV-UAVs sind dabei eher kleine UAVs (MTOW < 250 g), die hauptsächlich für Rennzwecke eingesetzt werden. Dabei steuert der Pilot das UAV unter Zuhilfenahme eines live Videobildes, das direkt vom

UAV an den Piloten gesendet wird. Dieser trägt dazu eine Videobrille. Da bei diesen UAVs durch das Video höhere Bandbreiten notwendig sind, ist man schnell vom stark frequentierten ISM 2,4 GHz auf das ISM 5,8 GHz-Band ausgewichen. Detaillierte Frequenzbereiche können unter [151] nachgelesen werden. Es gilt für FPV eine EIRP von 25 mW im 5.8 GHz-Band.

Seitens der Firma Black Sheep gibt es für RCs auch spezielle Long Range Sender und Empfänger im 868 GHz *Short Range Device* (SRD)-Band. Diese Module können als Erweiterung auf klassische 2,4 GHz RCs angebracht werden. Grundsätzlich ist die EIRP in diesem Band ebenso auf 25 mW beschränkt, wie in der Norm EN 300 220-2 spezifiziert wird. Allerdings kann bei diesen Modellen neben dem offiziellen Modus auch ein „long range“ Modus aktiviert werden. Dabei geht die maximale Sendeleistung auf 2 W und übersteigt so die erlaubte Sendeleistung deutlich.



Abbildung 4.18: Team Black Sheep Sender (links) und Empfänger (rechts) [152]

4.3 Stand der Technik von Datenlinks für die unbemannte Luftfahrt

Wie schon in Kapitel 1.3 erläutert, gibt es für die derzeitige kommerzielle unbemannte Luftfahrt keine rechtlichen Vorgaben, welche Hardware zum Einsatz kommen soll. Eine Übersicht über kommerziell eingesetzte UAVs bietet unter anderem die Plattform Commercial UAV News. Im „Einkaufsbereich“ findet man eine umfangreiche Liste an weltweiten kommerziellen UAV Herstellern [153]. Auch in Österreich ist der Markt an kommerziellen UAV Betreibern gewachsen, was man anhand der vielen Vertreter auf der Webseite www.airandmore.at nachlesen kann [154]. Viele kommerzielle Betreiber besitzen nicht das Knowhow, ein eigenes UAV herzustellen. Daher wird gerne auf die professionellen Modelle von Herstellern wie z.B. DJI zurückgegriffen. Diese Modelle kann man auch relativ einfach für die Kategorie A zulassen (siehe Kapitel 2.1), da diese häufig eingesetzt werden und die Behörden somit mit diesen Modellen die meiste Erfahrung im Zulassungsprozess haben.

Die bei den kommerziellen Modellen zum Einsatz kommenden Datenlinks operieren zu mehr als 90% in den ISM 2,4 GHz und ISM 5,8 GHz-Bändern [155]. Es werden somit primär die aus Kapitel 4.2 vorgestellten Techniken DSSS und FHSS einzeln oder in Kombination für den Datenlink eingesetzt. Zur Übersicht sind in Abbildung 4.19 und Tabelle 4.5 einige bekannte Hersteller von UAVs, Fernsteuerungen und Funkhardware, die auch bei kommerziellen Modellen Anwendung finden angegeben. Bei kommerziellen UAV Einsätzen ist besonders die Betrachtung des Gesamtsystems UAS wichtig. Ein sicheres Zusammenspiel zwischen UAV,

Datenlink, Bodenstation und Payload ist die Voraussetzung für einen sicheren Betrieb. Die einzelnen Komponenten wurden in Kapitel 3 bereits vorgestellt.



Abbildung 4.19: Gängige RCs von Futaba und FrSky, ein FrSky-Empfänger und ein 433 MHz Telemetrie Set (v.l.n.r.) [156]

Tabelle 4.5: Übersicht von Datenlinks kommerzieller Hersteller

Hersteller	Datenlinktyp	Frequenz	Modulation	Technologie
DJI Phantom	Command and Control (C2)	2,4 Ghz/5,8 Ghz	FHSS/DSSS	FASST/Lightbridge
Futaba	Command and Control (C2)	2,4 Ghz	FHSS/DSSS	FASST
FrSky	Command and Control (C2)	2,4 GHz/868 MHz	FHSS/DSSS	ACCST
Spektrum	Command and Control (C2)	2,4 Ghz	FHSS/DSSS	DSMX
JR	Command and Control (C2)	2,4 Ghz	FHSS/DSSS	DMSS
Hitec	Command and Control (C2)	2,4 Ghz	FHSS/DSSS	AFHSS
Graupner	Command and Control (C2)	2,4 Ghz	FHSS/DSSS	HOTT
Yuneec	Command and Control (C2)	2,4 Ghz	DSSS	ZigBee
Parrot AR2	Command and Control (C2)		OFDM	Wi-Fi
DJI Phantom	Payload	2,4 Ghz	OFDM	Lightbridge/Wi-Fi
Immersion	Payload	2,4 Ghz	FM	
Yuneec	Payload	5,8 Ghz	OFDM	
Connex	Payload	5,8 Ghz	FM	
Immersion	Payload	5,8 Ghz	FM	
Boscam	Payload	5,8 Ghz	FM	
3DR	Telemetry	433 MHz	FHSS	

4.4 Command and Control (C2)-Link

Gemäß dem ICAO RPAS-Handbuch [157] gilt es zwischen dem *Command and Control (C2)*-Link, der aus der Telemetrie sowie dem Telecommand-Link und dem Payload-Link zu unterscheiden, wie in Abbildung 4.20 dargestellt. Die C2-Verbindung ist die wesentliche

Verbindung zur Steuerung des UAVs. Die Steuerung kann direkt über den Telecommand-Link mittels RC erfolgen oder indirekt über Telemetrie-Link mittels des Flugreglers nach Standort (Go-To), Richtung (Heading) oder Wegpunkte (Fly-By). Die Datenrate ist dabei nicht sehr hoch, aber die Latenzen sind kritisch. Die Telemetriedaten umfassen alle Flugdaten wie z.B. Höhe, Geschwindigkeit, Heading, Position (Geo Koordinaten) und den Batteriestand. Wiederum ist die Datenrate eher gering. Auftretende Latenzen in der Telemetrie Verbindung sind nicht so kritisch wie beim Telecommand-Link.

C2 Link Terminology

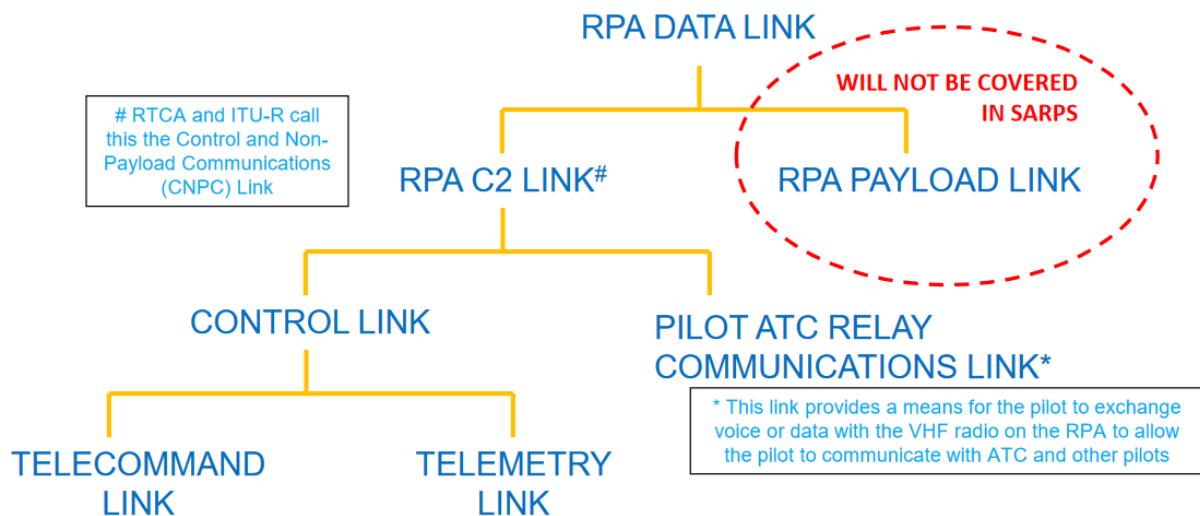


Abbildung 4.20: *Command and Control* Terminologie nach dem ICAO RPAS Manual [158]

Die Hauptmerkmale des C2-Datenlinks umfassen folgende Punkte [159]:

- **Überwachung des UAVs:** Zwei Hauptfunktionen bezüglich des Datenlinks müssen durch den Betreiber der UAV sichergestellt sein: Die erste besteht darin, dem Piloten die Steuerung sowie das Monitoring des UAVs in allen Missionsphasen zu ermöglichen; die zweite ist das UAV in den öffentlichen Luftraum zu integrieren und dabei Kontakt mit der Luftfahrtbehörde zu haben (ATC).
- **Integrität der Verbindung:** Alle Hauptfunktionen des UAV (Steuerung und Überwachung) hängen von der Datenverbindung ab. Die Integrität der Verbindung ist daher essenziell.
- **Verfügbarkeit von Links:** Die Gesamtverfügbarkeit der Verbindung, einschließlich Fading, Mehrwegverluste und Antennenfehlausrichtung sollten bei 99% liegen. Außerdem wird empfohlen, Redundanz-Maßnahmen zu integrieren bzw. eine Funktion zur erneuten Herstellung der Funkverbindung nach einem Abbruch zu implementieren.
- **Beyond Visual Line-of-Sight (BVLOS) Bedienbarkeit:** Um einen sicheren Betrieb des UAV über die visuelle Sichtlinie des Piloten hinaus zu gewährleisten, muss die Datenverbindung auch alle oben genannten Merkmale bei größeren Entfernungen erfüllen.

Im Oktober 2014 wurde seitens der JARUS Gruppe das *RPAS C2 link Required Communication Performance* (C2 link RCP) Konzept [160] veröffentlicht. Dieses geht konform mit dem ICAO Handbuch. Das C2-Link-RCP-Konzept charakterisiert den erforderlichen Leistungsumfang von Datenlinks, die UAV-C2-Funktionen unterstützen, ohne Bezug auf eine bestimmte Technologie zu nehmen und ist offen für neue Technologien. Dieser Ansatz ist wesentlich für die Entwicklung von Betriebskonzepten, die neue Technologien nutzen. Beispiele für UAV-C2-Funktionen sind u. a. die Bereitstellung von Befehlen an das UAV-Flugmanagementsystem, die Änderung des UAV- und des Monitoring-Systemstatus, die Bestätigung empfangener Befehle und die Rückmeldung von UAV-Vitalparametern (Batteriestand, Failsafe Meldungen des FCS).

Analog zu den zuvor genannten C2-Merkmalen werden im JARUS Dokument die folgenden RCP Parameter genannt:

- **Datenübertragungszeit** (in Sekunden): Die maximale Zeit für den Abschluss der operativen Datenübertragung, nach der der Initiator auf ein alternatives Verfahren zurückgreifen sollte.
- **Kontinuität** (Wahrscheinlichkeit pro Flugstunde, im Bereich 0,999): Die Wahrscheinlichkeit, dass eine operative Datenübertragung innerhalb der Kommunikationstransaktionszeit abgeschlossen werden kann.
- **Verfügbarkeit** (Wahrscheinlichkeit pro Flugstunde, im Bereich 0,999): Die Wahrscheinlichkeit, dass eine betriebliche Kommunikationstransaktion bei Bedarf eingeleitet werden kann.
- **Integrität** (Akzeptable Rate pro Flugstunde, im Bereich 10^{-4} bis 10^{-5}): Die Wahrscheinlichkeit, dass ein oder mehrere Fehler in einer abgeschlossenen Kommunikationstransaktion unentdeckt bleiben.

Anhand dieser Parameter sollen Hersteller sowie Betreiber im Zulassungsprozess den Behörden tabellarisch versichern, dass die gewählte C2-Technologie eine der jeweils geplanten Mission entsprechende Robustheit aufweist.

4.5 Stand der Technik zu Mobilfunk

Um die Möglichkeiten von Mobilfunktechnik für UAVs besser abschätzen zu können, ist es notwendig, sich mit den technischen Grundlagen vertraut zu machen. Daher wird in den nächsten Unterkapiteln erst kurz die Geschichte und anschließend auf die technischen Details der aktuellen vierten Mobilfunkgeneration eingegangen.

4.5.1 Geschichtliche Entwicklung

Die Entwicklung des Mobilfunks wird in Generationen beschrieben. Ausgegangen wird dabei von der Ära vor dem Mobilfunk als sogenannte nullte Generation, also die Zeit, in der es ab den 1950er-Jahren vermehrt kabelgebundene Telefonanschlüsse gab. Die erste Mobilfunkgeneration entstand in den 1980er-Jahren, als diverse private Firmen weltweit lokale Techniken dafür einführten. In Amerika wurde das *Analog Mobile Phone System* (AMPS), in Teilen von Europa das *Total Access Communication System* (TACS) und *Nordic Mobile*

Telephone (NMT) und in Japan das *Total Access Communication System* (J-TACS) entwickelt. Diese individuellen Systeme wurden als erste Generation des Mobilfunks bezeichnet und 1982 von Seiten Bell Labs unter dem gemeinsamen Namen *Advanced Mobile Phone System* (AMPS) bekannt. Bereits innerhalb der ersten Generation wurde das Prinzip der Zellstruktur entwickelt. Dabei geht es darum, dass man nur eine limitierte Anzahl an Trägerfrequenzen hat. Um diese wiederholt einsetzen zu können, müssen die Bereiche, in denen dieselbe Trägerfrequenz verwendet wird, geografisch voneinander getrennt sein. Daher wurden sogenannte Zellen eingeführt, also Bereiche, die eine Sendestation (Basestation – BS) mit einer bestimmten Trägerfrequenz (entsprechend der Zahlen 1 bis 7 in Abbildung 4.21) verwenden. Diese Zellen hat man wabenförmig angeordnet, damit benachbarte Zellen immer eine andere Trägerfrequenz aufweisen. Waren Zellen aber weit genug voneinander entfernt, konnte wieder die gleiche Trägerfrequenz verwendet werden (Cell Frequency Reuse), wie in Abbildung 4.21 zu sehen.

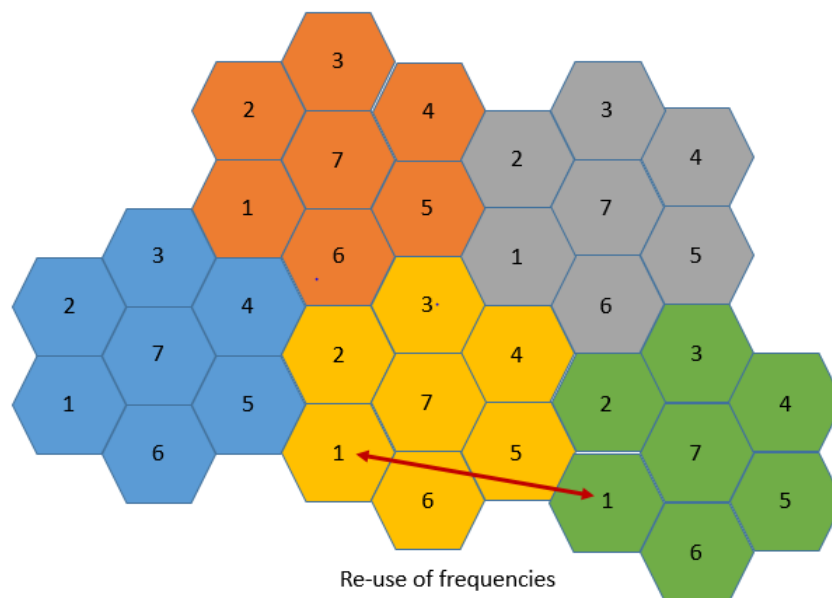


Abbildung 4.21: Zellenbasierter Aufbau eines Mobilfunknetzes

Die erste Generation war allerdings im Funktionsumfang noch stark limitiert. Es gab so gut wie keine integrierten Sicherheitsfeatures, die Kommunikation fand rein analog statt und es gab kein Roaming, also keine Möglichkeit in andere Zonen oder gar zu anderen Anbietern zu telefonieren. In Bezug auf Roaming formierte sich 1988 das *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) und begann mit der Entwicklung eines neuen Mobilfunkstandards. Der dabei entstandene ETSI GSM Standard umfasst dabei eine Unzahl an Dokumenten zur Standardisierung, sogenannte *Technical Specifications* (TS) [161, S. 5]. Die zweite Generation (2G) des Mobilfunks startete 1991 mit dem Global System for Mobile (GSM) Standard. Dieser Standard wurde als leitungsvermittelnder Dienst entworfen, der eine Verbindung exklusiv zwischen zwei Teilnehmern aufbaut [161, S. 1]. Mit dem GSM Standard wurden die Daten über das Mobilfunknetz digital verschlüsselt übertragen. Das Spektrum wurde effizienter ausgenutzt und ein neuer Datenservice, der *Short Message Service* (SMS) wurde eingeführt. Das GSM-Netzwerk unterteilt sich dabei in drei Subsysteme: Das *Basestation-Subsystem*

(BSS), das alle Aufgaben rund um die Verbindung von den Basisstationen zu den mobilen Teilnehmern abwickelt; das Network Subsystem (NSS), das die drahtgebundene Vermittlung der Gespräche sowie die Teilnehmerverwaltung übernimmt und somit auch als Kernnetzwerk (Core Network) bezeichnet wird; und das *Intelligent Network Subsystem* (IN), das sogenannte *Service Control Point* (SCP) Datenbanken enthält, die neben Informationen wie den Aufenthaltsort der Teilnehmer auch zusätzliche Dienste wie Prepaid Service (Guthabenabrechnung) bereitstellt [161, S. 13]. In Abbildung 4.22 ist ein schematischer Überblick über den Aufbau eines GSM-Netzwerks zu sehen. Innerhalb des NSS arbeitet das *Mobile-services Switching Centre* (MSC) als digitale Vermittlungsstelle. Innerhalb jedes MSCs gibt es auch ein *Visitor Location Register* (VLR), das die Daten und den Aufenthaltsort der Teilnehmer speichert, die innerhalb des MSCs angemeldet sind. Bei jeder Anmeldung eines Teilnehmers wird diese Information auch im Home Location Register gespeichert.

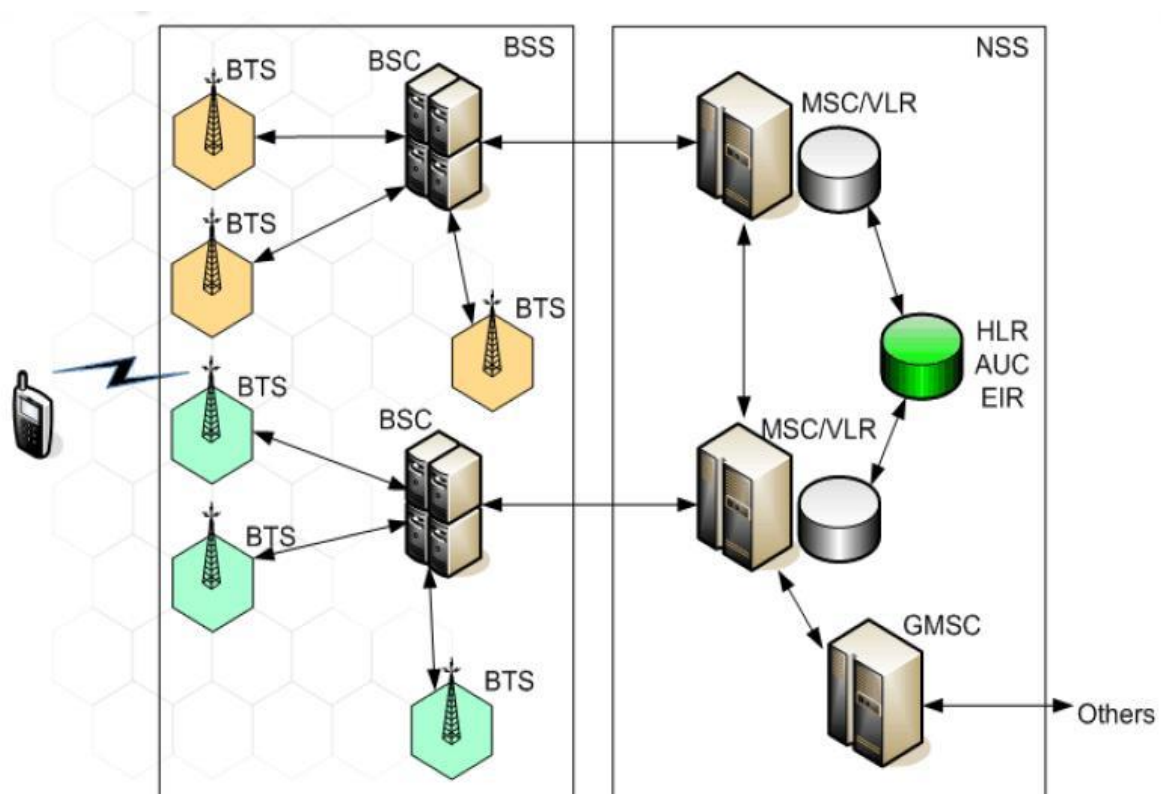


Abbildung 4.22: Grundlegender Aufbau des GSM Netzwerks [162]

Das HLR lädt auch umgekehrt diese Informationen gesammelt in die MSCs. Das IN ist durch den grünen Zylinder dargestellt und umfasst dabei das *Home Location Register* (HLR), das *Authentication Centre* (AUC) und das *Equipment Identity Register* (EIR). Als Schnittstelle zu anderen Netzwerken ist zusätzlich ein *Gateway MSC* (GMSC) vorhanden. Dies ermöglicht Roaming in ein anderes Mobilfunknetz oder ins Festnetz.

Einen bis heute immer noch wichtigen Bestandteil des Mobilfunknetzes stellt die *Universal Integrated Circuit Card* (UICC) oder auch *Service Identifier Module*, kurz SIM genannt, dar. Diese enthält alle Daten eines Teilnehmers und mit ihr kann der Endnutzer jedes beliebige Endgerät für den Mobilfunkdienst verwenden. Unter den enthaltenen Informationen sind unter anderem die *International Mobile Subscriber Identity* (IMSI) des Teilnehmers und dessen

geheimer Schlüssel (Ki), der für die Generierung des Verschlüsselungskeys Kc benötigt wird sowie für die allgemeine Authentifizierung [161, S. 67]. Die Simkarte selbst ist dabei ein kleines Microcontrollersystem, mit eigenem Prozessor und Speicher, das durch die Kontakte im Endgerät mit Energie und einer Taktfrequenz versorgt wird. Weitere Details zur SIM Karte sind unter [161, S. 67-72] zu finden.

Eine wichtige Eigenschaft im Mobilfunknetz stellt die Mobilität dar. Das bedeutet, dass die Endgeräte mobil sind und sich somit nicht nur innerhalb einer Zelle, sondern auch aus dieser hinaus in eine andere Zelle bewegen können. Um keinen Verbindungsabbruch zu erleiden, muss das Kernnetz gemeinsam mit den Basisstationen für einen reibungslosen Handover, also eine Übergabe von einer zur nächsten aktiven Basisstation, sorgen. Details zum Handover Verfahren bei GSM findet man in [161, S. 61-63].

Um höhere Datenraten zu erzielen wurde 1995 der General Packet Radio Service (GPRS) eingeführt und als 2,5G bezeichnet. Die wichtigste Neuerung dabei war die Einführung der paketvermittelten Datenübertragung (Packet Switching) im Vergleich zur bis dahin verwendeten verbindungsorientierten Datenübertragung. Die paketvermittelte Datenübertragung wird dabei mit dem Internet Protokoll (IP) durchgeführt und wird heute bis in die vierte Mobilfunkgeneration verwendet [161, S. 81]. 1997 gab es eine mittels des *Enhanced Data Rates for GSM Evolution* (EDGE) eine weitere Verbesserung des Standards für höhere Datenraten. Gerade in diesem Zeitraum kurz vor der Jahrtausendwende entstand ein Internet Boom. Der weltweite Webzugriff stieg exponentiell und neben allgemeinen Websurfen wurden auch Web Dienste stetig populärer. Die Suchmaschine Google ging etwa 1997 in den USA an den Start und 1999 startete der Musiktauschdienst Napstar [163].

1998 wurde das *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) gegründet. Bestand diese weltweite Kooperation von Standardisierungsgremien erst aus fünf, ist sie bis heute auf sieben sogenannte Organisational Partners angewachsen. Diese Organisationen zur Entwicklung von Telekommunikationsstandards wären die *Association of Radio Industries and Businesses* (ARIB, Japan), *Telecommunication Technology Committee* (TTC, Japan), *Alliance for Telecommunications Industry Solutions* (ATIS, US), *China Communications Standards Association* (CCSA, China), *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI, Europa), *Telecommunications Standards Development Society* (TSDI, Indien) und *Telecommunications Technology Association* (TTA, Korea). Gemeinsam erarbeiten diese Organisationen anhand von Berichten und Reports die neuen Standards für die weltweite Mobilfunkbranche und unterstehen dabei der ITU-R. Dabei werden zellulare Telekommunikationstechnologien abgedeckt, einschließlich Funkzugang, Kernnetz (Core- oder Backbone Network) und Dienstfunktionen, die eine vollständige Systembeschreibung für die mobile Telekommunikation bieten. Die 3GPP-Spezifikationen bieten auch Schnittstellen für den drahtgebundenen Anschluss zum Kernnetz sowie für die Kommunikation mit Nicht-3GPP-Netzen. Die 3GPP-Spezifikationen und -Studien werden von den Mitgliedsunternehmen in Arbeitsgruppen (Working Groups, WG) und auf der Ebene der *Technical Specification Group* (TSG) durch Beiträge (Technical Specifications, TS) vorangetrieben und veröffentlicht [164]. Die TSG unterteilen sie in:

- *Radio Access Networks (RAN)*
- *Services & System Aspects (SA)*
- *Core Network & Terminals (CT)*

Das erste große gemeinsame Projekt sollte die Einführung eines neuen, weltweit einheitlichen Mobilfunkstandards sein, der die dritte Generation den Mobilfunks einläuten sollte. Dieses Vorhaben wurde unter dem Namen *International Mobile Telecommunication at 2000 MHz (IMT-2000)* behandelt. Bereits 1997 wurde dafür auf der *World Radio Conference* ein 230 MHz breites Frequenzband im 2 GHz Bereich für das IMT-2000 Vorhaben reserviert [165]. 1998 wurden aus den seitens der 3GPP vorgeschlagenen Standards leider keine weltweiten Standards. Es entwickelte sich daraus in Europa und Japan der 3GPP UMTS, im amerikanischen Raum ein 3GPP2 und im Rest der Welt ein *Universal Wireless Communication (UWC)* Standard, der auf EDGE basierend war. Diese unterschiedlichen, jedoch nicht untereinander kompatiblen Standards bildeten gemeinsam die dritte Generation (3G) und wurden gemeinsam im IMT-2000 Programm behandelt. Dabei besteht dieser Standard aus drei Systemen und zwei Kerntechnologien. Als Systeme gelten dabei das *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)*, welches in W-CDMA und TD-CDMA unterteilt ist, sowie CDMA2000 und EDGE.

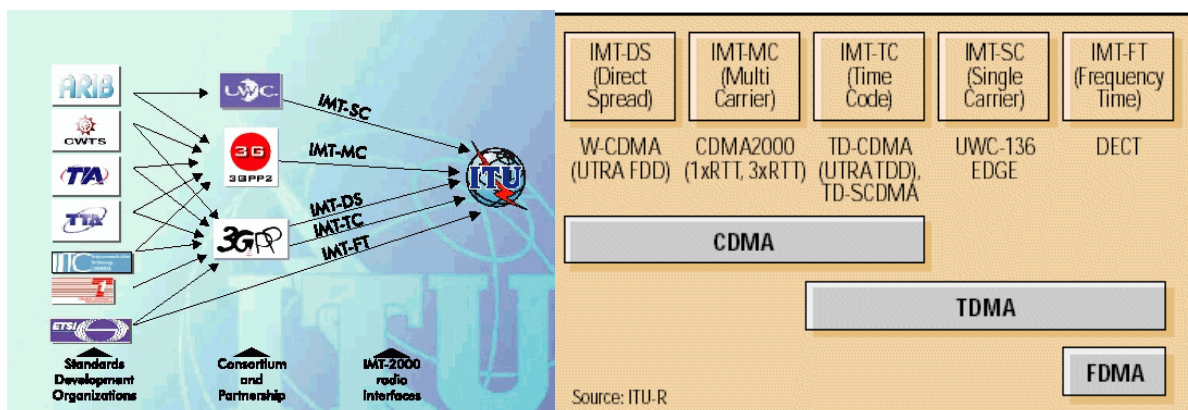


Abbildung 4.23: Beteiligte Organisationen des IMT-2000 Programms [166] und eine Übersicht über die Standards der dritten Mobilfunkgeneration [167]

Weiters wurde innerhalb des IMT-2000 ein Standard für Schnurlostelefone unter dem Namen *Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT)* spezifiziert. Um den Mehrfachzugriff auf den Frequenzen umzusetzen, wurde hier auf Multiplexverfahren gesetzt. Es kommt sowohl *Code Division Multiple Access (CDMA)*, *Time Division Multiple Access (TDMA)* als auch *Frequency Division Multiple Access (FDMA)* zum Einsatz [166]. Eine Übersicht darüber ist in Abbildung 4.23 rechts zu sehen.

Sogenannte Multiplexverfahren sind nachrichtentechnische Verfahren, um mehrere Signale gleichzeitig simultan oder sequenziell über ein Übertragungsmedium zu übertragen. Es sind effizienzsteigernde Verfahren, die sowohl in drahtgebundener- als auch in der drahtlosen Technik eingesetzt werden können. Es können dadurch beispielsweise die Daten mehrerer Nutzer gleichzeitig übertragen werden und man erreicht eine bessere Ausnutzung der Bandbreiten und erhöht dabei gleichzeitig die Datenraten. Das Multiplexverfahren kann dabei

zeitlich (Time Division Multiplex, TDM), räumlich (Space Division Multiplex, SDM oder Code Division Multiplex, CDM) oder frequenzmäßig (Frequency Division Multiplex, FDM, oder Wavelength Division Multiplex, WDM) erfolgen. Eine Übersicht über verschiedene Verfahren ist in Abbildung 4.24 gegeben.

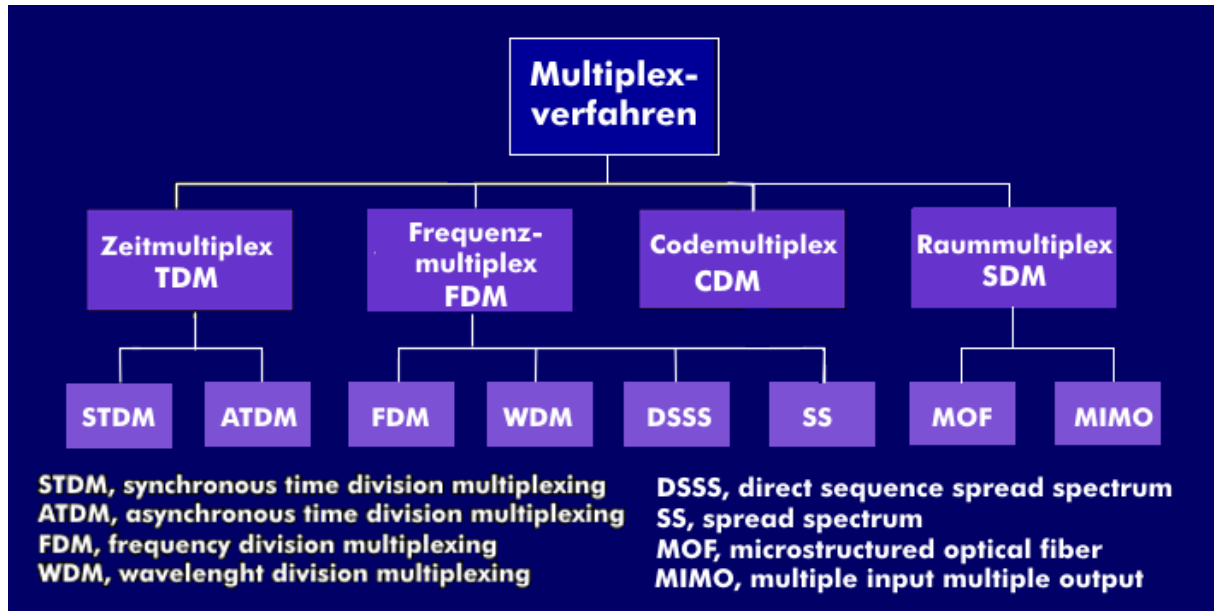


Abbildung 4.24: Unterschiedliche Multiplexverfahren [168]

Da diese Verfahren auch die Grundlage der vierten Mobilfunkgeneration bilden, soll noch kurz das Grundprinzip erläutert werden. Beim zeitlichen Multiplex Verfahren werden Quellsignale von z.B. drei Quellen zeitlich hintereinander angeordnet und so sequenziell über einen Kanal übertragen.

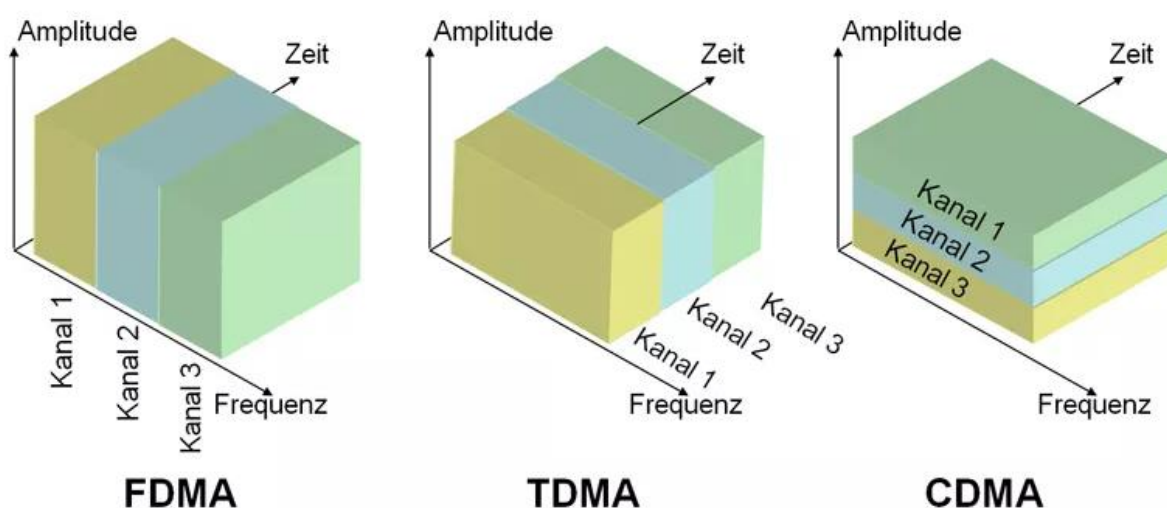


Abbildung 4.25: Frequenz-, Zeit- und Codemultiplexing [169]

Im Falle des Frequenzmultiplex würde von den drei unterschiedlichen Quellsignalen jedes mit einer anderen Trägerfrequenz innerhalb der Bandbreite des Kanals übertragen werden.

Codemultiplexing würde bedeuten, dass beispielsweise die Daten der ersten Quelle mit einer Amplitude A, die Daten der zweiten Quelle mit einer Amplitude B und die Daten der dritten Quelle mit einer Amplitude C „codiert“ werden [169]. Gemeinsam können so die Daten aller drei Quellen mit der gleichen Trägerfrequenz übertragen werden. Dies sei in Abbildung 4.25 nochmals verdeutlicht. Für weitere Details dazu wird auf [170, S. 284-292] verwiesen.

4.5.2 Technische Neuerungen im Mobilfunk durch Releases

Die technischen Neuerungen für die erste Version des UMTS Standard wurden seitens 3GPP über den Release 99 veröffentlicht. Während die Zahl dieses Standards sich noch auf die Jahreszahl bezieht, wurden die folgenden Releases mit Laufnummern ab 4 weiter veröffentlicht. Diese Releases werden etwa alle 18 Monate veröffentlicht und beinhalten teils kleine sowie auch große Änderungen der bereits veröffentlichten Standards und technische Neuerungen zu neuen Generationen. Der **Release 99** enthält somit unter anderem die Beschreibung des mit UMTS komplett neu eingeführten Zugangsnetzwerks, dem *UMTS Terrestrial Radio Network* (UTRAN). Von GSM wurde das Prinzip der Basisstationen und der übergeordneten Controller übernommen. Diese wurden jedoch umbenannt in Node-B und *Radio Network Controller* (RNC). Die Endgeräte trugen von da an die Bezeichnung *User Equipment* (UE) anstatt *Mobile Station* (MS). Die Netzwerkarchitektur war jedoch trotzdem abwärtskompatibel mit dem GSM Netzwerk und es konnte bei schlechtem UMTS Empfang immer auf das GSM Netz zurückgegriffen werden.

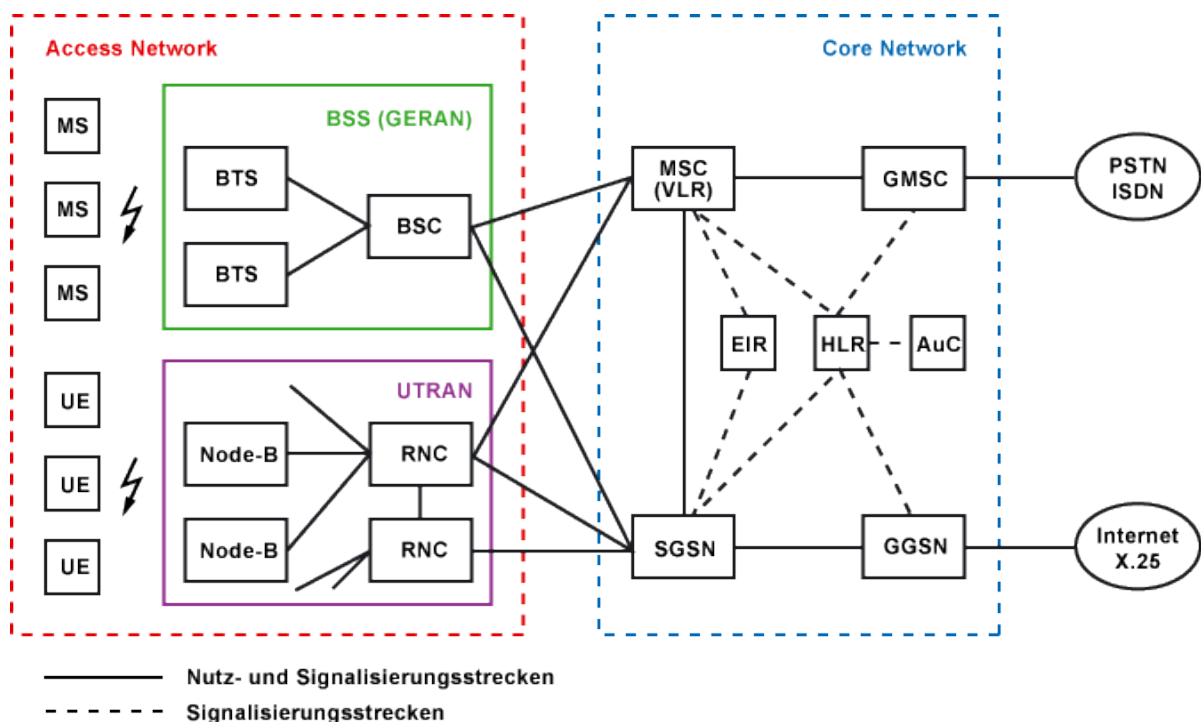


Abbildung 4.26: Das GSM/EDGE und UMTS Netzwerk [171]

Grundsätzlich war die Netzwerkstruktur geteilt in ein Zugangsnetz (Access Network), in dem die Endgeräte auf die jeweiligen Sendestationen von GSM und UMTS zugreifen konnten, und dem Kernnetz (Core Network) mit der bestehenden Infrastruktur des GSM, GPRS und EDGE Netzwerks (Abbildung 4.26). Im Vergleich zum neuen UTRAN wurde das GSM/EDGE

Zugangsnetzwerk mit deren Basisstationen (BSS) und Controller (BSC) als GERAN bezeichnet. Das leitungsvermittelnde Kernnetzwerk wurde für UMTS weiterentwickelt, da es sich bis dahin als zuverlässiges Netzwerk etablierte. Im Vergleich zum GSM Kernnetzwerk (vergleiche Abbildung 4.22) ist für den paketorientierten Datenverkehr der *Serving GPRS Support Node* (SGSN) hinzugekommen. Mittels des *Gateway GPRS Support Node* (GGSN) wurde dabei das Routing der Datenpakete ins Internet übernommen [171]. Mit dieser Architektur war es bei entsprechend dualbandfähigen Geräten, also UEs, die den GSM und UMTS Standard unterstützen, möglich, fließend zwischen beiden Standards zu wechseln. Für den zunehmend stärker werdenden Datentransfer im Kernnetzwerk wurde vom ursprünglichen SS7 Protokoll (Siehe dazu [161, S. 10-12]) auf ein reines IP-basiertes Netzwerk umgestellt. Damit war die Grundlage für Voice-over-IP, also digitale Sprachtelefonie geschaffen. Diese Neuerung kam mit dem 3GPP **Release 4** im Jahr 2001. Die Release-Nomenklatur wurde dabei von 99 auf 4 geändert. Dadurch wurden die leitungsvermittelnden MSCs durch das IP Multimedia Subsystem (IMS) ersetzt [161, S. 132].

Die Einführung des Codemultiplexing ermöglichte bei UMTS eine Überlappung von Funkzellen. Somit konnten große Makrozellen für den ländlichen Bereich, Mikrozellen für den innerstädtischen Bereich und Pikoellen für den indoor Bereich auf derselben Frequenz auch nebeneinander bzw. ineinander betrieben werden. Dadurch wurde das gesamte UMTS Mobilfunknetz dynamischer. Es wurden maximale Datenraten sowie maximale Geschwindigkeiten der Teilnehmer innerhalb der Zelle spezifiziert [172]. Dies ist in Tabelle 4.6 zusammengefasst:

Tabelle 4.6: Zellenstruktur bei UMTS [172]

Zelle	Reichweite	Max. Datenrate	Max. Geschwindigkeit
Makro	4 – 6 km	144 kbit/s	500 km/h
Mikro	1 – 2 km	384 kbit/s	120 km/h
Piko	60 – 100 m	2 Mbit/s	10 km/h

Zusätzlich zu den schon kleinen Picozellen wurden auch Femtozellen eingeführt. Der Vorteil bei diesen Zellen war der Wegfall der Anbindung an das Mobilfunknetz. Diese konnten direkt über einen Breitbandanschluss in das Kernnetzwerk eingebunden werden.

Im Jahr 2002 wurde mit dem **Release 5** seitens der 3GPP die Erweiterung des UMTS Mobilfunknetzwerks mittels *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) eingeführt. Die technischen Spezifikationen zu HSDPA wurden im TS 25.306 veröffentlicht, die mittlerweile bei Release 16 steht [173]. Mit dieser Neuerung konnten deutlich höhere Datenraten im Mobilfunknetz erreicht werden, die in Kategorien unterteilt wurde. Je höher die Kategorie, desto höher war die maximale Datenrate, desto komplexer wurden auch die für die Drahtloskommunikation verwendeten Verfahren. Eine adaptive Anpassung an die Kanalqualität mittels *Adaptive Modulation and Coding* (AMC) sorgt bei diesem Standard für schnelle und flexible Datenlastverteilung innerhalb des Netzwerks. Dabei können im Bedarfsfall mehrere Kanäle gebündelt werden, um den Datendurchsatz zu erhöhen. Mit dieser Technologie wurde ein halber Generationssprung hin zu 3,5G vollzogen [161, S. 133-134].

Mit dem GPP **Release 6** wurde der *High Speed Uplink Packet Access* (HSUPA) eingeführt. Seit dem Release 99 war die Upload Geschwindigkeit immer noch sehr gering. Mit dem neuen HSUPA Upload konnten Datenraten bis 3 Mbit/s realisiert werden. Der gemeinsame Einsatz von HSDPA und HSUPA wurde als *High Speed Data Access* (HSDA) bezeichnet [161, S. 135].

3GPP **Release 7** befasste sich mit dem hohen Stromverbrauch der UMTS und HSDA Standards, da kontinuierlich Status- und Kontrollmeldungen zwischen UE und e-Node ausgeauscht wurden, auch wenn kein Datentransfer stattfand. Um den Energieverbrauch zu senken wurde daher das *Continuous Packet Connectivity* (CPC) Feature Paket spezifiziert, um schnell zwischen stromsparenden und schnellen Übertragungsmodi zu wechseln. Weiters wurde die Downloadgeschwindigkeit durch die Einführung neuer Antennentechniken sowie komplexeren Modulationsverfahren verbessert. Gepaart mit 64-QAM und der *Multiple Input Multiple Output* Technologie (MIMO) können im Idealfall bis zu 337 Mbit/s erreicht werden. Diese Technik erhielt die Bezeichnung HSDPA+. Um die dafür notwendige Bandbreite im Netzwerk zu erhöhen, wurde eine Möglichkeit geschaffen, das Paket Routing zu optimieren. Das SGSN diente von da an nur noch zum Session- und Mobilitätsmanagement, ansonsten wurden Datenpakete möglichst direkt durch das Kernnetz getunnelt, was als Direct Tunnel bezeichnet wurde [161, S. 135-136].

Der **Release 8**, dessen Entwurf 2005 startete, wurde 2008 von 3GPP veröffentlicht und brachte gravierende Neuerungen, die den Grundstein für die vierte Mobilfunkgeneration legten. Einerseits wurde eine neue Drahtlosnetzwerktechnologie, die *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network* (EUTRAN), sowie auch eine neue Kernnetztechnologie, der *Evolved Packet Core* (EPC), eingeführt. Beide Neuerungen wurden von da an unter dem Begriff *Long Term Evolution* (LTE) zusammengefasst und sollten der Start für die vierte Mobilfunkgeneration (4G) sein.

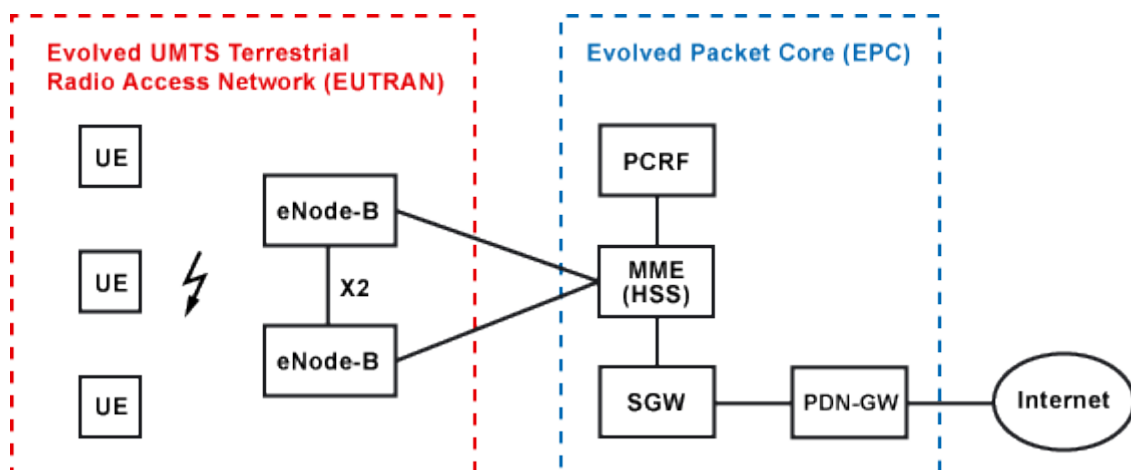


Abbildung 4.27: Die LTE Netzwerkarchitektur [174]

Der neue Standard ist ein rein IP-basiertes Netzwerk was auch anhand der neuen Netzwerkbezeichnung *Evolved Packet System* (EPS) erkennbar ist. Weitere Neuerungen im **Release 8** für UMTS waren unter anderem die Bündelung von benachbarten Trägern, um die Datenraten weiter zu steigern, sowie der gleichzeitige Einsatz von MIMO und 64-QAM.

Die Endgeräte im EUTRAN werden als LTE-UE und die Basisstationen, die aus der UMTS Netzwerkarchitektur abgeleitet sind, mit eNode-B bezeichnet. Neu hinzugekommen ist eine Vernetzung der LTE-Basisstationen untereinander. Die so neu hinzugekommenen Verbindungen, die die Bezeichnung X2 haben, ermöglichen ein rascheres Handover zwischen den LTE UEs. Die *Management Mobility Entity* (MME) ist zuständig für die Anmeldung der Mobilfunkteilnehmer am Netz und deren Lokalisierung. Sie handhabt die Signalisierung in Bezug auf Mobilität und Sicherheit für den EUTRAN-Zugang. Der *Home Subscriber Server* (HSS) ist eine Datenbank, die benutzer- und teilnehmerbezogene Informationen enthält. Weiters bietet er Unterstützungsfunktionen im Mobilitätsmanagement, Anruf- und Sitzungsaufbau, Benutzerauthentifizierung und Zugangsberechtigung. Er basiert auf dem Pre-3GPP **Release 4** - *Home Location Register* (HLR) und *Authentication Centre* (AuC). Wenn die Anmeldung im Netz über das HSS erfolgreich ist, wird dem Account ein *Serving-Gateway* (SGW) zugewiesen.

Die Gateways (*Serving GW* und *PDN GW*) befassen sich mit der Nutzerebene. Sie transportieren den IP-Datenverkehr zwischen dem *User Equipment* (UE) und den externen Netzen. Das *Serving GW* (SGW) ist der Verbindungspunkt zwischen der Funkseite und dem EPC. Dieses Gateway leitet die eingehenden und ausgehenden IP-Datenpakete zum aktiven UE weiter. Es ist der Ausgangspunkt für die Inter-LTE-Mobilität und muss im Falle eines Handovers zwischen eNode-Bs und zwischen LTE und anderen 3GPP-Zugängen (z.B. UMTS) die Datenpakete entsprechend routen.

Das *Packet Data Network* (PDN) GW ist der Verbindungspunkt zwischen dem EPC und den externen IP-Netzwerken. Der PDN GW leitet Datenpakete zu und von den PDNs weiter. Das PDN GW führt auch verschiedene Funktionen aus, wie z. B. die IP-Adress- / IP-Präfix-Zuweisung oder die Richtlinienkontrolle und Gebührenerhebung. 3GPP spezifiziert diese Gateways unabhängig voneinander, aber in der Praxis können sie von Netzerkannern in einer einzigen "Box" kombiniert werden [175].

In Bezug auf die Features des **Release 8** und LTE sollte anhand der neuen Architektur eine Reduzierung der Verzögerungen einerseits bei der Verbindungsherstellung, andererseits bei der Datenübertragungsdauer, genannt Latenz, erreicht werden. Die Implementierung brachte Verbesserungen im Bereich Datendurchsatz und Verbindungsqualität bis hin zum Zellrand. Die im Vergleich zu den Vorgängern vereinfachte Netzwerkarchitektur brachte Vorteile bezüglich Kosten und Effektivität. Weiters wurde auch der Energiebedarf für die Aufrechterhaltung der Verbindung von UEs zu den Basisstationen (eNode-Bs) reduziert. Es wurden damit Datenraten im Downstream von 100 Mbit/s und im Upstream von 50 Mbit/s erreicht. Die gemeinsamen Neuerungen wurden unter dem Sammelbegriff LTE/3,9G zusammengefasst. Die Idee war die Grundsteinlegung für die vierte Generation (4G), die entsprechend ihrer Bezeichnung Long Term Evolution über einen langen Zeitraum weiterentwickelt werden sollte. Die grundlegenden Standards aus dem 3GPP **Release 8** waren dabei der Grundstein [176].

Aufbauend auf den technischen LTE-Verbesserungen im 3GPP **Release 9** entstand mit **Release 10** die Basis für LTE-Advanced im Jahr 2011. Die Neuerungen wurden stetig

verfeinert und verbessert bis 3GPP **Release 13** aus 2016. LTE Advanced wurde als eigentliche vierte Generation (4G) bezeichnet und ist abwärtskompatibel. Zusammengefasst wurden folgende Innovationen eingeführt, deren Fokus auf der Steigerung der Datenrate, höherer spektraler Effizienz, Erhöhung der gleichzeitig aktiven Nutzerzahlen sowie Verbesserungen der Verbindungen am Rand der Zelle liegt:

Carrier Aggregation (CA)

Die einfachste Möglichkeit, die Kanalkapazität zu erhöhen, ist die Erhöhung der Bandbreite. Da es wichtig ist, die Abwärtskompatibilität mit **Release 8-** und **Release 9-**Mobiltelefonen beizubehalten, wird die Erhöhung der Bandbreite in LTE-Advanced durch das Zusammenlegen von **Release 8/Release 9-**Trägern bereitgestellt, das als *Carrier Aggregation* (CA) bezeichnet wird. CA kann sowohl für FDD als auch für TDD Multiplexverfahren verwendet werden.

Jeder aggregierte Träger wird als Komponententräger bezeichnet. Der Komponententräger kann eine Bandbreite von 1,4 MHz, 3,5 MHz, 10 MHz, 15 MHz oder 20 MHz haben und es können maximal fünf Komponententräger aggregiert werden. Die maximale Bandbreite beträgt somit 100 MHz. Die Anzahl der aggregierten Träger kann im Download (DL, f_{DL}) und Upload (UL, f_{UL}) unterschiedlich sein, jedoch ist die Anzahl der UL-Komponententräger nie größer als die Anzahl der DL-Komponententräger. Die einzelnen Komponententräger können auch unterschiedliche Bandbreiten haben, was in Abbildung 4.28 dargestellt ist.

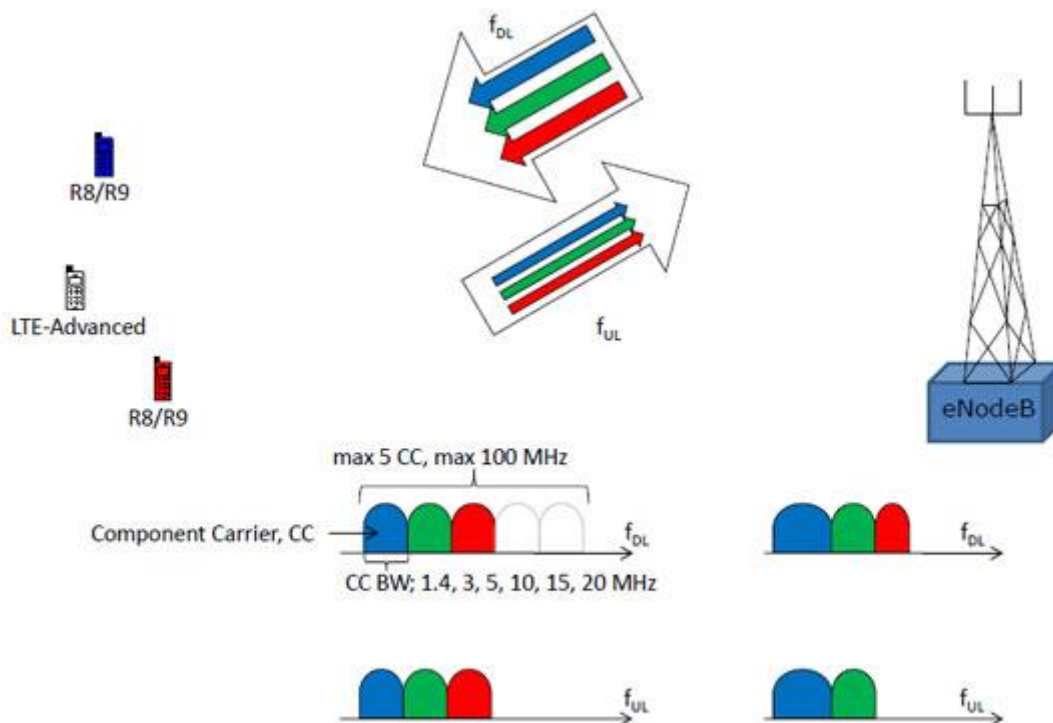


Abbildung 4.28: Carrier Aggregation bei LTE-A [177]

Der einfachste Weg, das Zusammenlegen von Trägern (CA) zu arrangieren, ist die Verwendung von zusammenhängenden, also im Nutzfrequenzband nebeneinander liegenden Komponententrägern innerhalb desselben Betriebsfrequenzbandes entsprechend der für LTE definierten Frequenzen (Siehe dazu Abbildung 4.34). Diese Variante wird *Intra-Band-Contiguous* genannt. Aufgrund von Frequenzzuweisungsszenarien ist dies nicht immer möglich. Bei einer nicht zusammenhängenden Zuordnung gibt es die Möglichkeit der intra-band Zusammenlegung mit einem Frequenzabstand zwischen den Trägern oder inter-band Zusammenlegung, wobei die Träger aus unterschiedlichen Frequenzbändern zusammengelegt werden.

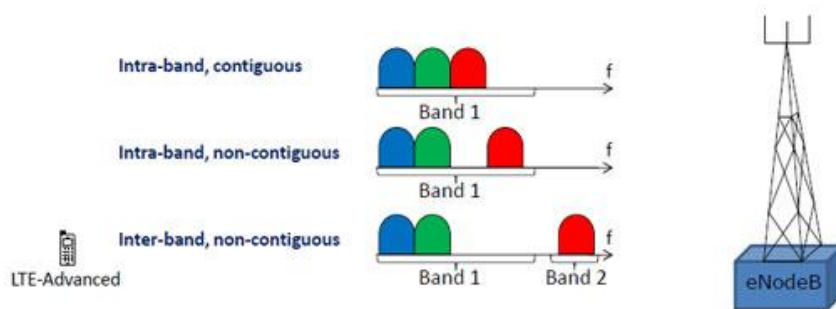


Abbildung 4.29: Unterschiedliche Arten, der Träger-Zusammenführung bei CA [177]

Bei der Trägeraggregation gibt es für jeden Komponententräger eine *Serving-Cell*, also Zellen, die mit dem UE verbunden sind. Die Abdeckung der *Serving-Cells* kann unterschiedlich sein - z. B. aufgrund der Frequenzen der Komponententräger. Die *Radio Resource Control (RRC)* Verbindung wird von einer Zelle, der *Primary Serving Cell*, abgewickelt, die vom *Primary Component Carrier* (DL und UL PCC) bedient wird. Die anderen Komponententräger werden alle als *Secondary Component Carrier* (DL und ggf. UL SCC) bezeichnet und bedienen die *Secondary Serving Cells*. Das *Radio Resource Control (RRC)* Protokoll ist dabei eine wichtige Komponente aus dem UMTS und LTE-Netzwerk. Das Protokoll ist in 3GPP TS 36.331 für LTE spezifiziert. Die Aufgaben bestehen unter anderem aus dem Verbindungsauf- und -abbau, Broadcast von Systeminformationen, Einrichtung-, Rekonfiguration- und Freigabe von Frequenzbändern sowie dem Monitoring des Netzzustandes und des damit verbundenen *Radio Resource Managements (RRM)* [177].

Multiple Input Multiple Output (MIMO) oder Spatial Multiplexing

MIMO wird verwendet, um die Gesamtbitrate zu erhöhen, indem zwei oder mehrere verschiedene Datenströme auf zwei oder mehrere verschiedene Antennen gleichzeitig übertragen werden. Dabei werden die gleichen Ressourcen in Frequenz und Zeit verwendet, die Daten sind nur getrennt durch die Verwendung verschiedener Referenzsignale, um von zwei oder mehreren Antennen empfangen zu werden. Das Prinzip ist anhand eines 2x2 MIMO in Abbildung 4.30 dargestellt.

MIMO – Spatial Multiplexing (2x2)

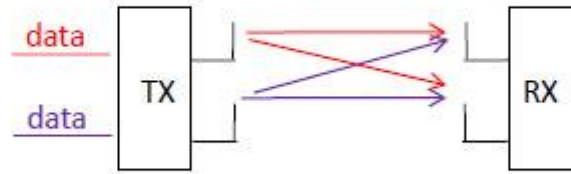


Abbildung 4.30: Vereinfachung eines 2x2 MIMO [177]

Eine wesentliche Änderung in LTE-Advanced ist die Einführung von 8x8 MIMO im Download und 4x4 MIMO im Upload. MIMO kann verwendet werden, wenn das Signal-Rausch-Verhältnis (Signal-to-Noise Ratio, SNR) hoch ist, d. h. bei qualitativ gutem Empfang. Für Situationen mit niedrigem SNR ist es besser, anstatt MIMO andere Arten von Mehrantennentechniken zu verwenden, um das SNR zu verbessern. Dabei wird auf Antennen-Diversität gesetzt, bei der durch die unterschiedliche Ausrichtung der Antennen die Empfangsqualität verbessert werden kann. Das gleiche Prinzip kommt bei 2,4 GHz Diversity Fernsteuerungen zum Einsatz. Diese Technik wird vor allem im Randbereich der *Serving-Cell* eingesetzt, wo allein aufgrund der Entfernung ein niedriger SNR Wert herrscht, was in Abbildung 4.31 dargestellt ist.

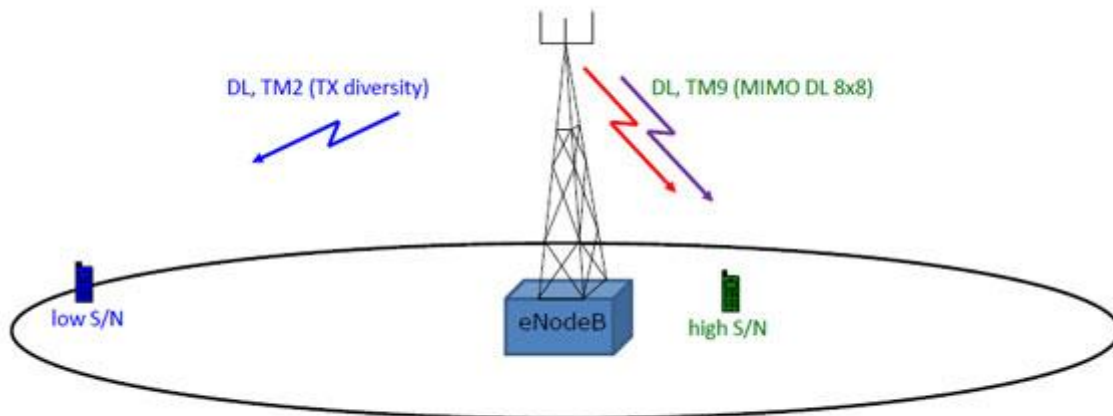


Abbildung 4.31: MIMO mit hohem Datenraten im Nahbereich und Antennen Diversität im Fernbereich der Serving Cell [177]

Um die Art des Mehrantennen-Übertragungsschemas an beispielsweise die Funkumgebung anpassen zu können, wurden eine Reihe von verschiedenen Übertragungsmodi (Transmission Modes, TM) definiert. Das UE wird durch die RRC-Signalisierung über den zu verwendenden Übertragungsmodus informiert. Im Download (DL) gibt es neun verschiedene Übertragungsmodi, die jeweils nummeriert werden. TM1-7 wurden in Release 8, TM8 in **Release 9** und TM9 in **Release 10** eingeführt. Für den Upload gibt es TM1 und TM2, wobei

TM1 als Standard in **Release 8** und TM2 in **Release 10** eingeführt wurde. Die verschiedenen Übertragungsmodi unterscheiden sich in:

- **Anzahl der Layer** (oder auch Data Streams; die Anzahl der Layer muss immer kleiner oder gleich der Anzahl der Antennen sein)
- **Anzahl der verwendeten Antennenanschlüsse**
- **Typ des Referenzsignals**, zellspezifisches Referenzsignal (Cell-specific Reference Signal, CRS) oder Demodulationsreferenzsignal (Demodulation Reference Signal, DM-RS), eingeführt in Release 10.
- **Art des Precodings** (Codierung der Daten vor der Verteilung auf die Antennen)

Durch die Einführung von TM9 wird im Download 8x8 MIMO und durch die Einführung von TM2 im Upload die Nutzung von 4x4 MIMO ermöglicht. Natürlich ist es auch erforderlich, dass das UE dies unterstützt. In **Release 10** werden drei neue UE-Kategorien 6, 7 und 8 (Cat6 bis Cat8) eingeführt, wobei UE-Kategorie 8 die leistungsstärkste Variante darstellt, die die größte Anzahl an Trägern und 8x8 *Spatial Multiplexing* unterstützt [177].

Bei Mehrantennentechniken wird Precoding verwendet, um die Modulationssymbole auf die verschiedenen Antennen abzubilden. Die Art des Precodings ist abhängig von der verwendeten Mehrantennentechnik sowie von der Anzahl der Layer und der Anzahl der Antennenanschlüsse. Ziel des Precodings ist es, einen bestmöglichen Datenempfang beim Empfänger zu erreichen. Um dies zu erreichen, werden bekannte Referenzsignale zusammen mit den Daten übertragen, die vom Empfänger zur Demodulation des empfangenen Signals verwendet werden.

Im Release 8 wird das Referenzsignal, ein sogenanntes *Cell-specific Reference Signal* (CRS), dem Signal nach dem Precoding pro verwendeter Antenne hinzugefügt. Aus dem empfangenen CRS schätzt das UE ab, wie der Funkkanal das Signal beeinflusst hat. Es ist somit ein LTE-spezifisches Maß für die Verbindungsqualität.

In **Release 10** werden die *Demodulation Reference Signals* (DM-RSs) vor der Vorcodierung zu den verschiedenen Datenströmen (Layern) hinzugefügt. Die Kenntnis über das Referenzsignal liefert Informationen über den kombinierten Einfluss von Funkkanal und Vorcodierung, es ist kein Vorwissen über das Precoding beim Empfänger erforderlich.

Relay Nodes

Um eine möglichst effiziente heterogene Netzplanung, also eine Mischung aus großen und kleinen Zellen, realisieren zu können, wurde mit LTE-Advanced sogenannte *Relay Nodes* (RNs) eingeführt. Bei den Relay Nodes handelt es sich um Basisstationen mit geringer Leistung, die eine verbesserte Abdeckung und Kapazität an Zellrändern und Hot-Spot-Bereichen bieten und auch für die Verbindung zu abgelegenen Gebieten ohne Glasfaseranschluss verwendet werden können. Der *Relay Node* ist über Richtfunk mit dem Donor (Spender) eNB (DeNB) verbunden.

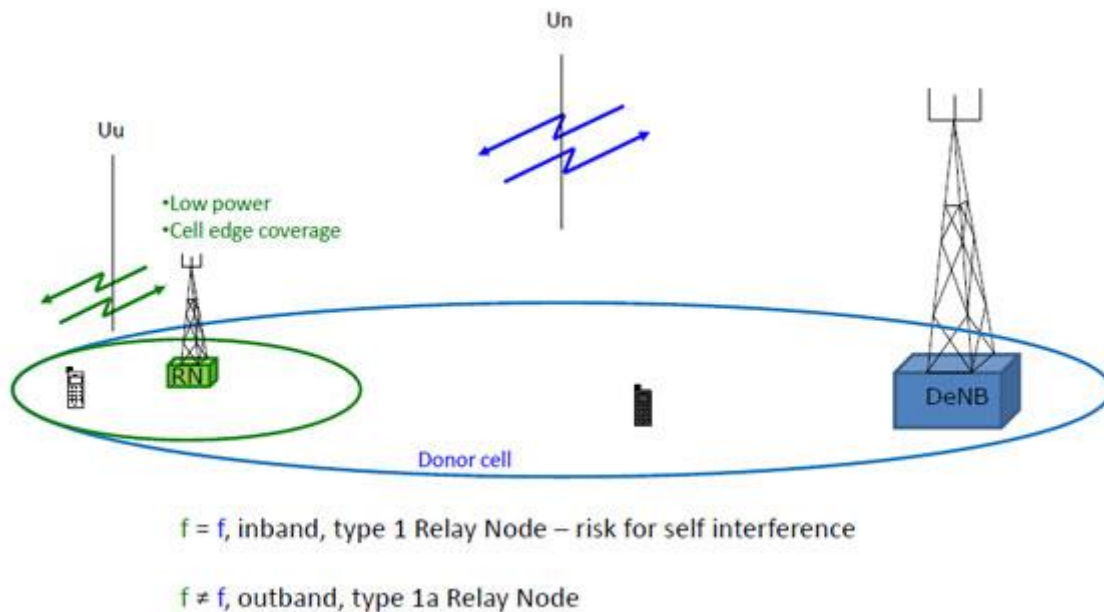


Abbildung 4.32: Der Relay Node (RN) ist über die Rn Schnittstelle (Richtfunk) mit DeNB verbunden, die Uu Schnittstelle ist die allgemeine Verbindung zwischen UE und Node. [177]

Diese Schnittstelle wird mit U_n bezeichnet und ist eine Modifikation der EUTRAN-Luftschnittstelle U_u . Daher werden in der Donor-Zelle die Funkressourcen zwischen UEs, die direkt vom DeNB bedient werden, und den Relay Nodes geteilt. Wenn U_u und U_n unterschiedliche Frequenzen nutzen, wird der Relay Node als Typ 1a RN bezeichnet. Beim Typ 1 RN nutzen U_u und U_n die gleichen Frequenzen, wie in Abbildung 4.32 dargestellt. Im 1 RN Fall besteht ein hohes Risiko für Selbstinterferenzen im Relaisknoten, wenn dieser auf U_u empfängt und gleichzeitig auf U_n sendet (oder umgekehrt). Dies kann durch Time-Sharing zwischen U_u und U_n oder durch unterschiedliche Standorte von Sender und Empfänger vermieden werden. Der RN wird weitgehend die gleichen Funktionalitäten wie der eNB unterstützen, allerdings ist der DeNB für die MME-Auswahl zuständig.

Coordinated Multi Point operation (CoMP)

Mit Release 11 wurde die *Coordinated Multi Point operation* (CoMP) Spezifikation eingeführt. Diese Technik soll für eine Verbesserung der Netzwerkperformance an den Zellrändern sorgen. Bei CoMP sorgt eine Anzahl von Sende-(TX-)Punkten für eine koordinierte Übertragung im Download und eine Anzahl von Empfangs-(RX-)Punkten für einen koordinierten Empfang im Upload. Ein TX/RX-Punkt besteht aus einer Anzahl von nebeneinander liegenden TX/RX-Antennen, die eine Abdeckung im gleichen Sektor bieten. CoMP kann auf verschiedene Arten durchgeführt werden und die Koordination kann sowohl für homogene als auch für heterogene Netze erfolgen. Zwei vereinfachte Beispiele für Download-CoMP sind in Abbildung 4.33 dargestellt.

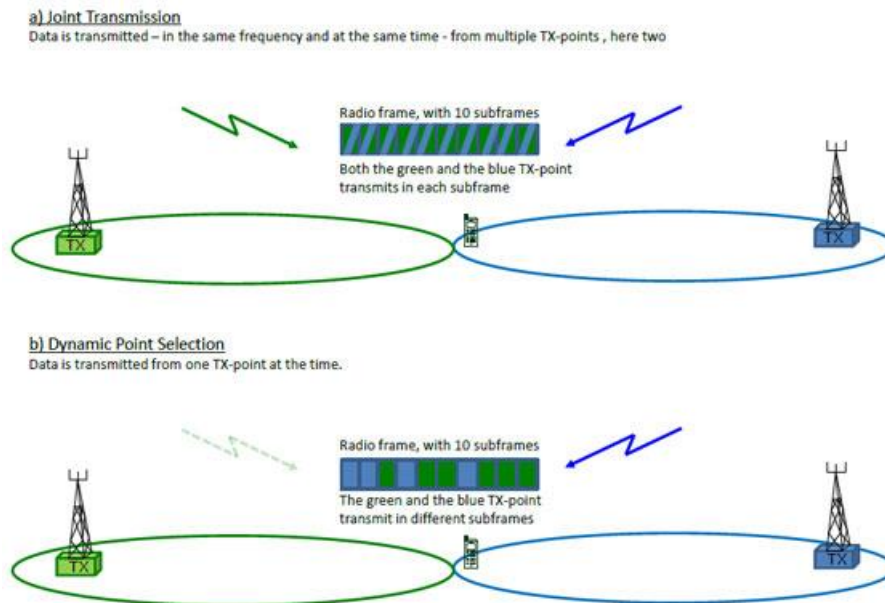


Abbildung 4.33: Zwei Varianten der CoMP: Joint Transmission und Dynamic Point Selection [177]

In beiden Fällen stehen Download-Daten zur Übertragung von zwei TX-Punkten zu einem UE am Zellrand zur Verfügung. Wenn zwei oder mehr TX-Punkte auf der gleichen Frequenz im gleichen Subframe senden, wird dies als *Joint Transmission* bezeichnet. Wenn die Daten für die Übertragung an zwei oder mehr TX-Punkten verfügbar sind, aber nur von jeweils einem TX-Punkt in jedem Subframe gesendet werden, wird dies als *Dynamic Point Selection* bezeichnet.

Bei Upload gibt es bei CoMP ebenso *Joint Reception*. Eine Anzahl von RX-Punkten empfängt dabei die Upload-Daten von einem UE und die empfangenen Daten werden zur Qualitätsverbesserung kombiniert. Sollten die TX/RX-Punkte von verschiedenen eNBs gesteuert werden, kann es zu zusätzlichen Verzögerungen kommen, da die eNBs untereinander kommunizieren müssen, um z. B. Scheduling-Entscheidungen zu treffen. Wenn CoMP verwendet wird, werden zusätzliche Funkressourcen für die Signalisierung benötigt, das wäre z. B., um UE-Scheduling-Informationen für die verschiedenen Download/Upload-Ressourcen bereitzustellen. [177]

Mit den 3GPP **Release 12** und **13** war 2016 die Standardisierung von LTE und LTE Advanced abgeschlossen. Diese beiden Spezifikationen brachten unter anderem erweiterten Small Cell Betrieb, erweiterte *Link Aggregation*, Erweiterungen bei MIMO wie Beamforming und Massive-MIMO (**Release 12**) und LTE-Licensed-Assisted Access (LTE-LAA), LTE-Unlicensed (LTE-U), LTE-Cat1-M (LTE-M), erweitertes Beamforming und MIMO sowie Indoor Positionserkennung (**Release 13**). LTE-LAA und LTE-U ist eine Technik, lizenzfreie Frequenzbänder zusätzlich zu den lizenzierten Bändern für den Mobilfunk zu nutzen. Dabei wird primär auf das freie ISM-Band gesetzt, wo allerdings schon sehr viele andere Dienste, wie beispielsweise WiFi operieren. LTE-M ist eine spezielle Low-Power Variante, die auf den Internet-of-Things (IoT) Bereich abzielt. Dabei ist weniger die Bandbreite als eine kontinuierliche, energiesparende und zuverlässige Übertragung notwendig.

4.5.3 LTE-spezifische Eigenschaften

Beamforming ist eine spezielle Antennentechnik, die bei LTE-Advanced vorgestellt wurde und beim zukünftigen fünften Mobilfunkstandard eine noch wichtigere Rolle spielen wird. Beim Beamforming wird mit mehreren Antennen die Richtung einer Wellenfront durch entsprechende Gewichtung von Betrag und Phase der einzelnen Antennensignale gesteuert (Sender-Beamforming, vergl. Abbildung 4.6). Dadurch ist es z. B. möglich, bestimmte Bereiche an den Rändern von Zellen besser zu versorgen, da man durch diese Methode eine entsprechend große Sendeleistung dorthin fokussieren kann. Da jede einzelne Antenne im Array einen Beitrag zum gesteuerten Signal leistet, wird ein Array-Gewinn (auch Beamforming-Gewinn genannt) erzielt.

Die Empfangs-Beamforming ermöglicht es, die Richtung zu bestimmen, in der die Wellenfront ankommt (direction of arrival, oder DoA). Es ist auch möglich, ausgewählte Störsignale zu unterdrücken, indem man ein Strahlenmuster in Richtung des Störsignals aussendet. Adaptive Beamforming bezieht sich auf die Technik, die Strahlformung kontinuierlich auf einen sich bewegenden Empfänger anwendet. Dies erfordert schnelle Signalverarbeitung und leistungsfähige Algorithmen [178].



Abbildung 4.34: LTE und geplante 5G Frequenzbereiche [179]

Ein sehr wichtiges Element im Mobilfunk, das noch nicht behandelt wurde, ist die Antenne. Grundlagen zur Abstrahlung von elektromagnetischen Wellen wurden bereits in Kapitel 4.2 erklärt. Bevor nun die Mobilfunkantennen betrachtet werden, soll ein Blick auf die derzeit verwendeten **LTE-Frequenzen** geworfen werden. Eine Übersicht über die aktuellen 4G Frequenzen inklusive der Band Bezeichnung (Nummer unter den Frequenzen) ist in Abbildung 4.34 zu sehen.

In Österreich gibt es derzeit drei Infrastrukturbetreiber, A1, Magenta (ehemals T-Mobile Austria) und Hutchinson (Drei) Austria. Lediglich diese drei Firmen sind für die Errichtung der LTE-Sendestationen verantwortlich. Alle anderen Mobilfunkbetreiber operieren als sogenannte Mieter in einem der drei physischen Mobilfunknetze. A1 betreibt dabei die Bänder 3 (1800 MHz), 7 (2600 MHz) und 20 (800 MHz), Magenta die Bänder 1 (2100 MHz), 3, 7 und 20 und Hutchinson 1,3,7 und 8 (900 MHz).

Durch die Anwendung von fünf verschiedenen Trägerfrequenzen müssen auch die Antennen entsprechend multibandfähig sein. Jeder Provider hat mindestens drei Frequenzbereiche, die die Antennen für die Sendestationen abdecken müssen. Je nach Standort wird jedoch auch das eine oder andere Band weggelassen. Während die niedrigen Frequenzen (unter 1 GHz) bevorzugt für die ländlichen Regionen Verwendung finden, werden die Frequenzen über 2 GHz primär nur innerstädtisch eingesetzt. LTE-Band 20, das bei 800 MHz liegt, kann Mobilfunkzellen bis 5 bis maximal 20 Km Radius versorgen. Kleinere Zellen haben Versorgungsradien von 0,5 bis 5 Km und verwenden oft die Bänder 1 und 3. Mikrozellen werden für die Versorgung von sogenannten Hot Spots wie beispielsweise Einkaufszentren verwendet. Diese haben oft nur kleine Versorgungsradien bis 150 m [180].

Ein weiterer weltweiter Unterschied bei LTE ist die Art der **Duplexübertragung**. Dabei geht es darum, ob die Daten allesamt zeitversetzt, sogenannt per *Time Division Duplex* (TDD) oder frequenzversetzt, also per *Frequency Division Duplex* (FDD) übertragen werden. Diese Verfahren werden eingesetzt, um den Daten Up- und Downstream voneinander zu trennen und somit Interferenzen zu vermeiden.

Time Division Duplex bedeutet dabei, dass für den Up- und Downstream die gleiche Frequenz verwendet wird. Die Datenströme werden dynamisch, das bedeutet je nach Auslastung, abwechselnd übertragen. Das TDD Prinzip ist in Abbildung 4.35 rechts dargestellt. Die Platzierung der Up-, Down- sowie speziellen Subframes, die für das Wechseln von Down- zu Uplink verwendet werden, wird durch sieben Konfigurationen im 3GPP Standard definiert [181].

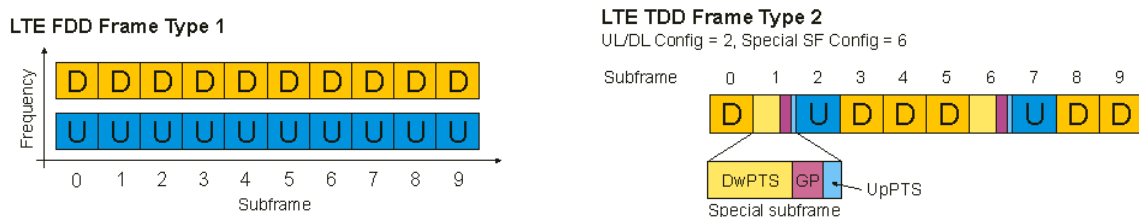


Abbildung 4.35: LTE Duplexverfahren FDD (links) und TDD (rechts) [181]

Bei *Frequency Division Duplex* (FDD) wird, wie in Abbildung 4.35 zu sehen, je eine Frequenz für den Up- und eine für den Downstream verwendet. Das bedeutet, dass hierbei die Daten im *Full Duplex* Modus übertragen, also gleichzeitig vom UE bzw. eNodeB gesendet und empfangen werden können. Dazu werden im verfügbaren Frequenzband Bandbreiten speziell für den Up- bzw. Downstream reserviert. Im Band 20 wären das beispielsweise 811 bis 821 MHz für Up- und 852 bis 862 MHz für den Downstream. FDD ist das in Europa vorherrschende

Verfahren und kommt unter anderem auch im gesamten DACH-Raum zum Einsatz. Auf allen zuvor erwähnten LTE Bändern wird in Österreich daher FDD eingesetzt [182].

Für die Errichtung der Basisstationen wird von jedem Betreiber zuvor eine Planung für die bestmögliche Abdeckung für das Mobilfunknetz durchgeführt. Bei der Ausstattung der entsprechenden Basisstation muss man einige Parameter berücksichtigen. Es gilt vorab zu klären, wie viele Personen pro Fläche versorgt werden müssen, ob es sich um einen urbanen oder ländlichen Standort handelt und welche Dienstgüte erfüllt werden soll. Diese Parameter werden als **Anforderungsdefinition** zusammengefasst. Für die Güte wird üblicherweise die Sprachverbindung eines Nutzers am Zellrand angenommen. Dabei wird die Versorgungswahrscheinlichkeit, also die Wahrscheinlichkeit, dass der Nutzer dort einen Empfang hat, bestimmt. Diese liegt in der Praxis zwischen 80 und 98%. Höhere Wahrscheinlichkeiten treiben allerdings die Kosten. Betrachtet man den allgemeinen Aufbau einer Zelle, müssen Parameter wie Sendeleistung (P_S), Empfangsleistung (P_E), Abstand des Teilnehmers zur BS (r), Antennengewinn (G_S), Höhe des Senders (h_{BS}), Höhe des Nutzers (h_{MS}) und Tilt berücksichtigt werden [183]. Eine schematische Darstellung einer Basisstation ist in Abbildung 4.36 zu sehen.

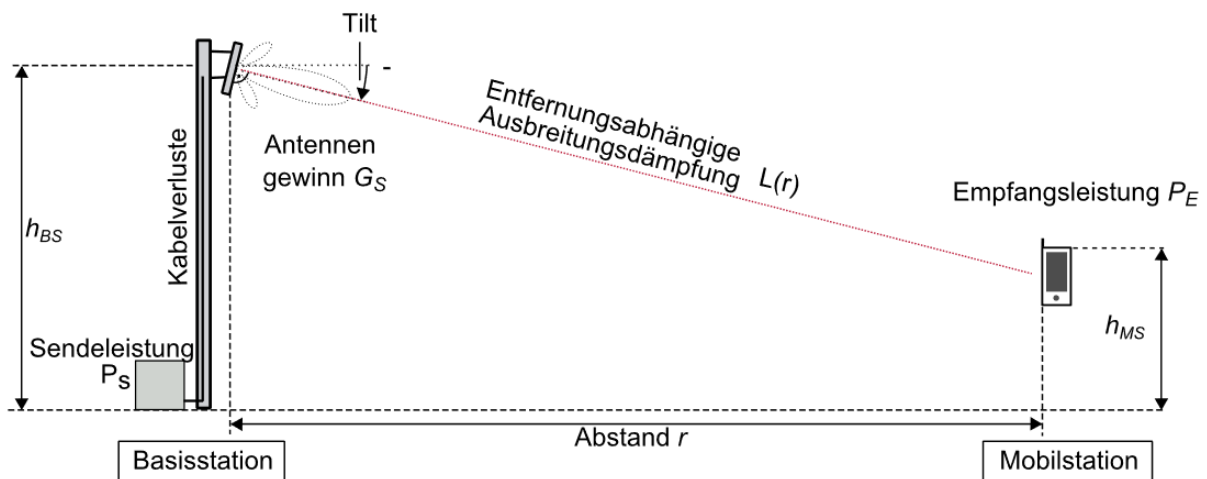


Abbildung 4.36: Parameter einer Mobilfunk Basisstation [183]

Für die Höhe gilt allgemein, dass je höher die Antenne montiert ist, desto mehr Nutzer können direkt über eine *Line-of-Sight* (LoS) Verbindung versorgt werden. Dies ist der günstigste Fall, da dabei die geringsten Signalverluste zu erwarten sind. Moderne LTE-Netze haben allerdings auch schon indoor Pico- und sogar Femtozellen, die speziell für das Innere von Gebäuden konzipiert sind. Letztere können, wie schon zuvor erwähnt, sogar ohne Anbindung an das Kernnetzwerk über Internetanbindung betrieben werden.

Ein wichtiger Faktor in der Netzplanung sind die Antennen. Grundsätzlich gilt, dass man im ländlichen Bereich, wo größeren Zellen verwendet werden, auf niedrigere Frequenzen setzt als im innerstädtischen Bereich. Oftmals werden jedoch gleich Multiband Antennen eingesetzt, die mehrere Frequenzbereiche abdecken. Zum Einsatz kommen dabei Richtantennen, die intern durch eine spezielle Anordnung von mehreren Dipolen und Reflektoren erreicht werden. Weiters werden speziell für höhere Frequenzen Patchantennen verwendet.

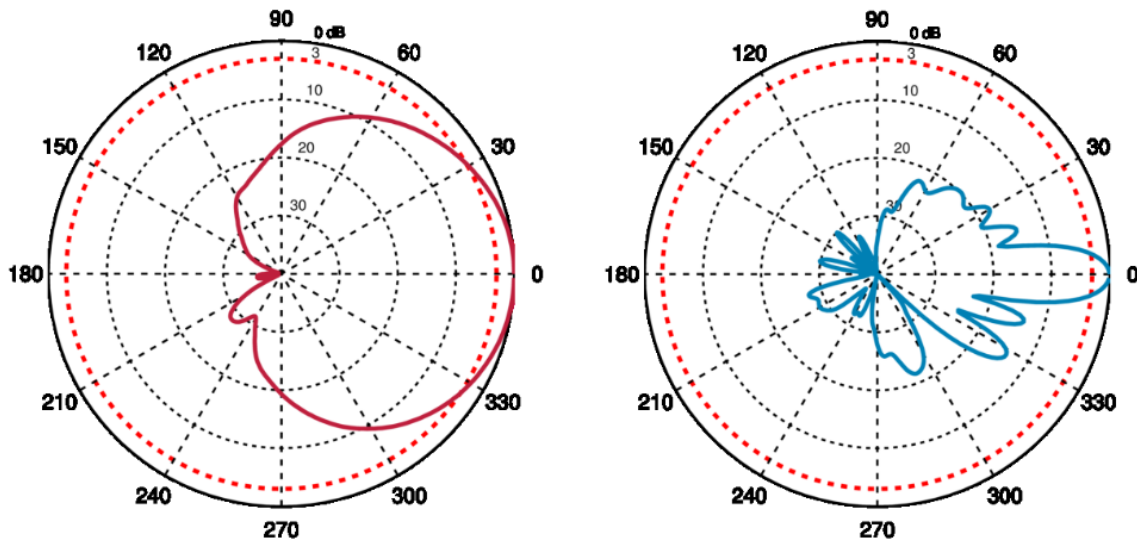


Abbildung 4.37: Horizontale (rot) und vertikale (blau) Richtcharakteristik einer Kathrein 80010682 Mobilfunkantenne [183, S. 10]

Die Richtcharakteristik der Antennen wird durch den Öffnungswinkel beschrieben, bei dem es sich um einen Winkel handelt, bei dem die abgestrahlte Sendeleistung der Antenne der halben, also um 3 dB reduzierten Sendeleistung entspricht. Eine typische LTE Antenne wie die Kathrein 80010682 hat etwa einen 65° horizontalen und 10° vertikalen Öffnungswinkel [183, S. 10]. Das Antennendiagramm davon ist in Abbildung 4.37 zu sehen. Dadurch, dass die Antennen eine Richtwirkung haben, kann man den Bereich, in dem die Basisstation aktiv sein soll, entsprechend anpassen und auch begrenzen. Um eine 360° Richtwirkung zu erzielen, werden einfach jeweils drei Richtantennen in einem horizontalen Abstand von 120° zueinander montiert.

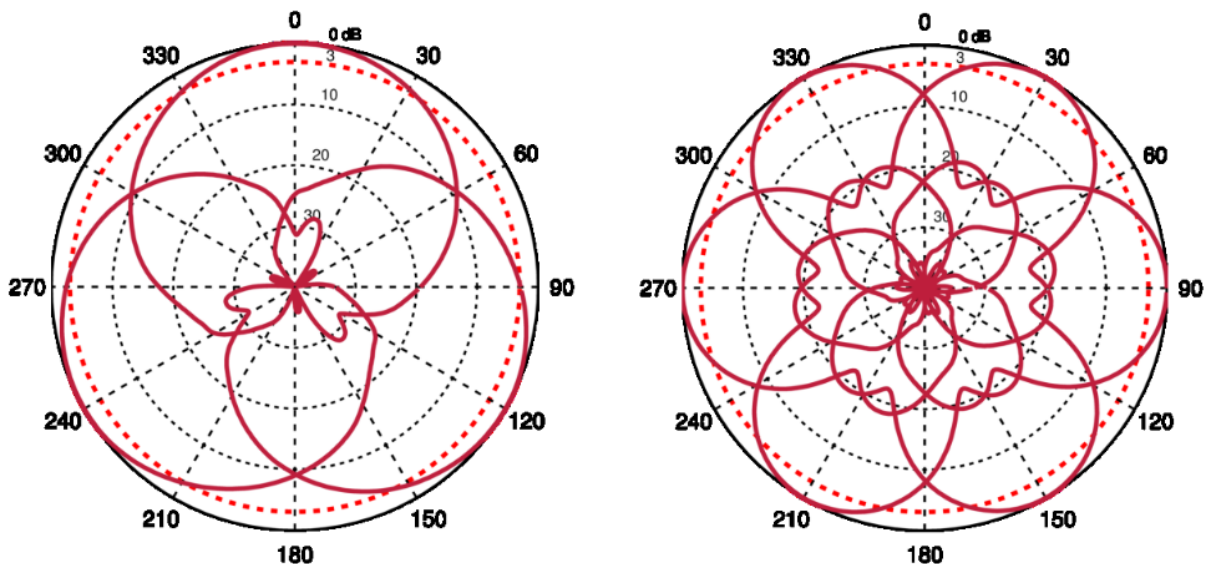


Abbildung 4.38: Dreifache (links) und sechsfache (rechts) Sektorisierung mit einer Kathrein 80010682 Antenne [183, S. 11]

Man erhält somit drei Abschnitte, sogenannte Sektoren (Abbildung 4.38). Bei dieser sogenannten Sektorisierung [183, S. 11] kann jeder Sektor eine oder auch mehrere Zellen,

z.B. auf unterschiedlichen Frequenzen, abstrahlen. Dadurch erhält man im Vergleich zu einem Omnidrahtler, der rundum gleichmäßig abstrahlt, den Vorteil, dass die Abstrahlung gezielter ist und so die Interferenzen zu anderen Zellen reduziert werden können. Weiters kann so auch für jeden Sektor ein eigener Tilt, also eine Neigung der Hauptsendekeule eingestellt werden, was bei einem Omnidrahtler nicht möglich wäre. Der Tilt kann dabei mechanisch (UMTS) oder elektrisch (LTE) eingestellt werden.

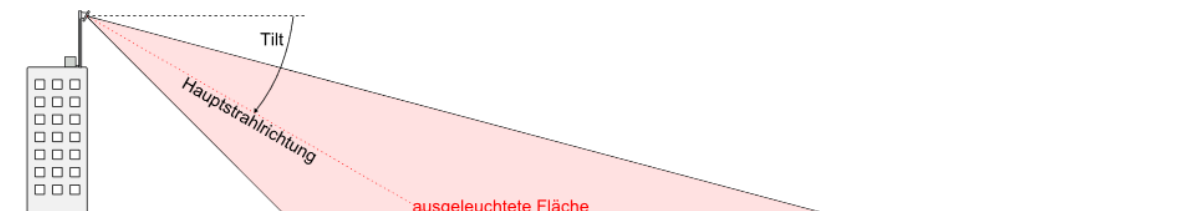


Abbildung 4.39: Über den Tilt der Antenne bestimmt man den Bereich für die beste Empfangsleistung am Boden [183, S. 13]

Ein mechanischer Tilt bedeutet dabei eine leichte Neigung der Antenne zum Boden. Im Falle eines elektrischen Tilt wird über Phasenschieber in der Ansteuerung der Antennen die Hauptsendekeule geneigt. Eine schematische Darstellung der Abstrahlung mit Tilt ist in Abbildung 4.39 gegeben.

4.5.4 Multiplexverfahren im Mobilfunk

Ein weiterer wichtiger Punkt bei LTE ist das eingesetzte Multiplexverfahren in der Funkübertragung. Das Konzept wurde bereits beim Mobilfunk der dritten Generation vorgestellt und anhand von Abbildung 4.25 ist gut der Unterschied der verschiedenen Verfahren zu erkennen. Im Gegensatz zu UMTS wird bei LTE das von IEEE 802.11 (WiFi) bekannte *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) Verfahren angewendet.

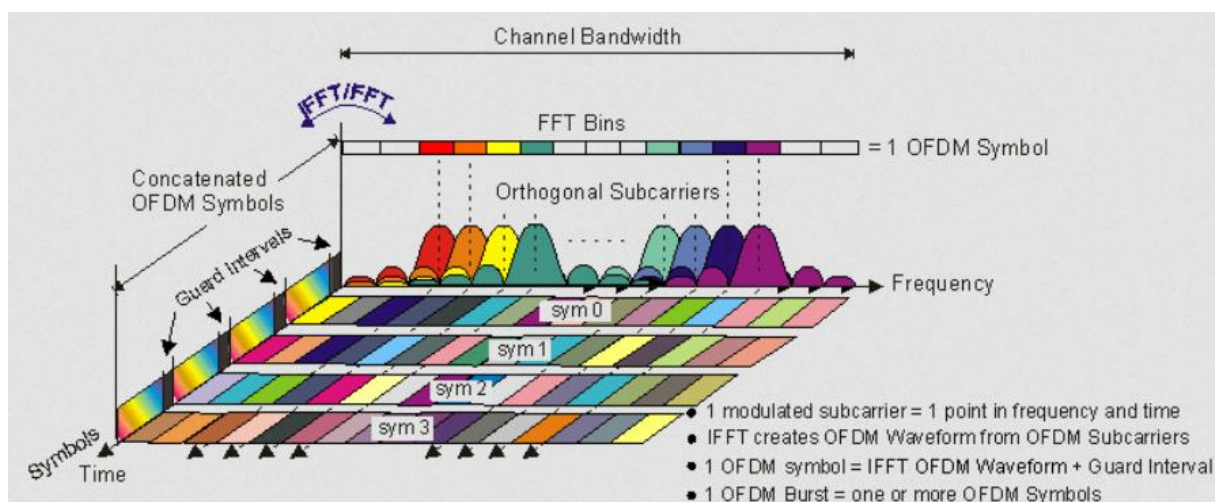


Abbildung 4.40: Frequenz-Zeit-Darstellung eines OFDM Signals [184]

Das Prinzip dabei ist, dass man viele schmalbandige Unterträger (Subcarrier) mit 15 kHz Bandbreite verwendet. Die Subcarrier stehen dabei normal zueinander, sind also orthogonal. Betrachtet man diese Eigenschaft in der Spektraldarstellung wie in Abbildung 4.40 zu sehen,

überlappen sich die Träger (in Abbildung 4.40 jeweils bunt dargestellt). Allerdings ist immer da, wo ein Träger ein Maximum in der Amplitude hat, die Amplitude aller weiteren benachbarten Träger gleich null. Dadurch gibt es keine gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Träger. Die zu übertragenden Daten werden auf alle Träger aufgeteilt, was eine Ausfallsicherheit speziell gegen schmalbandige Störungen und auch gegen selektives Fading durch Mehrwegausbreitung bietet. Die Daten werden dabei in OFDM Symbole gepackt, die jeweils über die Amplituden der einzelnen Träger codiert sind. In Abbildung 4.40 ist das erste OFDM Symbol mit 8 Amplituden ersichtlich. Für die Amplituden sind weiters je nach Zustand des Übertragungskanal 4, 16 oder 64 QAM Modulationen möglich, was 2, 4 oder sogar 6 Bits pro Symbol bedeutet. Die einzelnen Symbole werden durch Schutzbänder (Guard Intervals) voneinander getrennt. Die tatsächliche Implementierung der OFDM-Technologie unterscheidet sich zwischen dem LTE-Downlink (d. h. von der Basisstation zum UE) und dem LTE-Uplink (d. h. vom UE zur Basisstation) aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen zwischen den beiden Richtungen und der Eigenschaften der Geräte an beiden Enden. Dennoch wurde OFDM als Signalträgerformat gewählt, da es sehr störfest ist. Außerdem hat man in den letzten Jahren durch die verschiedenen Drahtlostechnologien wie Wi-Fi und WiMAX, die ebenfalls diese Technologie nutzen, ein beträchtliches Maß an Erfahrung mit dessen Einsatz gesammelt. OFDM ist außerdem ein Modulationsformat, das sich sehr gut für die Übertragung hoher Datenraten eignet, was eine der wichtigsten Voraussetzungen für LTE war. Darüber hinaus kann OFDM sowohl im FDD- als auch im TDD-Format verwendet werden, was wiederum für dessen Einsatz spricht [185].

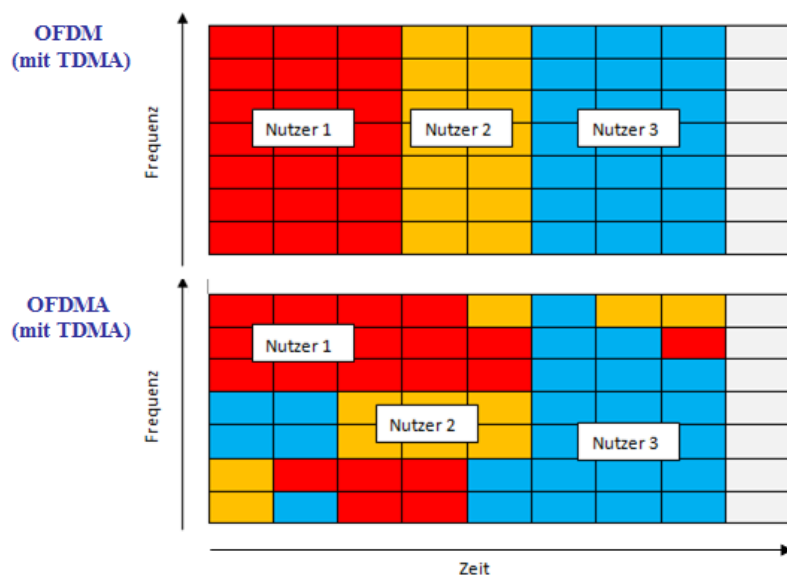


Abbildung 4.41: Unterschiedliche Einteilung der Datenblöcke bei OFDM und OFDMA (unten) [186]

Im Downlink verwendet LTE die *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA)-Technik, bei der die Zuteilung der Ressourcen je nach Kanalauslastung sich auf Zeit- und Frequenzbereich unterschiedlich aufteilt (Abbildung 4.41 unten). Dadurch können die verfügbaren Ressourcen besser an die aktuellen Gegebenheiten wie z.B. die aktuelle Auslastung im LTE-Netz angepasst werden. Einer der wichtigsten Parameter im

Zusammenhang mit der Verwendung von OFDM bei LTE ist die Wahl der Bandbreite. Die verfügbare Bandbreite beeinflusst eine Vielzahl an Parametern, einschließlich der Anzahl der Subträger, die im OFDM-Signal untergebracht werden können, und dies wiederum beeinflusst die Symbollänge.

LTE definiert eine Reihe von Kanalbandbreiten. Je größer die Bandbreite ist, desto größer ist dementsprechend auch die Kanalkapazität. Im Downlink werden die Unterträger in Ressourcenblöcke (RBs) aufgeteilt. Dadurch ist das System in der Lage, die Daten auf eine Standardanzahl von Unterträgern aufzuteilen. Ressourcenblöcke umfassen jeweils 12 Unterträger, die unabhängig von der Gesamtbandbreite des LTE-Signals sind. Sie decken auch einen Zeit-Slot mit einer Dauer von 0,5 ms im Subframe ab. Dies bedeutet, dass unterschiedliche LTE-Signalbandbreiten eine unterschiedliche Anzahl von Ressourcenblöcken haben.

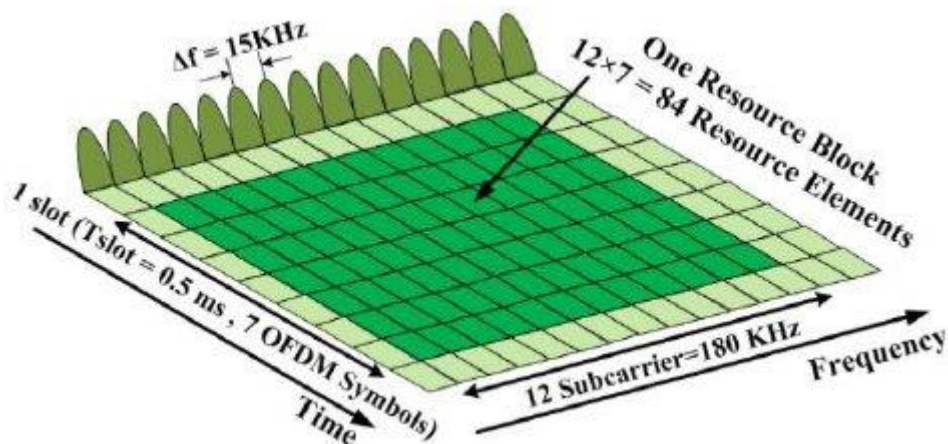


Abbildung 4.42: Darstellung eines LTE Resource Blocks bestehend aus 12 Unterträgern innerhalb eines Zeitslots [187]

Abbildung 4.42 zeigt die Zusammenstellung eines LTE Resource Blocks. Der zugrundeliegende Datenträger für einen LTE-Frame ist das Ressourcenelement (Physical Resource Block, PRB).

Tabelle 4.7: LTE OFDM-Bandbreiten Standards [181]

Bandbreite	Anzahl an Resource Blocks	Subträger
1,4 MHz	6	72
3 MHz	15	181
5 MHz	25	301
10 MHz	50	601
15 MHz	75	901
20 MHz	100	1201

Das Ressourcenelement (RE) besteht aus einem Unterträger mal einem Symbol, ist die kleinste diskrete Einheit des Frames und enthält einen einzelnen komplexen Wert, der Daten eines physikalischen Kanals oder Signals darstellt. Ein PRB besteht aus zeit- und frequenzabhängigen Anteilen. Das übertragene LTE-Downlink Signal besteht somit aus einer

von der Bandbreite abhängigen Anzahl an Unterträgern (entsprechend Tabelle 4.7) für die Dauer einer entsprechenden Anzahl an OFDM-Symbolen. Betrachtet man den physischen Frame, erkennt man die Anordnung der einzelnen OFDMA-Symbole innerhalb der Zeitslots. Der gesamte Frame hat eine Dauer von 10 ms. Ergänzend zum OFDMA-Symbol wird jeweils ein *Cyclic Prefix* (CP) vor jedem Symbol eingefügt. Das zyklische Präfix stellt eine Schutzzeit am Anfang jedes OFDMA-Symbols dar, die einen Schutz gegen Mehrwege-Verzögerungsspreizung bietet. Das zyklische Präfix stellt auch einen Overhead dar, der minimiert werden sollte. Im Standard zu LTE sind zwei Längen, normal (oder short) und erweitert (extended), für CP definiert [188]. Der Aufbau des LTE FDD Frames ist in Abbildung 4.43 dargestellt.

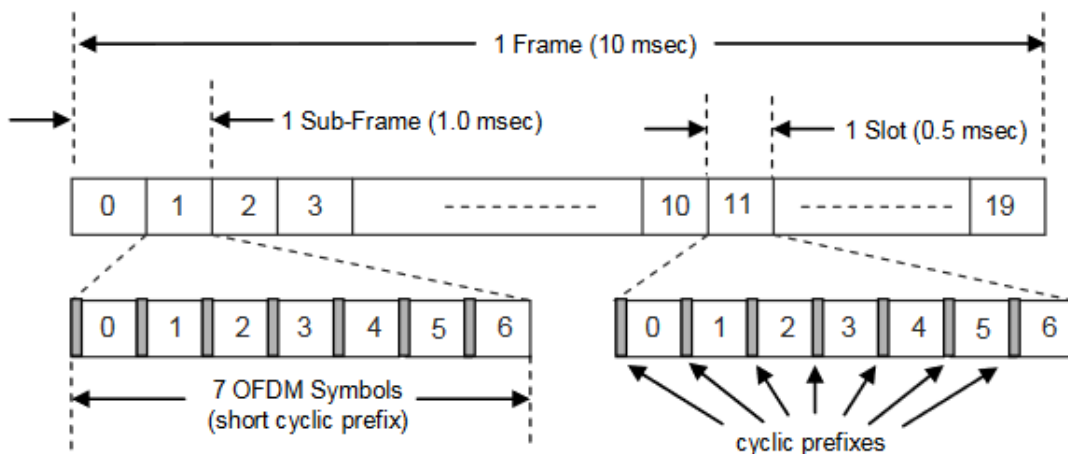


Abbildung 4.43: Allgemeine LTE-Frame Struktur [189, S. 8]

Ein Subframe aus Abbildung 4.43 kann auch durch ein Ressourcennetz dargestellt werden, wie in Abbildung 4.44 gezeigt. Jedes Feld innerhalb des Netzes repräsentiert einen einzelnen Unterträger für eine Symbolperiode und wird als Ressourcenelement (RE) bezeichnet. Bei MIMO-Anwendungen ist für jede Sendeantenne ein Ressourcenraster vorhanden [189, S. 10].

Im Gegensatz zu paketorientierten Netzen (z.B. Ethernet) wird bei LTE keine Physical Layer (PHY)-Präambel verwendet, um Trägeroffset-Schätzung, Kanalschätzung, Zeitsynchronisation usw. zu ermöglichen. Stattdessen werden spezielle Referenzsignale (RS) in die PRBs eingebettet, wie in Abbildung 4.44 mit R gekennzeichnet. Referenzsignale werden während des ersten und fünften OFDM-Symbols eines jeden Slots übertragen, wenn die kurze (normal) CP, und während des ersten und vierten OFDM-Symbols, wenn die lange (extended) CP verwendet wird. Weiters sind jeweils fünf Subträger Abstand dazwischen. Die Referenzsymbole haben komplexe Werte, die sowohl von der Symbolposition als auch von der Serving Cell, also dem gerade mit dem UE verbundenen eNodeB, bestimmt werden. In den LTE-Spezifikationen [188] spricht man von einer zweidimensionalen Referenzsignalfolge, die die Identität der eNodeB angibt.

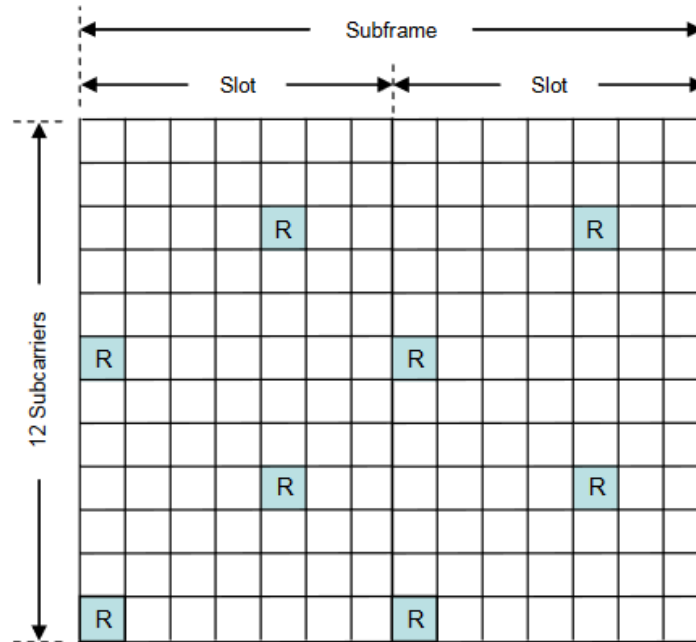


Abbildung 4.44: LTE Ressourcennetz mit Referenz Blöcken [189, S. 10]

Für den LTE-Uplink wird ein anderes Konzept für die Zugriffstechnik verwendet. Obwohl zwar immer noch eine Form der OFDMA-Technologie zur Anwendung kommt, wird die Implementierung als *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) bezeichnet. Einer der wichtigsten Parameter, der alle UEs betrifft, ist die Akkulaufzeit. Auch wenn die Akkuleistung immer besser wird, muss sichergestellt werden, dass die Mobiltelefone so wenig Energie wie möglich verbrauchen. Da der HF-Leistungsverstärker, der das Hochfrequenzsignal über die Antenne an die Basisstation überträgt, der leistungsstärkste Teil des UEs ist, muss dieser so effizient wie möglich arbeiten. Dies kann maßgeblich durch die Form der Hochfrequenzmodulation und das SignalfORMAT beeinflusst werden.

Signale, die ein hohes Spitzen-Mittelwert-Verhältnis (Peak-to-average-power-ratio, PAPR), was dem Quadrat des Scheitelfaktors entspricht, haben und deshalb eine lineare Verstärkung erfordern, eignen sich nicht für den Einsatz effizienter HF-Leistungsverstärker. Daher ist es notwendig, eine Übertragungsart zu verwenden, die im Betrieb einen möglichst konstanten Leistungspegel aufweist. Dies trifft nicht auf OFDM zu, denn dabei ist das PAPR hoch. Während ein hohes PAPR für die Basisstation kein Problem darstellt, ist es für das Mobiltelefon inakzeptabel. Daher verwendet LTE im Upload ein Modulationsschema, das als SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiplex) bekannt ist und ein Hybridformat darstellt. Es kombiniert ein niedriges PAPR, das von Single-Carrier-Systemen geboten wird, mit der Unempfindlichkeit gegenüber Mehrweg-Interferenzen und der flexiblen Zuweisung von Unterträgerfrequenzen, die OFDM bietet. Weitere Details dazu findet man unter [190, S. 203-246].

4.5.5 LTE-Geschwindigkeitsklassen

Abschließend soll noch ein Blick auf die aktuellen Geschwindigkeitsklassen von Mobilfunk geworfen werden. Diese steigen stetig, werden in Kategorien eingeteilt und sind in den

einzelnen Releases definiert. In Tabelle 4.8 ist eine Übersicht der aktuell zur Anwendung kommenden Kategorien anhand der GPP Releases zu finden. Dabei gilt es stets zu beachten, dass es sich dabei jeweils um die Angabe der maximal möglichen Up- und Download Werte handelt. Ob diese Werte tatsächlich erreichbar sind, hängt dabei in erster Linie davon ab, welche Kategorie das aktuelle LTE-Netz der Provider unterstützt. Weiters muss das Modem des UEs (LTE-Modem im Smartphone oder LTE-Dongle) diese Kategorie ebenfalls unterstützen. Viele der Kategorien sind noch dazu eher theoretischer Natur und kommen gar nicht zum Einsatz wie etwa Kategorie 5, 7, 8 und 14. LTE-CAT 12, 15 und 16 sollen vor dem Übergang zur nächsten Mobilfunkgeneration zum Einsatz kommen [191].

Für die gängigen Smartphones hat sich CAT 6 in der Mittelklasse als Standard durchgesetzt, während im Low-End Bereich oft nur CAT 4 zum Einsatz kommt. Im High-End Bereich kommen Modems zum Einsatz, die von CAT 12 bis CAT 21 Verbindungen unterstützen würden, jedoch gibt es diese Netze derzeit nicht [191]. Die aktuellen Modelle der 4 weltweit größten Smartphone Hersteller (gereiht nach Absatz [192]) unterstützen unter anderem CAT 20 (Samsung S20 [193]), CAT 21 (Huawei P40 [194]), CAT 20 (Xiaomi Mi10 [195]) und CAT 18 (Apple iPhone 12 [196]).

Tabelle 4.8: Übersicht über die LTE und LTE-Advanced Downloadgeschwindigkeiten [191]

LTE-Kategorie	Maximal mögliche Download-Geschwindigkeit	Maximal mögliche Upload-Geschwindigkeit	Anzahl der Träger pro Antenne	MIMO
LTE CAT 1	10 Mbit/s	5 Mbit/s		nein
LTE CAT 2	50 Mbit/s	25 Mbit/s		
LTE CAT 3	100 Mbit/s	50 Mbit/s		
LTE CAT 4	150 Mbit/s	50 Mbit/s	Downstream: 1 Upstream: 1	2x2
LTE CAT 5	300 Mbit/s	75 Mbit/s	Downstream: 1 Upstream: 1	4x4
LTE CAT 6	300 Mbit/s	50 Mbit/s	Downstream: 2 Upstream: 2	2x2 oder 4x4
LTE CAT 7	300 Mbit/s	100 Mbit/s	Downstream: 2 Upstream: 2	2x2 oder 4x4
LTE CAT 8	3.000 Mbit/s	1.500 Mbit/s	Downstream: 8 Upstream: 8	bis 8x8
LTE CAT 9	450 Mbit/s	50 Mbit/s	Downstream: 3 Upstream: 1	2x2 oder 4x4
LTE CAT 10	450 Mbit/s	100 Mbit/s	Downstream: 3 Upstream: 2	2x2 oder 4x4
LTE CAT 11	600 Mbit/s	50 Mbit/s	Downstream: 3 Upstream: 1	4x4
LTE CAT 12	600 Mbit/s	100 Mbit/s	Downstream: 3 Upstream: 2	4x4
LTE CAT 13	400 Mbit/s	150 Mbit/s	Downstream: 5 Upstream: 2	4x4
LTE CAT 14	4000 Mbit/s	9.500 Mbit/s	Downstream: 5 Upstream: 32	Downstream: 8x8 Upstream: 2x2 oder 4x4
LTE CAT 15	800 Mbit/s	225 Mbit/s	Downstream: 5 Upstream: 32	2x2 oder 4x4
LTE CAT 16	1.000 Mbit/s	100 Mbit/s	Downstream: 3 Upstream: 2	
LTE CAT 17	25.000 Mbit/s	9.600 Mbit/s	Downstream: 32 Upstream: ?	
LTE CAT 18	1.200 Mbit/s	225 Mbit/s	Downstream: 5 Upstream: ?	8x8
LTE CAT 19	1.700 Mbit/s	225 Mbit/s	Downstream: 32 Upstream: ?	
LTE CAT 20	2.000 Mbit/s	300 Mbit/s	Downstream: 7 Upstream: 3	4x4 FD-MiMO
LTE CAT 21	1.400 Mbit/s	300 Mbit/s		

5 Evaluierung von Kommunikationstechnologien

Ein UAV zu steuern bedeutet in erster Linie, einen zuverlässigen Datenlink zum Fluggerät über die gesamte Betriebsdauer zur Verfügung zu haben. Da es bereits viele unterschiedliche zivile UAVs in vielen Variationen kommerziell zu kaufen gibt, wurden im vorigen Kapitel unterschiedliche Systeme, die für den Datenlink Anwendung finden, erläutert. In diesem Kapitel werden die langjährigen Erkenntnisse aus Forschungsprojekten rund um Datenlinks für UAVs vorgestellt und im weiteren Verlauf die einzelnen Ansätze evaluiert. In Abhängigkeit der aktuellen sowie kommenden Regularien werden unterschiedliche Konzepte aufgezeigt, wie man aeronautische Datenlinks auch für UAVs umsetzen kann. Es werden dazu anfangs Ergebnisse aus Forschungsprojekten aufgezeigt, sowie der Einsatz von kommerzieller Hardware untersucht. In weiterer Folge wird auch aufgrund der Ergebnisse der Forschungsprojekte, das Hauptaugenmerk auf die Evaluierung von Mobilfunk der vierten Generation (4G – LTE) gelegt, denn aus derzeitiger Sicht (Jänner 2021) scheint der Einsatz dieser Technologie als UAV-Datenlink vielversprechend. Die Begründung dafür folgt in dem Kapitel 7.3.

5.1 Forschungsprojekte zum Thema Datenlink

Nachdem seit Jahren keine rechtlichen Grundlagen bzw. Regularien in Bezug auf die Kommunikationshardware für UAVs vorhanden sind, wurden im Laufe der letzten Jahre seitens der FH JOANNEUM unterschiedliche Ansätze, unter anderem auch aus der zivilen Luftfahrt, bezüglich ihrer Eignung für den Einsatz bei UAVs untersucht. Die verstärkte Forschung im Bereich UAVs führte zu mehreren nationalen Forschungsprojekten, bei denen es um die Anwendung von aeronautischen Systemen für UAVs (CertLink, OMOSA) sowie um die erstmalige Integration eines UAVs in den kontrollierten Luftraum (DEMONA) ging.

5.1.1 CertLink

Im Rahmen des nationalen Luftfahrtprojektes „Certifiable Data Link in Time Triggered-Architecture for Remote Control of Unmanned Aerial Vehicles (CertLink)“ wurde zwischen 2009 und 2013 untersucht, wie das Konzept einer zertifizierbaren drahtlosen Datenkommunikation eines unbemannten Flugzeugsystems gestaltet sein muss, um unter Verwendung kommerziell verfügbarer Komponenten ein fehlertolerantes und echtzeitfähiges Gesamtsystem zu erhalten. Die drahtlose Verbindung sollte den Avionik-Datenbus auf Basis des für die Luftfahrt zertifizierten *Time Triggered Protocols* (TTP) des UAVs über die Luftschnittstelle an die Bodenkontrollstation (Ground Control Station – GCS) erweitern und so die boden- und luftseitige Avionik in ein Gesamtsystem integrieren.

Ausgegangen wurde von der Analyse der *Time Triggered Protocol* (TTP)-Spezifikation [197] im Hinblick auf die notwendigen Modem-Eigenschaften. Mittels Matlab, Simulink und DSP-Builder wurden zwei Altera-FPGAs konfiguriert, um die zwei TTP-Kanäle als auch zwei

Payload-Kanäle in einen gemeinsamen Stream zu kombinieren. Dafür wurde ein HF-Front-End für eine Drahtlos-Übertragung im ISM 2,4 GHz-Band entworfen.

5.1.2 OMOSA

Im Rahmen des nationalen Luftfahrtprojektes „Open Modular/Open Source Avionics Architecture for Remotely Piloted Aircraft Systems – OMOSA“ wurde im Zeitraum 2014 bis 2017 die Systemarchitektur einer Avionik für leichte unbemannte Flugzeuge erforscht. Dabei wurde der Ansatz der Integrierten Modularen Avionik (IMA) für die Anwendung an einem UAV untersucht. Durch die Verwendung kommerzieller, modularer Hard- und quelloffener Software sollte eine Fluggeräteelektronik entstehen, die zur Flugsteuerung, als Navigationssystem und als C2-Link verwendet werden konnte. Deshalb wurde auch der Entwurf von in die Flugzeughülle integrierter Antennen inkludiert. Mittels einer Messkampagne mit einem Single-Rotor-UAV wurden die Projektergebnisse validiert.

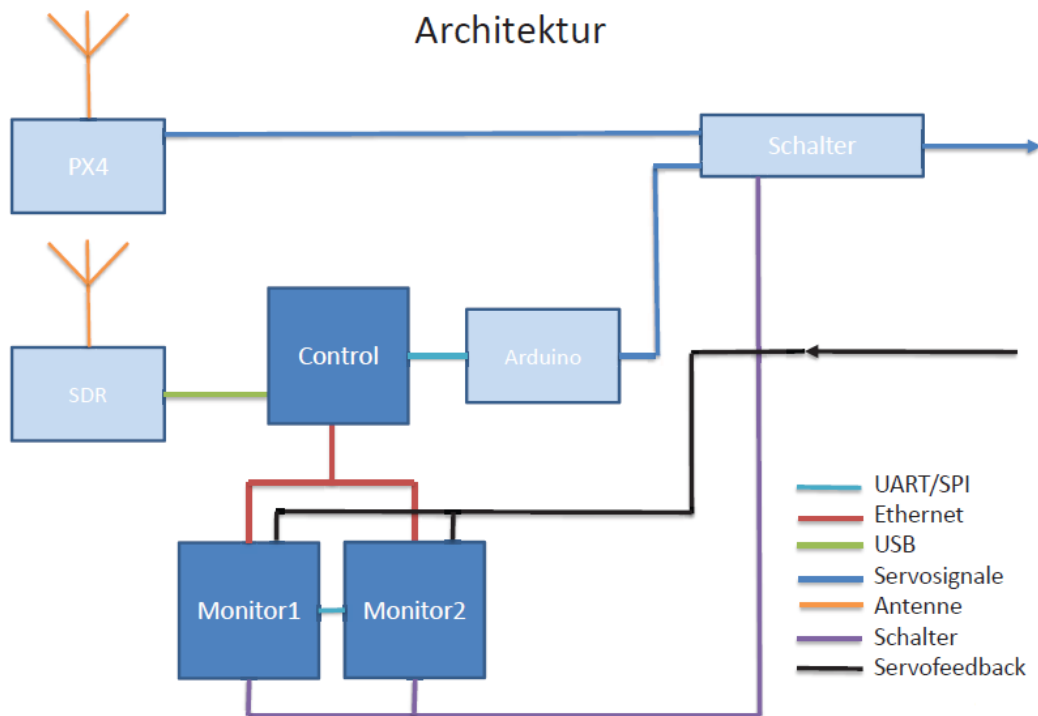


Abbildung 5.1: Erster Ansatz der OMOSA Architektur mit Software Defined Radio (SDR)

Im Projekt OMOSA wurde ein Konzept für ein *Flight Control System* (FCS) basierend auf der Integrierten Modularen Avionik Architektur entwickelt, das einen unabhängigen Fehler im System erkennen kann. So kann im Fehlerfall das System deaktiviert und gleichzeitig auf ein Backup System umgeschaltet werden. Die Basisversion dieser Architektur ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Dieses System besteht aus einem Kontrollrechner (Control), der die Steuerdaten von einem *Software Defined Radio* (SDR) von der Bodenstation (Ground Control Station – GCS) empfängt und die Telemetriedaten darüber zur GCS sendet. Die Steuerdaten werden in der Control-Einheit dekodiert und digital an einen Arduino Mikrocontroller weitergeleitet. Dieser steuert schließlich die Servos an. Eine doppelt ausgeführte Monitor Einheit vergleicht dabei jeweils das Steuersignal (SOLL) mit dem Servofeedback (IST). Treten hier Abweichungen außerhalb der Toleranz auf, wird sofort auf ein Backup System umgeschaltet. Dieses besteht

aus einem Pixhawk PX4 Autopiloten mit einem eigenen kommerziellen 2,4 GHz Empfänger und integrierten Telemetriesensoren und übernimmt ab dem Fehlerfall die Steuerung der Servos. Anhand von *Single-Board-Computern* (SBC) der Firma ODROID wurden die Control- und Monitoreinheiten implementiert.

Als Datenlink wurde im ersten Ansatz auf ein *Software Defined Radio* (SDR) gesetzt. Damit sollte die größtmögliche Flexibilität für den Datenlink erreicht werden. Ein SDR besteht meist aus einem FPGA (Field Programmable Gate Array), einem CPLD (Complex Programmable Logic Device) oder einem DSP (Digital Signal Processor), die über Software (oder auch Firmware), das Basisbandsignal kodieren. Das kodierte digitale Signal wird anschließend kanalkodiert und erst dann in ein analoges Signal umgesetzt. Am Ende ist ein flexibles HF Front-End, welches das analoge Signal auf die Trägerfrequenz aufmoduliert. So kann man je nach Frequenzbereich des HF Front-Ends und der entsprechenden Auflösung der ADU (Analog Digital Umsetzer) und DAU (Digital Analog Umsetzer) unterschiedliche Funk Anwendungen per Software auf ein und derselben Hardware realisieren. Codierung, Modulation sowie Trägerfrequenz können so per Software variierbar sein. Aufgrund der Tatsache, dass es kein dediziertes Frequenzband für UAVs gibt, war man auf die ISM-Bänder limitiert. Für die Anwendung im ISM-Band war das SDR jedoch zu komplex und benötigte dafür zu viel Rechenleistung. Daher konnte der Rechencluster, basierend auf den SBCs, nicht flüssig mit dem SDR arbeiten.

Daraufhin wurde ein neuer Ansatz gewählt und auf GSM/GPRS und (Long Range) LoRa als Datenlink gesetzt. Einfache GSM/GPRS Modul-Modems aus dem Industriebereich, wie in Abbildung 5.2 links zu sehen, wurden verwendet, um die kurzen C2-Datenwörter von der Bodenstation, einem Laptop, an die luftseiteigen SBCs zu senden. Dafür wurden einfache sogenannte AT-Kommandos verwendet. Dabei handelt es sich um einen Industriestandard für Befehle, die zum Konfigurieren und Parametrieren von Modems eingesetzt werden. Es können damit auch einfach kurze Datenwörter gesendet werden. Seitens der Standardisierungsstelle der Internationalen Fernmeldebehörde (ITU-T) wurde der AT-Befehlssatz in die V250 „Serial asynchronous automatic dialling and control“ [198] aufgenommen.



Abbildung 5.2: GSM Modul SIM800L (links) [199] und ein IMST iU880B USB LoRa Dongle [200]

Seitens 3GPP, einer weltweiten Kooperation von Standardisierungsgremien für die Standardisierung im Mobilfunk, wird der AT-Befehlssatz technisch für Mobilfunkanwendungen

spezifiziert. Dafür gibt es die TS27007 [201], ein öffentliches Dokument, das alle Spezifikationen rund um den Einsatz der AT-Befehle im Mobilfunk beschreibt. Anhand dieser Spezifikation wurde die einfache C2-Kommunikation implementiert.

Die LoRa-Technik stammt aus dem *Internet of Things* (IoT)-Bereich, ist eine Low-Power Drahtlos-Technologie, die in Europa im ISM und *Short Range Device* (SRD) Frequenzbereich von 433 (ISM) und 868 MHz (SRD) arbeitet und dabei große Reichweiten bei geringem Energiekonsum erzielt. Damit wurde der Redundanz-Datenlink als Backup-Lösung integriert. Mittels einfacher LoRa USB-Dongle konnte parallel zum GSM/GPRS ein zweiter Datenlink an den SBCs installiert werden. Dabei wurden von der Bodenschnittstelle in etwa 10 Sekunden-Intervallen Wegpunktdaten an die Luftschnittstelle und Telemetriedaten in die andere Richtung gesendet. Das LoRa Protokoll arbeitet autark und passt je nach Verbindungsqualität die (schmale) Bandbreite an.

Der gesamte UAV-Avionik-Cluster wurde nach dem Luftfahrtkonzept der Integrierten Modularen Avionik (IMA) [129, S. 30] entworfen, um leicht erweiterbar zu sein. Zum Abschluss des Projekts wurde mittels Single-Rotor-UAVs ein Testflug durchgeführt. Das entworfene FCS war dabei als autarker Rechencluster als Payload aktiv und generierte Testdaten um die implementierten Funktionen zu evaluieren.



Abbildung 5.3: OMOSA Testflug zur Evaluierung des IMA Testclusters

Abbildung 5.3 zeigt das Test UAV (links) sowie die mittels inkludierten GNSS aufgezeichneten Testpunkte der OMOSA-Hardware. Mittels GSM/GPRS sowie mit LoRa konnten diese Telemetriedaten auch an die Bodenstation gesendet werden.

5.1.3 DEMONA

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Demonstration of UAS Integration for Very Low Level (VLL) Airspace Operations – DEMONA“ wurde zwischen 2016 bis 2019 erstmalig in Österreich die Integration eines unbemannten Luftfahrzeugs in den zivil genutzten Luftraum und die dabei verwendete Flugführung, basierend auf dem Satellitennavigationssystem Galileo, erforscht. Hierzu wurden die Teilsysteme Navigationsempfänger und Navigationsdatenfusionierung, Luftraumabgrenzung (Geofencing), Datenlink-Technologien, sowie Kollisionsverhinderung in ein *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) integriert und mit diesem im kontrollierten Luftraum Flugerprobungen durchgeführt.

Den größten Zeitaufwand beanspruchte der Entwurf des UAVs, das für die projektspezifischen Missionen einen Payload von 15 kg transportieren sollte. Das UAV wurde aus Faserverbundwerkstoffen in Leichtbautechnik im Werkstofflabor an der FH JOANNEUM gefertigt. Das finale Modell hat eine Flügelspannweite von 3,8 m, eine Rumpflänge von 2,8 m und eine Flügelfläche von 1,8 m². Angetrieben wird das Starrflügel-UAV von zwei 4 kW Motoren. In erster Instanz wurde für das UAV eine Modellflugzulassung > 25 kg beim Aeroclub (siehe Abbildung 2.2) für ein Großmodell erfolgreich beantragt. In weiterer Folge wurde für den Flug im kontrollierten Luftraum eine SORA (siehe 2.5) durchgeführt und für die geplante Mission eine Sondergenehmigung seitens der Austro Control, die auch Projektpartner war, für einen Flug mit einem MTOW von 25 kg erteilt.



Abbildung 5.4: Die Entwicklung des DEMONA UAVs vom Entwurf zum flugfähigen zertifizierten Modell

Durch das hohe Abfluggewicht mussten seitens der Avionik spezielle Sicherheitsmaßnahmen geschaffen werden, um für die SORA die Risikoklassen zu mindern, damit die Austro Control die Zulassung erteilen konnte. Dafür wurde in erster Linie eine redundante Avionik iterativ aufgebaut. In Abbildung 5.5 ist der finale Stand der DEMONA Avionik-Systemarchitektur abgebildet.

Primär muss hier zwischen dem System im UAV (grün strichliert umrandet) und der bodenseitigen Hardware (Ground Control Station – GCS, lila strichliert umrandet) unterschieden werden.

Für den geplanten Betrieb des UAVs war eine entsprechende Bodenstation notwendig. Die GCS musste dem Piloten die Möglichkeit geben, das UAV einerseits manuell über eine Fernsteuerung (RC), optional auch mit einem Joystick über den Flugregler (Fly-by-Wire) und andererseits indirekt, über Wegpunkte und somit autonom, zu steuern.

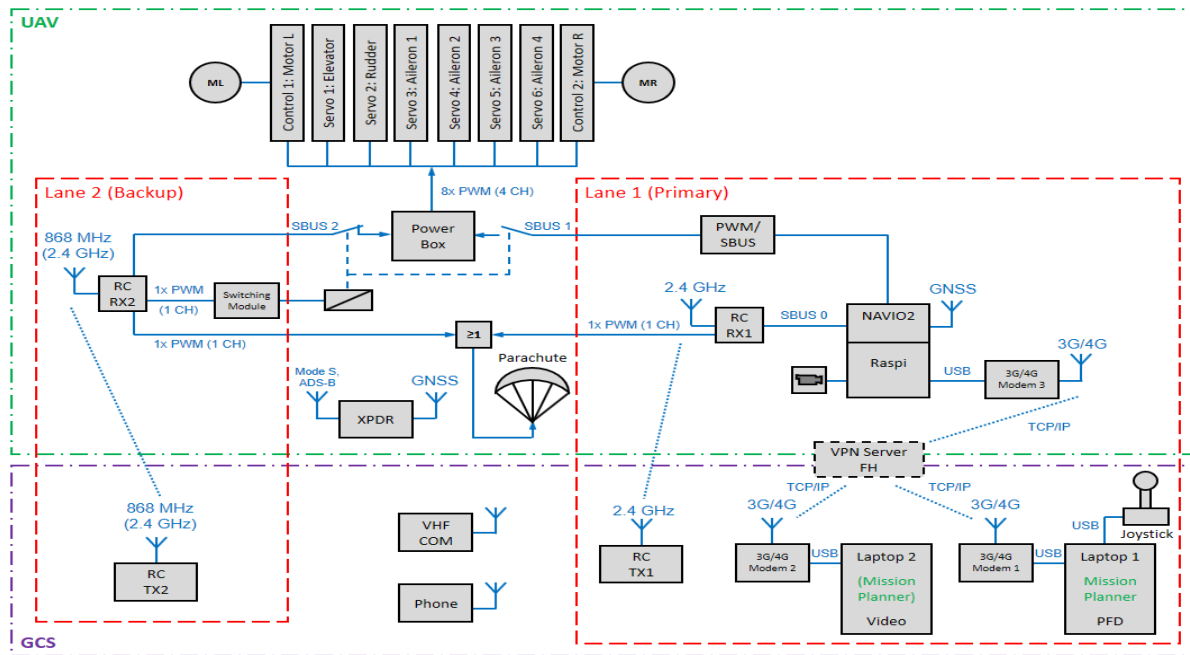


Abbildung 5.5: Systemübersicht der technischen Umsetzung der DEMONA-Avionik

Für den optionalen Flug außerhalb des Sichtbereichs (Beyond Visual Line-of-Sight – BVLOS) musste vorab der Flugkorridor geplant und entsprechend in der GCS implementiert werden. Speziell im Hinblick auf die Zulassung für den BVLOS Flug musste man auf der GCS besonderen Fokus auf die Darstellung der Flugparameter sowie der aktuellen Position legen. Sollte im Betrieb des UAVs ein unerwarteter Fehler an einem Teilsystem vorherrschen oder die geplante Route verlassen werden, musste dies dem Piloten umgehend ersichtlich sein, sodass rasch Gegenmaßnahmen eingeleitet werden konnten.

Die GCS wurde aus diesem Grund redundant analog mit der Avionik des UAVs aufgebaut. Dies ist in Abbildung 5.5 anhand der rot strichlierten Subsysteme mit der Bezeichnung Lane 1 und Lane 2 ersichtlich. In der finalen Version bestand die GCS aus x86 basierten Laptops mit aktuellem Windows 10 als Betriebssystem. Als GCS Software wurde Mission Planner (siehe Abbildung 3.23) eingesetzt, da damit in der Evaluierungsphase gute Erfahrungen in Bezug auf Zuverlässigkeit und Umfang gemacht wurden. Laptop 1 und Laptop 2 waren beide mit USB-Mobilfunk Datensticks ausgestattet, dadurch online und somit gemeinsam mit dem FCS in einem gemeinsamen IP-Netzwerk. So konnten die Systeme über das MAVLink Protokoll Daten untereinander austauschen. Details dazu werden im Kapitel 5.2.3.5 erklärt. Auf dem Laptop 1 wurden alle Flugparameter (Telemetriedaten) sowie ein Live SD-Videobild von der Kamera, die in der Front des UAVs montiert war, übertragen (siehe dazu Abbildung 6.13). Um die Empfangseigenschaften zu verbessern, wurden zwei externe LTE-Antennen für den USB-Mobilfunk Stick verwendet, wie in Abbildung 5.6 rechts zu sehen ist. Für eine optionale *Fly-by-Wire* Steuerung wurde auch ein Joystick per USB an den Laptop 1 angeschlossen.

Laptop 2 wurde primär für die Flugraumüberwachung mittels ADS-B verwendet. Dazu wurde ein modifizierter DVB-T USB-Dongle für den Empfang von ADS-B Signalen eingerichtet. Dafür musste zuerst ein passender Windows Treiber installiert werden. Anschließend konnte man mit freier Software wie Dump1090 oder RTL1090 den ADS-B Datenstrom dekodieren. Diese

wurden IP-basierend seitens der Software, die als localhost Server fungierte, am System bereitgestellt. Nun konnte man mit ebenso quelloffener Software wie adsbSCOPE den aktuellen Flugverkehr im Umkreis von etwa 200 km darstellen. Die Software greift IP-basierend auf die dekodierten ADS-B Daten der Decoder-Software zu. Weitere Details dazu kann man unter [202] nachlesen. Als Backuplösung war auch auf Laptop 2 die Mission Planner Software installiert, wurde aber nicht ausgeführt. Zur primären Bodenstation (GCS) zählte auch eine 2,4 GHz T14SG Futaba Fernsteuerung, die in Abbildung 5.6 links zu sehen ist.



Abbildung 5.6: Futaba T14SG und Aufbau der primären GCS (rechts)

Bodenseitig wurde als Backuplösung eine zweite Fernsteuerung, ebenso eine Futaba T14SG vorbereitet. Dabei wurde jedoch die Standard 2,4 GHz FASST HF-Sendereinheit (siehe dazu Kapitel 4.2) gegen ein Team Blacksheep (TBS) Crossfire 868 long range HF-Modul (siehe Abbildung 4.18) getauscht. Dadurch konnte man auf zwei voneinander unabhängigen Frequenzen das UAV steuern. Zusätzlich wurde mittels klassischem CB-Funk sowie via Smartphones der Kontakt zur lokalen Luftraumüberwachung kontinuierlich aufrechterhalten.



Abbildung 5.7: Gesamte Avionik inklusive Payload und Akkus für das DEMONA-UAV

Zur Erreichung der Projektziele mussten neben den flugrelevanten Systemen zusätzliches Equipment im UAV montiert werden. Darunter fallen neben dem FCS ein optisches *Detect and Avoid* System inklusive lokaler Datenauswertung sowie multiple Lagesensorik (Inertial Measurement Units – IMUs). Die gesamte Hardware wurde für den leichteren Ein- und Ausbau auf Holzplatten montiert und konnte über ein Schienensystem in das UAV integriert werden. Eine Übersicht über die Hardware ist in Abbildung 5.7 zu sehen. Von links nach rechts sieht man hier das gesamte FCS inklusive der Powerbox und eines USB-Mobilfunk Dongles, die Recheneinheit des Detect and Avoid Systems (Mitte) bestehend aus SBCs für die computergestützte Bildanalyse und die Lage Sensorik bestehend aus 2 IMUs, einem GNSS Empfänger und eines PCs für die live Berechnungen.

Es wird hier nun das gesamte FCS genauer betrachtet. Dazu wurden zwei komplett voneinander unabhängige Systeme auf der schwarzen Platine aus Abbildung 5.7 integriert. Das Hauptsystem bestand aus einem NAVIO2 Flugrechner als primäres FCS (siehe Abbildung 3.20). An diesem wurde der 2,4 GHz Transmitter der Futaba Fernsteuerung sowie ein USB-Mobilfunk Dongle angeschlossen. Damit hatte man die Möglichkeit, das UAV entweder manuell über die Futaba mit 2,4 GHz oder über das Mobilfunknetz per Joystick mittels Fly-by-Wire mithilfe des FCS zu steuern. Details zu der verwendeten Mobilfunkverbindung werden in 5.2.1 erläutert.

Das zweite und somit Backupsystem wurde über den Empfänger der TBS Crossfire umgesetzt. Damit konnte man zusätzlich das UAV auch über 868 MHz manuell steuern. Als zentrale Einheit, an die jeweils die Steuerdaten von beiden Systemen gesendet wurden, stellte eine PowerBox Royal SRS [203] dar. Die Powerbox hat Eingänge für zwei Empfänger, woran als Eingang 1 der Ausgang des NAVIO2 (FCS) und als Eingang 2 der Ausgang des TBS Crossfire Empfängers angeschlossen wurde. Mit den Ausgängen der Powerbox wurden die Servos bzw. die Motorsteuerung des UAVs verbunden. Die Powerbox selbst hat den Vorteil, dass sie unter anderem ein redundantes Energiemanagement verbaut hat. Die Umschaltung zwischen beiden Systemen, die an die Eingänge der PowerBox angeschlossen wurden, wurde über Relais geregelt. So wurde sichergestellt, dass immer nur jeweils ein Eingang an der Powerbox aktiv und gleichzeitig der andere Eingang deaktiviert ist. Damit konnte bei einem Fehler im primären System der Pilot auf das Backup System umschalten und das UAV weiterhin steuern. Die Technik wurde vorab in einem kommerziellen UAV im Flug erfolgreich getestet. Dabei wurde während des Fluges zwischen den einzelnen Systemen beliebig hin und her gewechselt um die Funktionalität ausgiebig zu testen.

Als zusätzliche Sicherheit im Fehlerfall wurde am UAV auch ein Fallschirmsystem angebracht. Dieses System kann entweder über je eine der beiden RCs über die Aktivierung eines Notfalltasters oder automatisch, im Falle einer zu starken vertikalen Beschleunigung ausgelöst werden. Auf die Details des *Detect and Avoid* Systems sowie der multiplen Lage Sensorik wird hier nicht eingegangen. Weiters wird auch das komplexe redundante Energiemanagement nicht näher erläutert. Für weitere Details kann das Konsortium des Projekts DEMONA kontaktiert werden.

Im Juni 2019 wurde erfolgreich ein Testflug am Flughafen Klagenfurt mit dem DEMONA-UAV durchgeführt. Dabei konnten einerseits für die FH JOANNEUM, für alle Projektpartner sowie auch für das Flughafenpersonal wichtige Erkenntnisse rund um den Betrieb von UAVs in einem kontrollierten Luftraum gesammelt werden.

5.2 Fokus der Evaluierung auf Mobilfunk als C2-Datenlink

Die Ergebnisse der jahrelangen Forschung rund um UAV-Datenlinks zeigten, dass, sobald man an den Rand des Sichtbereichs für die Steuerung des UAVs kommt, es kaum Alternativen zur Mobilfunktechnik gibt. Weiters sind die aktuellen Fernsteuerungstechniken zwar für den Modellflug ausreichend, für kommerzielle Anwendungen stößt man dabei allerdings schnell an Grenzen im Bereich Bandbreite und im Hinblick auf BVLOS Anwendungen auch an Reichweite. Der große Vorteil von Mobilfunk besteht darin, dass es eine bestehende Infrastruktur gibt und diese noch dazu weltweit standardisiert ist (Siehe dazu Kapitel 4.5). Die Frage, die sich hierbei stellt, ist, ob die eigentlich für die bodennahe Anwendung konzipierte Mobilfunktechnik auch für UAVs in Höhen bis 150 Metern über Grund anwendbar ist. Deshalb sollen in den folgenden Unterkapiteln erst die Voraussetzungen für den Einsatz von Mobilfunk für UAVs sowie die relevanten Parameter diskutiert werden, ehe in den Kapiteln 5.2.3 und 5.2.4 auf die Testsetups und Testszenarien zur Evaluierung der Technologie für UAVs eingegangen wird.

5.2.1 Voraussetzungen für den Einsatz von Mobilfunk für UAVs

Anhand der Erfahrungen, die durch die in Kapitel 5.1 vorgestellten Forschungsprojekte gesammelt werden konnten, zeigte sich schon recht bald, dass die Mobilfunktechnik einige Vorteile für die Anwendung bei UAVs mit sich bringt. Um Mobilfunk für UAVs einzusetzen, muss man eine Möglichkeit finden, diese Technologie in UAVs zu integrieren. Das bedeutet, man muss überlegen, wie man die Bodenstation und das FCS mit dem Mobilfunknetz verbinden kann. Im Falle der Bodenstation ist das einfach, wenn x86 Hardware bzw. Tablets mit integrierten Mobilfunkmodem verwendet werden. Für x86 Hardware (Windows, MAC oder Linux) gibt es entweder Mobilfunk USB-Dongle oder auch integrierte Mobilfunk Modems mit m.2 oder mSATA Schnittstelle. Das Problem bei der Anwendung von LTE USB-Dongle ist, dass diese seit Jahren keine Produktupdates mehr erhalten und man hier teilweise nur CAT 4-fähige Datensticks findet [204]. Das bedeutet, dass diese LTE USB-Dongle noch mit dem alten LTE Standard funktionieren und kein LTE-Advanced (ab CAT 6) unterstützen.

Möchte man das FCS mittels Mobilfunk mit dem Internet verbinden, kann man einerseits auf LTE USB-Dongles oder aus dem IoT Bereich auf entsprechende Module zurückgreifen. Das hier aufkommende Problem ist, dass es keine einfache Plug-and-Play Lösung gibt. Es bedarf zumindest einer USB-Schnittstelle am FCS, was allerdings die Pixhawk Modelle (siehe Abbildung 3.17) nicht aufweisen. Allerdings bekommt man auf der Webseite von Px4 dafür eine Anleitung, wie man dieses Problem umgehen kann. Grundsätzlich benötigt man für diese Möglichkeit einen „Companion Computer“, also einen weiteren Rechner, der eine USB-

Schnittstelle bietet, entsprechende Schnittstellen für eine Verbindung zum FCS, in dem Falle Pixhawk, herstellen kann und ein netzwerkfähiges Betriebssystem, meist eine Linux Distribution, unterstützt. Dafür wäre beispielsweise ein Raspberry Pi als SBC gut geeignet. So kann man die Informationen und Daten vom FCS über das MAVLink Protokoll an den SBC weiterleiten, der mit dem LTE USB-Dongle mit dem Internet verbunden ist. Allerdings muss man bedenken, dass man zwar mit dem LTE USB-Dongle mit dem Internet verbunden ist, aber damit nicht einfach eine direkte P2P-Verbindung (Point-to-Point) mit der Bodenstation herstellen kann. Das liegt daran, dass man im LTE-Mobilfunknetzwerk primär keine öffentliche IP-Adresse bekommt. Oftmals wird im Mobilfunk *Carrier Grade NAT* (CG-NAT) eingesetzt. Dabei geht es um das Grundproblem, dass die Anzahl der IPv4 Adressen limitiert ist. Das bedeutet, es gibt nicht genügend öffentliche IPv4 Adressen, um alle Mobilfunkteilnehmer mit Adressen zu versorgen.

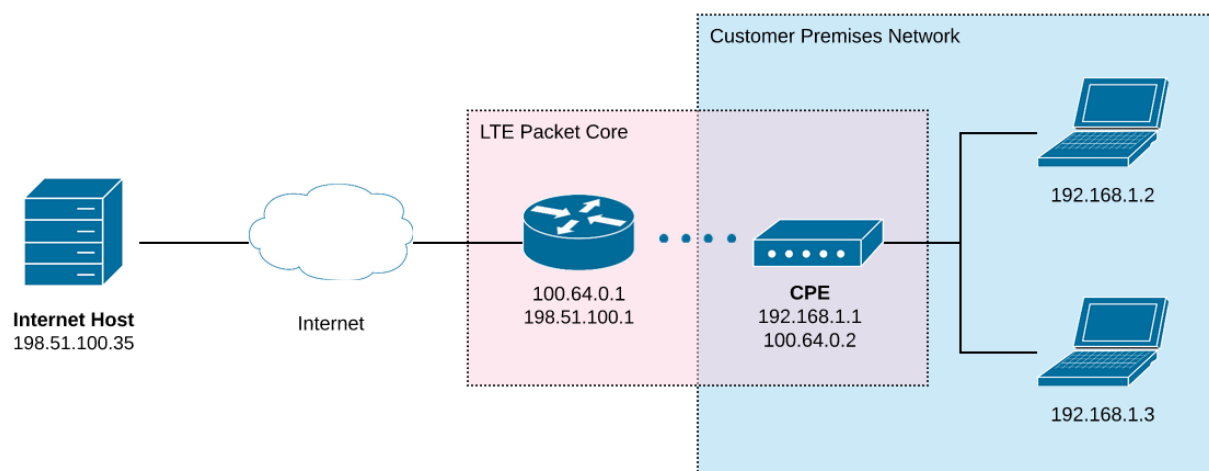


Abbildung 5.8: Carrier Grade NAT im Mobilfunknetz [205]

NAT steht für *Network-Address-Translation* und ist eine Methode, bei der die Adressen im IP-Header von IP-Paketen geändert werden. Diese Technik findet praktisch in jedem Router statt. Dabei wird im lokalen Netzwerk ein sogenannter privater Adressbereich für alle im Netzwerk verbundenen Geräte verwendet, z.B. 192.168.1.x oder 10.0.0.x, wobei für die Stelle x jede beliebige Zahl von 2 bis 254 seitens des Routers zugewiesen werden kann. Der Router hat dabei meist die Adresse 192.168.1.1.

Eine IP-Adresse besteht aus 32 Bits, die in vier 8er Blöcke geteilt ist. Daraus kann man 2^{32} Adressen generieren, was derzeit für die Menge an Geräten, die mit dem Internet verbunden sind, nicht ausreicht. Endgeräte werden immer als HOSTs bezeichnet. Aus diesem Grund wurden IPv6 Adressen eingeführt, mit denen man 2^{128} Adressen generieren kann. Die Verbreitung von IPv6 geht allerdings nur langsam voran, da viele Online-Services noch IPv4 basierend arbeiten, wie beispielsweise Server. Aus diesem Grund wird IPv4 weiterhin verwendet. Zusätzlich zur IPv4 Adresse wurde deshalb vor etwa 20 Jahren mit *Classless-Inter-Domain-Routing* (CIDR) eine Methode eingeführt, die in Klassen A bis E eingeteilten IP-Adressbereiche effektiver zu verteilen. Das Routing der IP-Pakete wird in Routern weltweit durch Routingtabellen umgesetzt. Um das Routing der Pakete effektiver zu gestalten wurden Subnetze (Teilnetze) eingeführt. Dabei wird das Netzwerk in mehrere Teilnetze unterteilt, in

mobilen Hosts, in dem Fall eine GCS sowie das FCS, zugreifen können. In Abbildung 5.10 ist ein solcher Aufbau schematisch dargestellt.

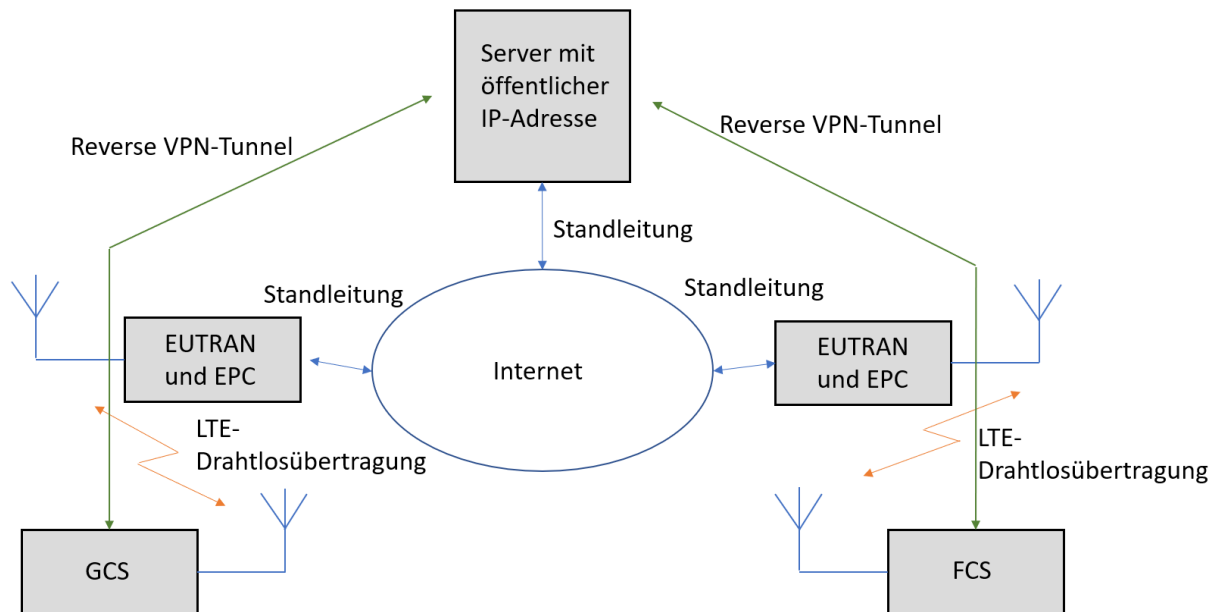


Abbildung 5.10: Aufbau eines gemeinsamen VPN-Netzwerks über Mobilfunk

Die GCS und das FCS, die die mobilen Endgeräte darstellen, bauen dabei jeweils einen Reverse-Tunnel zum öffentlich erreichbaren Server auf. Dabei stellt das mobile Endgerät durch ein offenes Standard-Port (z.B. Port 80 was für den normalen Webtraffic immer offen ist) eine Verbindung zum Server her, der dann durch diese Verbindung einen SSH-Tunnel zurück zum mobilen Client aufbaut, daher der Name „reverse Tunnel“ [209]. Dadurch sind beide Endgeräte sowie der Server im gleichen IP-Adressbereich und somit kann über das MAVLink-Protokoll zwischen GCS und FCS kommuniziert werden. Das Problem dabei ist, dass man keine direkte Verbindung zwischen den beiden Endgeräten hat, sondern einen Umweg über den Server gehen muss. Dadurch entsteht die doppelte Latenz, also eine doppelte Verzögerung der Laufzeit des Signals im Vergleich zu einer direkten Verbindung. Der Vorteil bei dieser Variante ist, dass der Aufbau durch Open Source Software (z.B. Linux) frei verfügbar ist.

Ein weiterer Punkt, den man beachten muss, ist, dass günstige LTE USB-Dongle nicht über leistungsfähige Antennen verfügen. Daher ist es ratsam, Modelle mit Anschlüssen für externe Antennen zu verwenden. Das schränkt die ohnehin schon geringe Auswahlmöglichkeit an LTE USB-Dongle weiter ein [210]. In Frage kommende Modelle wären der ZTE MF831 oder der Huawei E3372. Diese Modelle sind noch (Stand Jänner 2021) entsperrt für alle Mobilfunknetze erhältlich und haben jeweils zwei Anschlüsse für externe Antennen. Die TS9 Schnittstellen für die Antennenanschlüsse sind jedoch weniger gebräuchlich und somit kann man oft performante Antennen mit SMA Anschlüssen nicht direkt verbinden. Es gibt zwar SMA zu TS9 Adapter, jedoch birgt jeder Adapter im Hochfrequenz-Bereich die Gefahr von Dämpfung, sodass die Antenne schlussendlich keinen Gewinn mehr erzielen würde.



Abbildung 5.11: ZTE MF831 (links) [211] und Huawei E3372 (rechts) [212]

5.2.2 Relevante Parameter für die Evaluierung von Mobilfunk

Für eine Evaluierung von Mobilfunk muss man Parameter des Mobilfunknetzes messen und in weiterer Folge interpretieren. Dazu muss zuvor definiert werden, welche Parameter des Mobilfunknetzes hierfür eigentlich in Frage kommen. Bei einer herkömmlichen drahtlosen Nachrichtenübertragung, entsprechend der in Abbildung 4.8 gezeigten Übertragung von Steuerbefehlen einer Fernsteuerung eines Piloten am Boden an den Empfänger im Flugmodell, gilt es immer eine Leistungsbilanz aufzustellen. Diese Leistungsbilanz wird auch Link Budget genannt und berechnet sich recht einfach über Additionen von verstärkenden und Subtraktionen von dämpfenden Elementen über die Leistung in Dezibel. Verstärker hat man einerseits im Sender und auch im Empfänger. Wie in Formel (11) ersichtlich, nimmt die Sendeleistung mit dem Abstand zum Sender zum Quadrat in der Entfernung ab. Das empfangene Signal am Empfänger erfährt am Weg dorthin zusätzlich auch einen Pfadverlust. Im einfachsten Fall, wenn eine direkte Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger gegeben ist und keinerlei Hindernisse im Übertragungsweg sind, erfährt das Funksignal eine Freiraumdämpfung. Diese ist aus (11) und (12) definiert als Quotient der Sende- P_S und Empfangsleistung P_R , wobei r die Entfernung zwischen Sender und Empfänger darstellt [213]:

$$F = \frac{P_S}{P_R} = \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r \cdot f}{c} \right)^2 \quad (14)$$

Neben der Freiraumdämpfung wirken auch Absorptionsverluste bei Durchdringung von Medien (z.B. Atmosphäre), Verluste durch Mehrwegausbreitung durch entstehende Interferenzen (Siehe Abbildung 4.4: Fresnel Zone im Modellsport [144, S. 37]) oder auch Diffraktionen oder Abschattungen auf die Signalqualität. Für eine Berechnung dieser Verluste gibt es deterministische und stochastische bzw. statistische Herangehensweisen. Erstere wird üblicherweise nur für nahezu störungsfreie Übertragung verwendet. Im Mobilfunk werden daher je nach Frequenzbereich und Einsatzgebiet unterschiedliche statistische Berechnungsmodelle verwendet. Diese Modelle kommen auch in der Planung der

Mobilfunknetze zum Einsatz. Beispielsweise wird das Okumura-Hata Modell für einen Frequenzbereich bis 1 GHz und Entfernungen von einem bis 20 km verwendet, wenn man hochgelegene Sendeantennen hat. Die Dämpfung, mit A gekennzeichnet, berechnet sich damit zu [214]:

$$A(\text{dB}) = 69,55 + 26,16 \cdot \log(f) - 16,82 \cdot \log(h) + (44,9 - 6,55 \cdot \log(h)) \cdot \log(d) + C \quad (15)$$

- f Frequenz in MHz
- h Effektive Höhe der Basisstations-Antenne in Meter
- d Entfernung zwischen Basisstation und Mobilgerät in Kilometer
- C Umweltkorrekturfaktor
 - 0 dB Großstadt
 - 5 dB städtisches Gebiet
 - 10 dB vorstädtisches Gebiet
 - 17 dB ländliches Gebiet

Ein weiteres Modell wäre das COST-231-HATA-Modell, das mit dem Okumura-Hata Modell vergleichbar ist, jedoch für Frequenzen von oberhalb 1,8 GHz angewendet werden kann. Die Dämpfung wird dabei über folgende Formel berechnet [214]:

$$A(\text{dB}) = 46,3 + 33,9 \cdot \log(f) - 13,82 \cdot \log(h) + (44,9 - 6,55 \cdot \log(h)) \cdot \log(d) + C \quad (16)$$

- f Frequenz in MHz (1700 - 1900 MHz)
- h Effektive Höhe der Basisstations-Antenne in Meter
- d Entfernung zwischen Basisstation und Mobilgerät in Kilometer
- C Umweltkorrekturfaktor
 - 2 dB Großstadt
 - 5 dB städtisches Gebiet
 - 10 dB vorstädtisches Gebiet
 - 20 dB ländliches Gebiet

Das in den 80er Jahren entstandene Wellenausbreitungsmodell von Lee war besonders in den Anfangszeiten des Mobilfunks sehr gefragt. Als einfaches Modell hat es immer noch Bedeutung für Frequenzbereiche ab 450 MHz und Antennenhöhen von unter 3 Metern. Damit kann man die Empfangsleistung P_E des U_{es} für Entfernungen zwischen 1 und 10 km zur Basisstation in Dezibel darstellen [214]:

$$P_E(\text{dB}) = P_0 - y \cdot \log(d) - 3 \cdot \log\left(\frac{f}{900}\right) + K_0 \quad (17)$$

- f Frequenz in MHz
- d Entfernung zwischen Basisstation und Mobilgerät in km
- P_0 Referenzeingangsleistung (dBm)
- y Grunddämpfung (dB/Dekade)
- K_0 Korrekturfaktor

Für die Parameter P_0 und y, die geländeabhängig sind, werden anhand folgender Tabelle 5.1 die Werte angenommen.

Tabelle 5.1: Parameter für das Wellenausbreitungsmodell von Lee

Umgebung	P_0 (dBm)	y (db/Dekade)
Freiraumgebiet	-41	20
Ländliches, offenes Gebiet	-40	43,5
Vorstadt, Kleinstadt	-54	38,4
Großstadtgebiet	-55 bis -78	30 bis 43

Der Korrekturfaktor K_0 ergibt sich aus den spezifischen Gegebenheiten von Sender und Empfänger und ergibt sich aus der Multiplikation von fünf Parametern [214]:

$$K_0(dB) = 10 \cdot \log (K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5) \quad (18)$$

$$K_1 = \left(\frac{h_{BS}}{30,48m} \right)^2 \quad (19)$$

$$K_2 = \frac{h_{UE}}{3m} \quad (20)$$

$$K_3 = \frac{P_E}{10W} \quad (21)$$

$$K_4 = \frac{G_{BS}}{4} \quad (22)$$

$$K_5 = G_{UE} \quad (23)$$

h_{BS} Höhe der Basisstationsantenne (m)
 h_{UE} Höhe der UE Antenne (m)
 P_E Sendeleistung (W)
 G_{BS} Antennengewinn der BS Antenne
 G_{UE} Antennengewinn der UE Antenne

Mithilfe der Formeln (14) und (18) bis (23) kann man je nach Mobilfunkfrequenz die Ausbreitungsverluste zwischen Sender und Empfänger je nach Umgebung einfach darstellen:

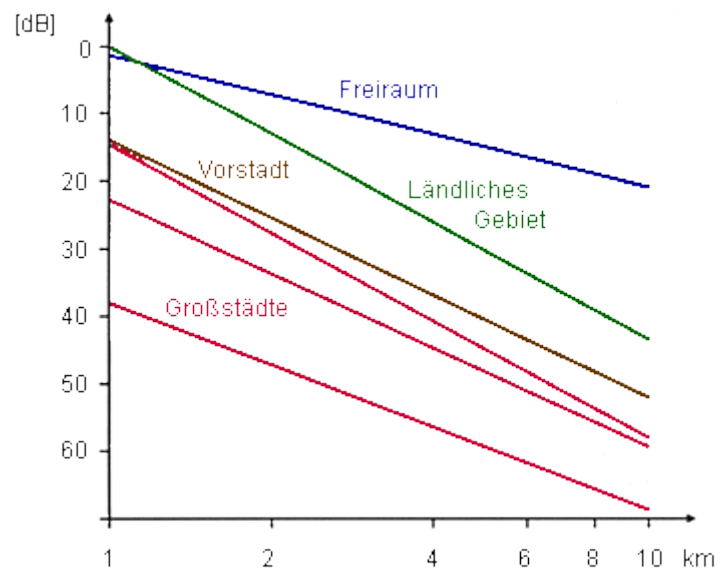


Abbildung 5.12: Vereinfachte Darstellung des Dämpfungsverhaltens nach Lee in Abhängigkeit der Umgebung sowie der Entfernung [214]

Für die Evaluierung der Mobilfunktechnik ist es auch wichtig, die essenziellen Parameter zu kennen, anhand derer man eine Aussage über die Empfangsqualität geben kann. Die Parameter selbst sind in den 3GPP Releases definiert, Schwellwerte für guten oder schlechten Empfang sind jedoch meist über „best practice“ abgeschätzt. Dazu gibt es beispielsweise auf www.lte-anbieter.info Tabellen, die die relevanten Parameter qualitativ unterteilt angeben. Der zwar online auf mehreren Webseiten gefundene Parameter *Arbitrary Strength Unit* (ASU) ist zwar nicht in den offiziellen 3GPP Releases definiert, wird aber selbst auf Wikipedia [215] als Referenzeinheit für die Signalstärke genannt, jedoch auch ohne eine Quellenangabe. Im weiteren wird hier auf die Definition des ASU Wertes von LTE Anbieter eingegangen [216].

Der ASU Wert stellt grundsätzlich eine Möglichkeit dar, den Empfangspegel und somit die Signalstärke am Empfänger darzustellen und das möglichst einheitlich für alle

Mobilfunkstandards. Mittels des ASU Wertes, der ganzzahlig bestimmt wird, kann für jede Mobilfunkgeneration der Empfangspegel in dBm ermittelt werden. Dieser entspricht wiederum dem *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) Wert mit einer maximalen Genauigkeit von ± 1 dBm. Je nach Mobilfunkstandard ist die Berechnung des ASU Wertes unterschiedlich und ändert sich oftmals mit neuen 3GPP Releases.

ASU bei GSM/GPRS/EDGE – Der 2. Mobilfunkgeneration

Der ASU Wert wird mit Werten von 0 bis 31 für den Pegel und mit 99 für unbekannt oder nicht unterstützt ausgegeben. Dabei wird seitens des Mobiltelefons der RSSI gemessen. In dieser Mobilfunkgeneration wurde die minimale Empfindlichkeit des Empfängers im Empfangszeit-slot auf -102 dBm festgelegt. Bei einer gesamten Framelänge von 4,6 ms und einem Timeslot von 0,575 ms wurden 8 Timeslots pro Frame übertragen. Bei der RSSI Messung wird jeweils immer die gesamte Leistung pro Frame berechnet, unabhängig davon, ob in allen Timeslots gesendet wird. Wird nur in einem Timeslot gesendet, fällt der RSSI unter die -102 dBm auf -111 dBm, also auf 1/8 der Mindestgesamtframeleistung. Mit der Einführung von EDGE wurden die Empfänger besser und daher wurde seitens 3GPP die minimale Empfindlichkeit auf -104 dBm abgesenkt. Daraus ergibt sich der minimale RSSI mit -113 dBm. Daraus ergibt sich die Umrechnungsformel für EDGE von ASU zu RSSI [216]:

$$RSSI (dBm) = (2 \cdot ASU) - 113 \quad (24)$$

Um die Empfangsqualität auch in Prozent anzugeben, kann man folgende Formel anwenden:

$$RSSI (\%) = \left(\frac{ASU}{31} \right) \cdot 100 \quad (25)$$

ASU bei UMTS/HSDPA/HSPA+ - Der 3. Mobilfunkgeneration

Seitens der ETSI wurde im TS 125 215 V3.1.1 (2000-01) für die dritte Mobilfunkgeneration der Parameter für die Empfangsqualität mit dem *Received Signal Code Power* (RCSP) Wert festgelegt. Dieser Wert ist mit dem ASU Wert gleichgesetzt und hat einen Wertebereich von 5 bis 91 sowie 255 für unbekannt. Die Berechnung des RSSI erfolgt über folgende Formel [216]:

$$RSSI (dBm) = ASU - 116 \quad (26)$$

Eine prozentuelle Bestimmung des RSSI Wertes ergibt sich daraus mit:

$$RSSI (\%) = \left(\frac{ASU + 5}{95} \right) \cdot 100 \quad (27)$$

Herstellerspezifisch kann es bei der Angabe des ASU Wertes jedoch zu Abweichungen kommen, da z.B. Android Geräte hier die Formel (24) mit (26) vermischen. Daher muss man bei der Skalierung der Werte entsprechend aufpassen

ASU bei LTE/LTE-A - Der 4. Mobilfunkgeneration

Der ASU Wert bei LTE bezieht sich nicht mehr auf den RSSI, sondern auf den *Referenz Signal Received Power* (RSRP) Wert. Die minimale Leistung ergibt sich bei RSRP aus der minimalen Empfängerempfindlichkeit nach 3GPP, also einem RSSI von -120 dBm und einer *Reference Signal Received Quality* (RSRQ) von -3 dB. Dieser minimale Wert liegt bei -140 dBm. Die ASU Skalierung liegt dabei zwischen 0 und 95, wobei 0 der minimale Wert ist. Der maximale RSSI beträgt -25 dBm und mit einem RSRQ von -3 dB ergibt sich daraus ein maximaler RSRP von

-45 dB, was dem bestmöglichen Empfang entspricht. Die Umrechnungsformel lautet wie folgt [216]:

$$RSSI \text{ (dBm)} = ASU - 140 \quad (28)$$

Eine detaillierte Übersicht der ASU Werte für die unterschiedlichen Mobilfunkgenerationen anhand von Tabellen ist im Anhang zu finden.

Bei LTE kommen, wie schon in Kapitel 4.5 erwähnt, Mehrfachzugriffsverfahren zum Einsatz. Im Downstream kommt OFDMA zur Anwendung. Der Aufbau der Frames ist in Abbildung 4.43 zu sehen. Speziell wichtig für das UE sind dabei die in Abbildung 4.44 ersichtlichen Referenzsignale innerhalb der PRBs, die darin mit R dargestellt sind. Die *Reference Signal Received Power* (RSRP) ist der lineare Mittelwert der Referenzsignalleistung (in Watt), also all jener mit R in Abbildung 4.44 gekennzeichneten Signale über die spezifizierte Bandbreite (Anzahl der REs). Diese speziellen Signale werden als zellspezifische Referenzsignale, *Cellspezifische Reference Signals* (CRS), bezeichnet. Die daraus bestimmte RSRP ist eine der wichtigsten Kenngrößen, die das UE für die Zellauswahl, die Neuauswahl und den Handover messen muss. Seitens 3GPP TS 36.214 ist RSRP als der lineare Mittelwert über die Leistungsbeiträge (in [W]) der CRS definiert.

Für die RSRP-Bestimmung bei einem Träger sind die zellspezifischen Referenzsignale R_0 gemäß TS 36.211 [217] zu verwenden. Wenn das UE zuverlässig erkennen kann, dass ein R_1 , und somit ein zweiter Träger verfügbar ist, kann es R_1 zusätzlich zu R_0 zur Bestimmung von RSRP verwenden. R_0 ist dabei das zellspezifische Referenzsignal für Antennenport 0 und R_1 für Antennenport 1, wie in Abbildung 5.13 dargestellt.

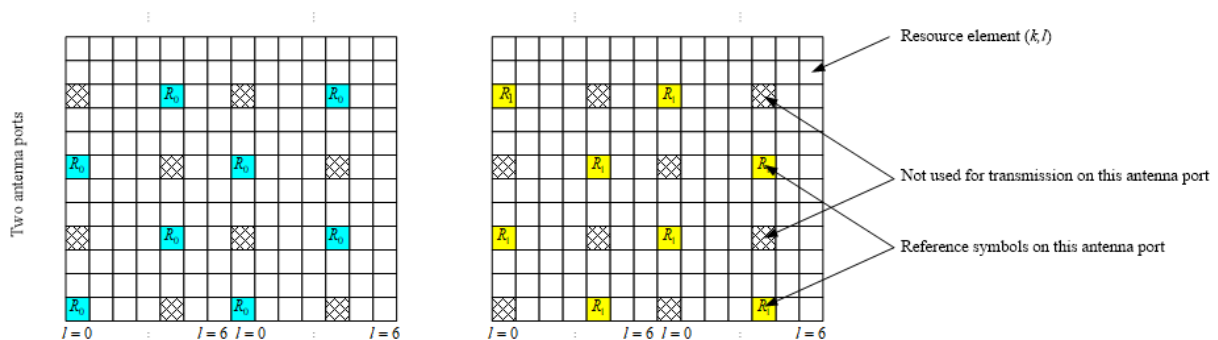


Abbildung 5.13: Bestimmung von RSRP bei MIMO aus TS 36.211 [217, S. 52]

Es werden je PRB immer vier CRS übertragen und somit 8 in einem Zeitslot. Die Position des CRS im Ressourcenblock ist für jede Zelle eindeutig und wird in der physikalischen Zell-ID kodiert. Die physikalische Zell-ID wird beim Einbuchungsvorgang an der Basisstation vom User Equipment (UE) erkannt. Dabei werden das primäre Synchronisationssignal (PSS) und das sekundäre Synchronisationssignal (SSS) verwendet. Zusätzlich erfolgt die Übertragung der Zellreferenzsignale mit erhöhter Sendeleistung (TX) [161, S. 231-273]. Das UE misst den aktuellen Empfangszustand anhand der empfangenen CRS und berechnet die RSRP nach folgender Formel [218]:

$$RSRP = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n P_{CRS,k} \quad (29)$$

n Anzahl aller gemessenen CRS
 $P_{CRS,k}$ Leistung der einzelnen CRS

Mittels der RSRP misst man nur die gemittelte CRS-Leistung und schließt alle Rausch- und Störleistungen aus. Wenn das UE den absoluten RSRP-Wert der Zelle kennt, kann es den Downlink-Pfadverlust berechnen und anhand dieser Werte sogar die Entfernung zur Basisstation schätzen. Die UEs senden Bestätigungssignale zurück an die Zelle, sodass die Basisstation die Leistung dynamisch anpassen kann. Der maximale RSRP-Wert basiert auf der maximalen Eingangsleistung eines UEs und entspricht, umgerechnet in dBm, -44 dBm. Der Minimalwert liegt bei -140 dBm.

RSRP dient als wichtiger Parameter zur Quantifizierung der Empfangsstärke. Dazu werden die zellspezifischen Referenzsignale nach 3GPP TS 36.211 [217] verwendet. Wenn das UE, z. B. das Mobiltelefon oder der LTE-Dongle, Referenzsignale empfangen kann, ist eine genaue Messung des RSRP-Wertes möglich. Leider gibt der RSRP-Wert keine Auskunft über die Signalqualität. Es gibt also noch keine Aussage über die Stärke des Referenzsignals im Vergleich zur Gesamtenergie im Kanal, die auch als Receive Signal Strength Indicator (RSSI) bezeichnet wird.

Deshalb wurde zusätzlich der Wert für die Referenzsignal-Empfangsqualität (Reference Signal Receive Quality, RSRQ) eingeführt. Der RSRQ-Wert bestimmt, ob die aktuelle Signalqualität ausreichend ist, oder ob es zu viele Störungen gibt und ein Handover erfolgen sollte. Um den RSRQ-Wert zu ermitteln, wird die Leistung eines ganzen OFDM-Symbols (siehe Abbildung 4.42) gemessen. Der erhaltene Wert ist der *Received Signal Strength Indicator* (RSSI). Der RSRQ-Wert wird dann mit der folgenden Gleichung berechnet [218]:

$$RSRQ = RSRP \cdot \frac{N_{RB}}{RSSI} \quad (30)$$

N_{RB} Anzahl der Resource Blocks gem. Tabelle 4.7
 RSSI Leistung des gesamten Trägersignals

Der *Receive Strength Signal Indicator* (RSSI) Wert bezieht sich auf den Träger-RSSI. Dieser wird durch die Messung der durchschnittlichen Gesamtempfangsleistung aller OFDM-Symbole inklusive der Referenzsymbole in der Messbandbreite über N Ressourcenblöcke bestimmt. Das N ergibt sich aus Tabelle 4.7 für die gewählte Bandbreite. Der Parameter repräsentiert die gesamte empfangene Leistung, einschließlich der gewünschten Leistung von der bedienenden Zelle sowie der gesamten vorherrschenden Leistung im gewählten Kanal als die auch die Rauschleistung. Als Formel ausgedrückt ergibt sich der RSSI dann wie folgt:

$$RSSI = S_{ges} + I_{ges} + N_{ges} \quad (31)$$

S_{ges} gesamte gemessene Empfangsleistung über alle Symbole
 I_{ges} gesamte Interferenzleistung
 N_{ges} gesamte Rauschleistung in der gewählten Bandbreite aus Tabelle 4.7

Der Parameter S_{ges} bezieht sich auf die Empfangsleistung des gemessenen Nutzsignals, I_{ges} gibt die durchschnittliche Störleistung an, die anhand der Summe der Interferenzleistung der Sendeleistungen aller benachbarter Zellen errechnet wird und N_{ges} steht für die thermische Rauschleistung. Alle Größen werden über die gleiche Bandbreite gemessen und auf eine Unterträgerbandbreite normiert.

Ein letzter nicht seitens 3GPP standardisierter Parameter, der jedoch häufig seitens Mobilfunkbetreiber und Hersteller von UEs Anwendung findet, ist der SINR-Wert. SINR steht für *Signal to Interference Noise* und charakterisiert die Beziehungen zwischen den aktuellen HF-Bedingungen und dem Datendurchsatz. LTE-UEs verwenden den SINR Wert, um damit den *Channel Quality Indicator* (CQI) zu berechnen, der an das Mobilfunknetz von den UEs zurückgemeldet wird. Daher wird SINR als Indikator für die aktuelle Netzqualität verwendet. Der nicht standardisierte Parameter wird seitens der meisten UEs gemessen und von Netzbetreiber Messgeräten aufgezeichnet. Die Implementierung der Messung über die Modems in den UEs weicht oft von Hersteller zu Hersteller ab. Die Formel kann aber allgemein angenähert werden [219]:

$$SINR = \frac{1}{\frac{1}{12 \cdot RSRQ} - x} = \frac{S}{I + N} \quad (32)$$

x stellt das Verhältnis RE zu PRB dar

Der Wert x stellt dabei die Auslastung der Übertragung dar und ist das Verhältnis der *Resource Elements* (RE) zum gesamten *Physical Resource Block* (PRB). Der Wert schwankt somit zwischen 1, was einer vollen Auslastung, und 1/6, was keiner Auslastung bei einem Träger entspricht. Dabei geht es bei der Auslastung x darum, wie viele REs pro PRB für Datentransport genutzt werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Parameter RSRP, RSRQ und SINR essenziell für eine Bewertung der Empfangsqualität des LTE-Netzwerks sind. Seitens 3GPP wird jedoch lediglich eine Skala angegeben, anhand der die vom UE gemeldeten Werte zugeordnet werden können. Dabei sendet es Werte im Bereich von -17 bis 97, die einem bestimmten Bereich des realen RSRP-Wertes zugeordnet werden, wie in der folgenden Tabelle 5.2 aus 36.133 [220, S. 683] gezeigt wird.

Anhand der Parameter RSRP, RSRQ und SINR kann man messtechnisch die Qualität einer aktuellen LTE-Verbindung quantitativ festhalten. Das Problem dabei ist jedoch die Zuordnung in Kategorien. Seitens 3GPP gibt es keine Vorgaben, was „guten“ oder „schlechten“ Empfang darstellt. Dabei hat sich eine Art „best practice“ durchgesetzt. Das bedeutet allerdings auch, dass es, wenn man nach entsprechenden Tabellen für die Signalqualitätseinteilung sucht, es unterschiedliche Skalen gibt. Weiters muss man auch bedenken, was „guter“ und „schlechter“ Empfang bedeuten und auf welche Anwendung man die Qualität bezieht. Selbst bei schlechtem Empfang kann man telefonieren und kleine Datenpakete senden und empfangen. Die ASU-Tabelle im Anhang [216] listet dafür etwa dem aktuellen RSSI und RSRP entsprechend mögliche Up- und Download Geschwindigkeiten.

Tabelle 5.2: Zuordnung nach 3GPP der RSRP Werte

Reported value	Measured quantity value	Unit
RSRP_-17	RSRP < -156	dBm
RSRP_-16	-156 ≤ RSRP < -155	dBm
...
RSRP_-03	-143 ≤ RSRP < -142	dBm
RSRP_-02	-142 ≤ RSRP < -141	dBm
RSRP_-01	-141 ≤ RSRP < -140	dBm
RSRP_00	RSRP ≤ -140	dBm
RSRP_01	-140 ≤ RSRP < -139	dBm
RSRP_02	-139 ≤ RSRP < -138	dBm
...
RSRP_95	-46 ≤ RSRP < -45	dBm
RSRP_96	-45 ≤ RSRP < -44	dBm
RSRP_97	-44 ≤ RSRP	dBm

Hier seien als Beispiel zwei unterschiedliche Tabellen für eine Kategorisierung der Empfangsqualität in Abbildung 5.14 und Abbildung 5.15 angegeben.

	RSSI	SINR (dB)	RSRQ (dB)	RSRP (dB)	EC/Io (dB)
Technology	LTE and 3G	LTE only	LTE only	LTE only	HSPA+ and EVDO
Excellent	> -65	> 12.5	> -5	> -84	> -2
Good	-65 to -75	10 to 12.5	-6 to -10	-85 to -102	-2 to -5
Fair	-75 to -85	7 to 10	-6 to -10	-103 to -111	> -2
Poor	< -85	< 7	< -11	< -112	< -10

Abbildung 5.14: Skalierung der Parameter RSRP, RSRQ und SINR nach [221]

Aufgrund der vielen Mobilfunkteilnehmer ist die Dichte an LTE Mobilfunkstationen im Vergleich zu UMTS recht hoch. Das bedeutet, die Zellgrößen sind vor allem in Ballungszentren klein. Jede Mobilfunkzelle hat eine Identifikationsnummer. Diese war bei GSM und UMTS die sogenannte *Cell Global Identification (CGI)*. Das wäre eine zusammengesetzte Nummer aus dem *Mobile Country Code (MCC)*, dem *Mobile Network Code (MNC)*, dem *Location Area Code (LAC)* und der *Cell Identity (CI)*.

		RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SINR (dB)
RF Conditions	Excellent	≥ -80	≥ -10	≥ 20
	Good	-80 to -90	-10 to -15	13 to 20
	Mid Cell	-90 to -100	-15 to -20	0 to 13
	Cell Edge	≤ -100	≤ -20	≤ 0

Abbildung 5.15: Skalierung der Parameter RSRP, RSRQ und SINR nach [219]

MCC und MNC sind fixe Codes, die für jeden Mobilfunkbetreiber eindeutig sind. Das betrifft in Österreich beispielsweise alle Infrastruktur betreibenden Provider wie A1, Magenta und Drei (Hutchinson) und auch alle Subnetzbetreiber, die sich in die Infrastruktur dieser drei Betreiber eingemietet haben. Zusammengefasst ergeben sie die *Public Land Mobile Network (PLMN)* Kennung [161, S. 14].

Der *Location Area Code (LAC)* ist eine zwei Byte große Kennung, die Aufenthaltsbereichszahl genannt wird [222]. Die *Cell Identification (CID)* ist eine Mobilfunkzellenidentifikation und wird in GSM Netzwerken bzw. auch in UMTS und LTE-Netzwerken als eindeutige Kennzahl für eine Mobilfunkzelle als 8 Bit große Zahlenkennung angegeben. Weiters wird bei LTE die Kennung eines Sektors als *evolved NodeB Identifier (eNB-ID)* bezeichnet, anhand der LTE-Sektor eindeutig innerhalb des PLMN identifiziert werden kann. Dieser besteht aus einer 20 Bit großen Zahl. Bei LTE ist ein Sektor der Bereich, der von einer Antenne an einer LTE-Sendestation (eNodeB) abgedeckt wird. Gemeinsam ergeben eNB-ID und die CID Kennung eine Zell Identität (CI) als eine 28 Bit große Zahl. Zusammen mit dem MCC und MNC ergibt es den *E-UTRAN Cell Global Identifier (ECGI)* für die weltweite Erkennung eines eNodeBs [223]. Wird mittels Mess-Applikationen wie beispielsweise G-Net Track Pro eine ECGI festgestellt, kann mit der Hilfe von öffentlichen Datenbanken nach der Zelle gesucht werden. Die offiziellen Informationen sind nicht öffentlich zugänglich und obliegen den Mobilfunk Providern.

5.2.3 Setup von Kommunikations-Testhardware mit Fokus auf Mobilfunk

Im vorigen Kapitel wurden die Rahmenbedingungen rund um den Einsatz von Mobilfunk für UAVs erläutert. Nun soll darauf aufbauend die eingesetzte Testhardware und deren Setup erläutert werden. In Kapitel 5.1 wurde unter anderem das Forschungsprojekt OMOSA vorgestellt, in dem erstmals Mobilfunk als optionaler Datenlink für die Übermittlung von Wegpunkten im 2G Netz verwendet wird. Im darauffolgenden Forschungsprojekt DEMONA wurde dieser Ansatz weiterentwickelt, um mittels LTE einen Datenlink für ein UAV zu realisieren. Die dafür zur Anwendung gekommene Architektur ist in Abbildung 5.5 zu sehen. Die in Summe acht verschiedenen Testsetups werden in den folgenden Unterkapiteln kurz erläutert. Am Ende dieses Kapitels sind alle acht Setups in einer Tabelle übersichtlich zusammengefasst.

5.2.3.1 Testsetup 1 – Messungen mit UMTS USB-Dongle

Das erste Testsetup bestand aus einem Raspberry 3 SBC, einem Huawei E303 UMTS USB-Dongle sowie einem PC. Ziel dieses Setups war es, die Funktionalität des Reverse Tunnels allgemein zu testen sowie erste Latenzmessungen im 3G Netz durchzuführen. Weiters wurde an der FH JOANNEUM ein SSH Server mit einer öffentlichen IP-Adresse eingerichtet. Somit wurde einerseits mit dem Raspberry Pi die Luft- und mit dem Laptop die Bodenschnittstelle simuliert. Abbildung 5.16 zeigt den ersten Testaufbau.

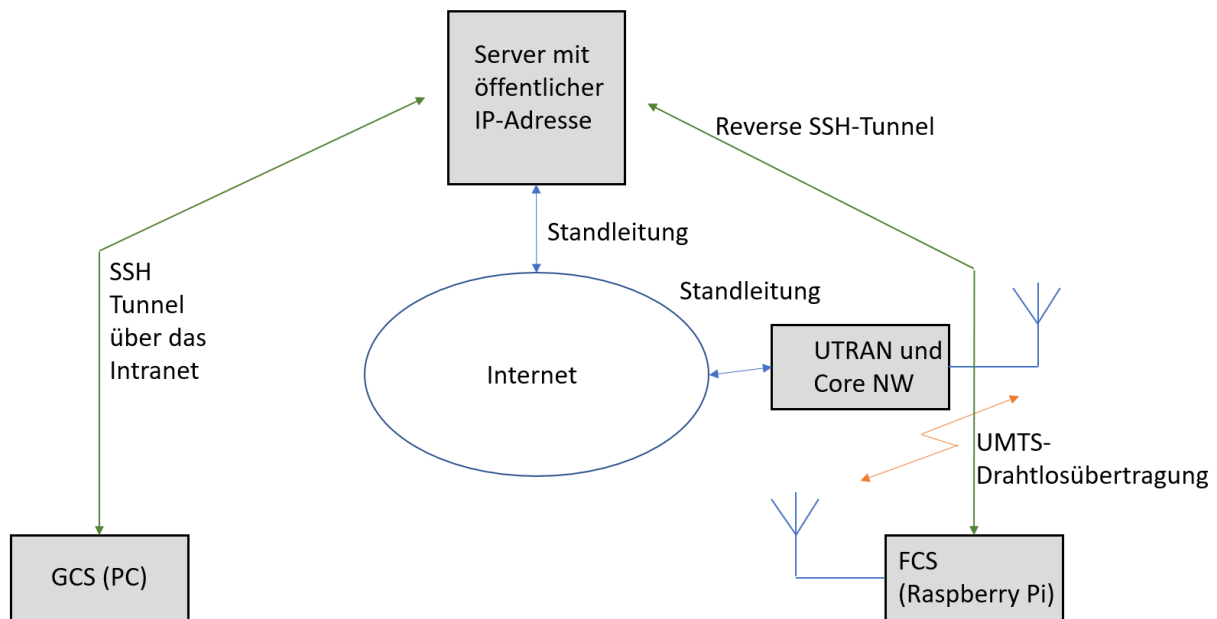


Abbildung 5.16: Schematischer Aufbau des ersten Testsetups

Um eine direkte P2P Verbindung zwischen dem Raspberry Pi und dem Server herzustellen wurde der UMTS USB-Dongle Huawei E303 gewählt. Diesen UMTS Datenstick konnte man in einen speziellen Modem-(Bridge-)Modus bringen, bei dem die Software auf dem Stick deaktiviert wurde. Dadurch fiel ein Layer des NAT weg und man hatte direkten Zugriff auf die einzelnen Modems (UMTS sowie GSM) über serielle Schnittstellen, die im Raspbian Betriebssystem des Raspberry Pis unter tty0 bis tty2 gelistet wurden. Mittels des Befehls vwdial wurde ein Skript geschrieben, mit dem der Raspberry Pi über das UMTS Mobilfunknetz online ging. In weiterer Folge wurden Skripte für unterschiedliche Tests geschrieben:

- Regelmäßige Abfrage der **UMTS-relevanten Statusinformationen**, darunter etwa der AT-Befehl AT+CREG, der Informationen über den Registrierungsstatus und die Zugangstechnologie der Serving Cell ausgibt und AT+CSQ [224, S. 90], der Informationen über die Signalqualität (Cell Signal Quality, CSQ) in Bezug auf den RSSI-Wert und die angewendete Mobilfunktechnologie, in dem Fall UMTS, hat.
- Mittels Navilock NL-8002U GPS USB-Dongle wurde die **GPS-Position** gelogged.
- Mit einem DS3231SN Real Time Clock (RTC) Modul wurde die **genaue Zeit** gelogged.
- Durchführung eines **Ping Tests** in fixen Intervallen.
- Durchführung eines **Datentransfertests**, indem in fixen Intervallen abwechselnd eine 1 kB und eine 100 kB große Datei vom Server auf den Raspberry übertragen wurde.

5.2.3.2 Testsetup 2 – Smartphone Messungen im LTE-Netz

Im Testsetup 1 geriet man schnell an die Grenzen in Bezug auf Statusinformationen und in Bezug auf die aktuelle Verbindung zur nächsten Mobilfunkbasisstation. Um den Umfang der gemessenen Statusinformationen zu erweitern und auch Messwerte zum LTE-Mobilfunknetz zu sammeln, wurde ein LTE fähiges Smartphone eingesetzt. In diesem Setup wurde ein Xiaomi Redmi Note 4X verwendet [225]. Dieses im Jahr 2017 produzierte Modell unterstützt in der verwendeten globalen Version die LTE Bänder 1, 3, 7, 20, 38, 39, 40 und 41 (für die

Frequenzbereiche siehe Abbildung 4.34) und somit alle in Österreich zur Anwendung kommenden Bänder. Es unterstützt die LTE-A Kategorie Cat 6. Für die Messung kam die Applikation G-Net Track Pro der Firma Gyokov Solutions [226] zum Einsatz.

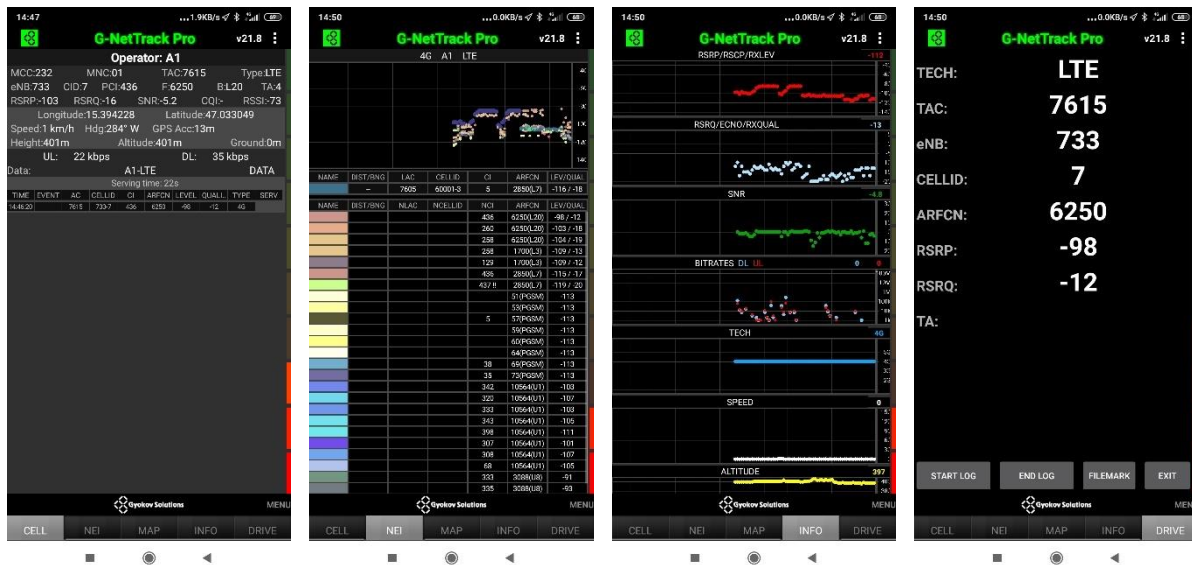


Abbildung 5.17: G-Net Track Pro bietet eine Vielzahl an Statusinformationen zur aktuellen LTE-Verbindung [226]

In der kostenpflichtigen Pro Variante bietet diese Software umfangreiche Möglichkeiten zur Analyse des Mobilfunknetzes für alle Mobilfunkgenerationen. Für den gesamten Funktionsumfang wird auf die Homepage des Herstellers [226] verwiesen, wo alles gut und übersichtlich beschrieben ist. Der Funktionsumfang der App erlaubt es, neben der aktuellen LTE-Zelle (eNodeB) samt zugehöriger Parameter wie RSRP, RSRQ, Frequenzband, RSSI etc. diese Informationen auch von benachbarten Zellen mitzuzugren. Somit erhält man für jede Messung eine umfangreiche Protokolldatei (Logfile) für detaillierte Auswertungen.

Mit diesem Setup wurden für die Evaluierung die ersten Messungen anfangs am Boden mittels PKW und weiters mittels UAVs auf dem Modellsportplatz Weiz durchgeführt.

5.2.3.3 Testsetup 3 – LoRa Performance Test

Aus Redundanzgründen wurde neben der Mobilfunktechnik im Forschungsprojekt OMOSA (siehe dazu in Kapitel 5.1.2) erstmals auch LoRa verwendet. Im darauffolgenden Projekt DEMONA (siehe dazu in Kapitel 5.1.3) wurden die Versuche intensiviert. Dabei wurde ein SX1272 LoRa Modul von Cooking Hacks eingesetzt. Dies wurde mittels eines Shields auf einem Arduino montiert. Somit konnte eine mobile und eine stationäre Einheit simuliert werden. Dabei wurde die stationäre Einheit an einen Laptop angeschlossen und die mobile Einheit mittels Powerbank betrieben. Die Module wurden für die Tests mittels Parametrisierung auf Reichweite optimiert. Es wurden Bodentests und Flugtests durchgeführt. Die Eigenschaften der LoRa Module sind in Abbildung 5.18 angeführt.



SX1272 LoRa Modul

- Hardware: MCU (SBC) + Radio Shield + LoRa Module
- Frequenz: 868 MHz
- Hohe Reichweite (bis >20 km bei LOS) – „Long Range“
- Geringe Datenrate (bis etwa 20 kbit/s) – „Range vs. Rate“
- Abmessungen (ohne Antenne und Stecker): 78 x 60 x 24 mm
- Gewicht (mit abgebildeter Antenne): 73 g
- Anwendung: Datenlink

Abbildung 5.18: Technische Daten des SX1272 LoRa Moduls [227]

5.2.3.4 Testsetup 4 – Messungen mittels LTE USB-Dongle

Für das Projekt DEMONA wurde entschieden, Mobilfunk als sekundären Datenlink einzusetzen. Aus diesem Grund wurde zuerst das Setup aus Testsetup 1 als Basis genommen und um einen zweiten mobilen Knoten ergänzt, das entspricht dem Aufbau aus Abbildung 5.10. Für die ersten Messungen der LTE-Latenz wurde auf dem Raspberry Pi 3 ein PWM-Shield angebracht und daran Servos angeschlossen. Ein Shield ist eine Erweiterungsplatine, die direkt mit dem Raspberry Pi SBC verbunden werden kann. Mittels eines Joysticks (Logitech G Extreme 3D Pro) am Laptop, der als GCS diente, war so die Steuerung der Servos über das Mobilfunknetz möglich. Die Verbindung der beiden mobilen Endgeräte erfolgte durch einen Openconnect VPN Server. Dabei wurde der Server-Instanz auf dem öffentlich erreichbaren Linux-Server der FH JOANNEUM installiert. Mittels Openconnect Client-Software konnte man so jeweils einen VPN Tunnel vom Raspberry Pi sowie dem Laptop zum bereitgestellten Server herstellen. Der Laptop sowie der Raspberry Pi, je mit einem ZTE MF831 LTE USB-Dongle online, waren dadurch im selben privaten Netzwerk. In weiterer Folge wurde ein Skript gestartet, das abwechselnd am Laptop die Stellwinkel 0°, 45° und 90° für den Servo, angeschlossen am Raspberry Pi, ausgab. Der Servo verfügte über eine Feedback-Ausgabe, über die der eingestellte Winkel abgefragt werden konnte. So konnte fortwährend ein Soll-Ist-Vergleich durchgeführt werden. Das Ergebnis der Wahr-Falsch Abfrage wurde wiederum an den Laptop zurückgesendet und gespeichert. Dieser Aufbau wurde für die Messung von Latenzen sowie zur direkten Steuerung eines UAVs eingesetzt. Das Ziel dieser Messung war, die Latenzen der Übertragung sowie Langzeittests über mehrere Stunden durchzuführen, um die Stabilität der VPN Verbindung zu testen. Weiters sollte überprüft werden, ob eine direkte Steuerung eines UAVs über das Mobilfunknetz mit diesem Setup möglich ist.

Dieses System wurde in weiterer Folge modifiziert. Es wurde anstatt des PWM Shields ein NAVIO2 Shield als FCS auf den Raspberry Pi 3 eingesetzt (siehe Abbildung 3.20). Weiters

wurde eine modifiziertes Raspbian mit integrierter Px4 Firmware auf dem Pi installiert. Somit konnte man den Raspberry mit NAVIO2 als vollwertigen Flugregler (siehe dazu Kapitel 3.2) einsetzen. Anstatt eines separaten Telemetrie-Funkmoduls auf 433 MHz konnten die Telemetriedaten mit diesem System über den LTE USB-Dongle mittels des MAVLink Protokolls an die Bodenstation gesendet werden. Weiters wurde ein Standard Raspberry Pi 1080p Kameramodul über Flachbandkabel an den Raspberry angebunden. Damit konnte neben den Telemetriedaten auch ein Videobild über den LTE-Datenlink an die Bodenstation gesendet werden.

5.2.3.5 Testsetup 5 – Evaluierung von COTS LTE-Antennen

Bei dieser Messung ging es um die Evaluierung von *Commercial Off-the-Shelf* (COTS) LTE-Antennen für den Einsatz an UAVs, im Speziellen am DEMONA UAV.

Das gesamte DEMONA-UAV ist aus Glasfaser mit Balsaholzverstärkungen gefertigt. Somit hat das Material wenig Einfluss auf die Empfangseigenschaften der verbauten Antennen. Es kamen RCs mit 2,4 GHz und 868 MHz, sowie Mobilfunk zum Einsatz, jeweils mit zwei Antennen, die durch das Gehäuse an der Außenseite des UAVs montiert waren. Es wurden bei Bodentests störende Einflüsse des Funksystems auf die Gesamtleistung festgestellt. Das bedeutet, dass bei Reichweitentests vor dem Start die gewünschte Reichweite nicht erreicht wurde, wenn alle Subsysteme im UAV in Betrieb waren. Daher wurde u. a. ein EMV-Test des Gesamtsystems durchgeführt.

Die zum Einsatz kommende RC-Hardware im 2,4 GHz ISM-Band (siehe Kapitel 4.2 und 5.1.3) war vor allem für den Start und die Landung essenziell. Daher wurde am DEMONA-UAV daraufhin die Anordnung der 2,4-GHz- und 868-MHz-Antennen, die für die RC notwendig sind, optimiert. Eine Steuerung über Mobilfunk sollte nur im Flug erfolgen. Für die Mobilfunk-Datenverbindung wurden kommerzielle *Off-the-Shelf* (COTS) Komponenten eingesetzt. Als Transceiver-Modul wurde ein HUAWEI E3372h LTE-USB-Modem verwendet. Dieses unterstützt alle in Österreich notwendigen LTE-Frequenzen. Das E3372 verfügt über eingebaute Patch-Antennen. Die Werte laut Datenblatt für die Sendeleistung für LTE sind mit Leistungsklasse 3 (23 dBm) [228, S. 10] und für die Empfangsleistung gemäß 3GPP TS 36.101 (R16) [229] angegeben. Laut der verwendeten CAT 4 Technologie unterstützt der LTE USB-Dongle auch 2x2 MIMO.

Um einerseits unerwünschte Wechselwirkungen mit den Nachbarsystemen zu vermeiden und andererseits die Sende- und Empfangsqualität zu verbessern, wurden externe Antennen für das Huawei E3372 verwendet. Dieses Gerät verfügt über zwei CRC9/TS9-Anschlüsse für die Verwendung von zwei externen Antennen (2x2 MIMO ist nur bei Verwendung beider externer Antennen sinnvoll nutzbar). Um zu vermeiden, dass die Antennen direkt dem Luftstrom des UAVs ausgesetzt sind, wurden Glasfaser Schutzabdeckungen gefertigt und eingesetzt. Die LTE-Antennen wurden im ersten Versuch auf der Oberseite des UAVs montiert (Siehe dazu Abbildung 5.4 links unten). Bei LTE werden Cross-Polarisierte Antennen, die -45° polarisiert sind, eingesetzt. Für optimalen Empfang bei Antennen-Diversität sollten die Empfangsantennen daher mit $+45^\circ$ und -45° ausgerichtet sein [230]. Die Anordnung der Antennen war somit nicht optimiert.

Nach erfolgreichen Testflügen mit dem DEMONA-UAV sollte eine Anpassung und anschließend eine Optimierung der Anordnung der LTE-Antennen in Erwägung gezogen werden. Aus diesem Grund wurden geeignete LTE-Antennen in der Hochfrequenz (HF)-Messkammer der FH JOANNEUM vermessen. Aus diesen Erkenntnissen sollte der Gewinn der Antennen analysiert sowie die Anordnung der Antennen optimiert werden. Dazu wurden drei COTS LTE-Antennen in ihrer Empfangs- sowie Sendecharakteristik vermessen. Weiters wurden Antennenanordnungen evaluiert sowie der Einfluss der Schutzhülle auf die Empfangseigenschaften gemessen. Es wurden folgende Antennen verwendet:

Tabelle 5.3: Übersicht der getesteten Antennenmodelle

Antennen Modell	Frequenzbereich	Antennen Verstärkung laut Datenblatt	Maximale Leistung
645 668 SMA	0,8 – 2,6 GHz	2.5 dBi	5.5 W
GXS404 SMA	0,8 – 2,4 GHz	2 dBi	2.5 W
DELOCK 12479	0,7 – 2,7 GHz	3 dBi	5 W

Für die Messkampagne wurden ausschließlich günstige COTS LTE-Antennen verwendet. Aufgrund des günstigen Preises und der hohen Verfügbarkeit war es einfach, diese Modelle zu beschaffen und in weiterer Folge zu testen.



Abbildung 5.19: Delock 12479 (links) [231] und GXS404 (rechts) mit Glasfaser Cover in der Messkammer

Für Messung der Sendeleistung wurden die Antennen in der Messkammer um 360° in 5° Schritten horizontal in drei Metern Entfernung von der Breitband Messantenne montiert und vermessen.

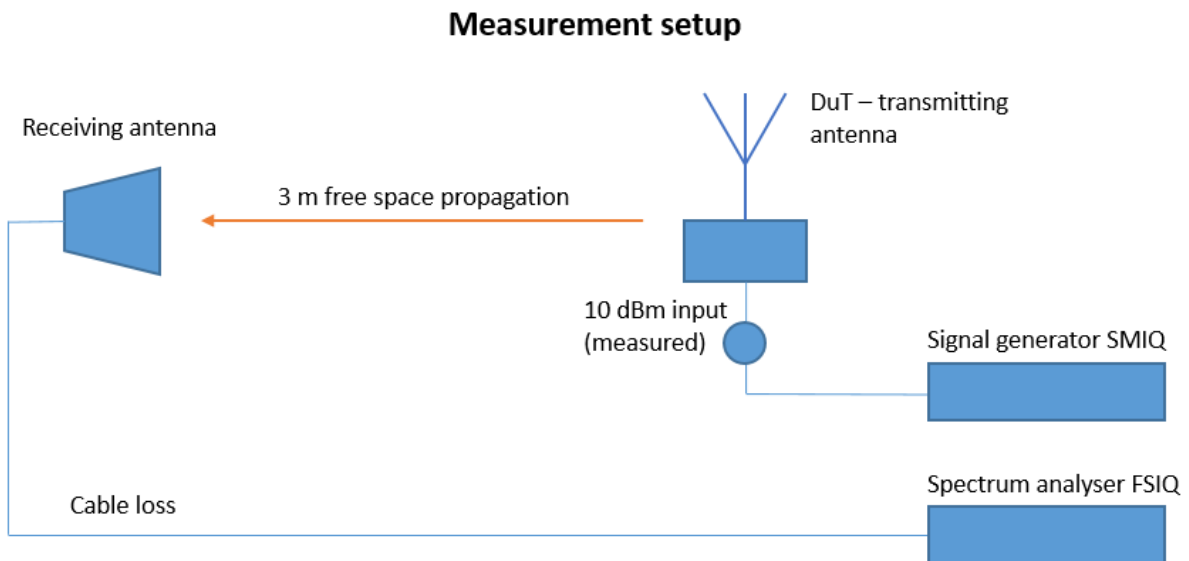


Abbildung 5.20: Anordnung der Antennen in der Messkammer

Mittels eines EMSCAN RFXpert RFX-6 wurde ein Abstrahl-Pattern ermittelt und durch einen Netzwerk-Analyzer RS ZNB8 der Reflexionsparameter S11 gemessen. Die Empfangsleistung wurde mit einem FSIQ26 Spektrum Analyzer ermittelt.

5.2.3.6 Testsetup 6 – Stationäre LTE-Messungen mittels Smartphones

Die Erfassung der Mobilfunk Parameter wurde anhand von Smartphones durchgeführt. Um die Unterschiede der Messergebnisse der Hardware zu erfassen wurden stationäre Messungen durchgeführt.



Abbildung 5.21: Stationäre Messung mit drei unterschiedlichen Smartphones im selben Mobilfunknetz

Dazu wurden idente und Smartphones unterschiedlicher Hersteller aus unterschiedlichen Preissegmenten verwendet und damit in mehrfachen stationären Messungen Daten ermittelt. Dabei wurden die UEs teilweise gleich, teilweise verschieden zum eNodeB (in Abbildung 5.21 rot umrandet) ausgerichtet.

Weiters wurden Messungen mit identen Smartphone-Modellen in gleicher und unterschiedlicher Orientierung durchgeführt, um mögliche Abweichungen hierbei zu dokumentieren.



Abbildung 5.22: Stationäre Messungen mit zwei identen Smartphones im selben Mobilfunknetz in unterschiedlicher und gleicher Ausrichtung

5.2.3.7 Testsetup 7 – Dynamische LTE-Messungen mittels Smartphones

In dieser Messkampagne wurde eine Vielzahl an dynamischen Messungen mittels zweier identer Smartphones durchgeführt. Die Messdaten wurden dabei mit zwei Smartphones des Modells Mi A2 Lite der Firma Xiaomi und der App G-Net Track Pro erfasst. Dieses Modell unterstützt alle europäischen LTE FDD-Frequenzbänder bis CAT 6 Standard. Die Smartphones wurden dazu einerseits im Leichtflugzeug Ikarus C42 oder in kleinen UAVs wie dem X8 oder dem Skywalker 1800 mitgeführt.

Für die Testflüge mit den UAVs wurden Mobilfunkstationen im ländlichen Bereich gewählt. Dadurch sollten Interferenzen von anderen Mobilfunkbasisstationen vermieden werden. Es wurden spezielle Flugmuster erstellt, um die Abstrahlcharakteristik von Mobilfunkmasten messtechnisch erfassen zu können. Dazu wurde mit der Firma DIMETOR eine Kooperation im Rahmen des Forschungsprojekts FIT4BA eingegangen. Gemeinsam wurden Flugrouten um Basisstationen entworfen, die anhand von Wegpunkten in den Autopiloten programmiert wurden. Bei den UAV Messflügen musste der Start und die Landung manuell durchgeführt werden. Ab einer sicheren Flughöhe übernahm der Autopilot und folgte den zuvor programmierten Wegpunkten autonom. Für die Durchführung der Flüge wurde eine Klasse 1 Kategorie A Zulassung erworben sowie eine spezielle Drohnenversicherung abgeschlossen (siehe dazu Kapitel 2.1). Die Firma DIMETOR [232] führte dabei selbst Auswertungen der seitens der FH JOANNEUM gewonnen Messdaten durch und stellte Ergebnisse zur Evaluierung bereit.



Abbildung 5.23: Messdatenerfassung mittels Smartphones in UAVs sowie dem Leichtflugzeug Icarus C42 (rechts oben)

FIT4BA ist ein von der Forschungsfördergesellschaft Österreichs (FFG) gefördertes Projekt mit dem Titel „Big Data Analytics & Artificial Intelligence Research Center“ [233]. An der FH JOANNEUM wurden mit den aus den Testflügen akquirierten Daten im Rahmen des Projekts Datenanalysen durchgeführt. In weiterer Folge wurde in einer Kooperation mit der TU Graz mit Hilfe Neuronaler Netzwerke ein Prädiktion-Algorithmus für die Signalqualität erstellt.

5.2.3.8 Testsetup 8 – Dynamische LTE-Messung mit spezieller Software

Im letzten Testsetup wurde auf eine spezielle Software für die Datenakquise gesetzt. Mittels einer auf Mobilfunkevaluierung konzeptionierten Messapplikation der Firma Azenqos konnte man den automatischen Wechsel des Mobilfunkmodems im UE zu einer anderen Zelle verhindern. Um diese Software einzusetzen brauchte es ein gerootetes Smartphone mit guter Rechenleistung. Für diese Messung wurde seitens der Firma DIMETOR ein OnePlus 7 Smartphone mit der vorinstallierten Azenqos App bereitgestellt. Mit dieser Hard- und Software war es möglich, die Freiraumdämpfung (Free Space Path Loss, FSPL) zu messen. Aus diesem Grund wurde für diese Messung eine Sendestation in der Südsteiermark ausgewählt, deren Umgebung möglichst keine Reflexionen verursacht. Der eNodeB war auf dem Silo eines Bauernhofs montiert und die Messung erfolgte entlang eines ebenen leeren Feldes. Somit konnte die Abstrahlcharakteristik der Hauptsendekeule untersucht werden.

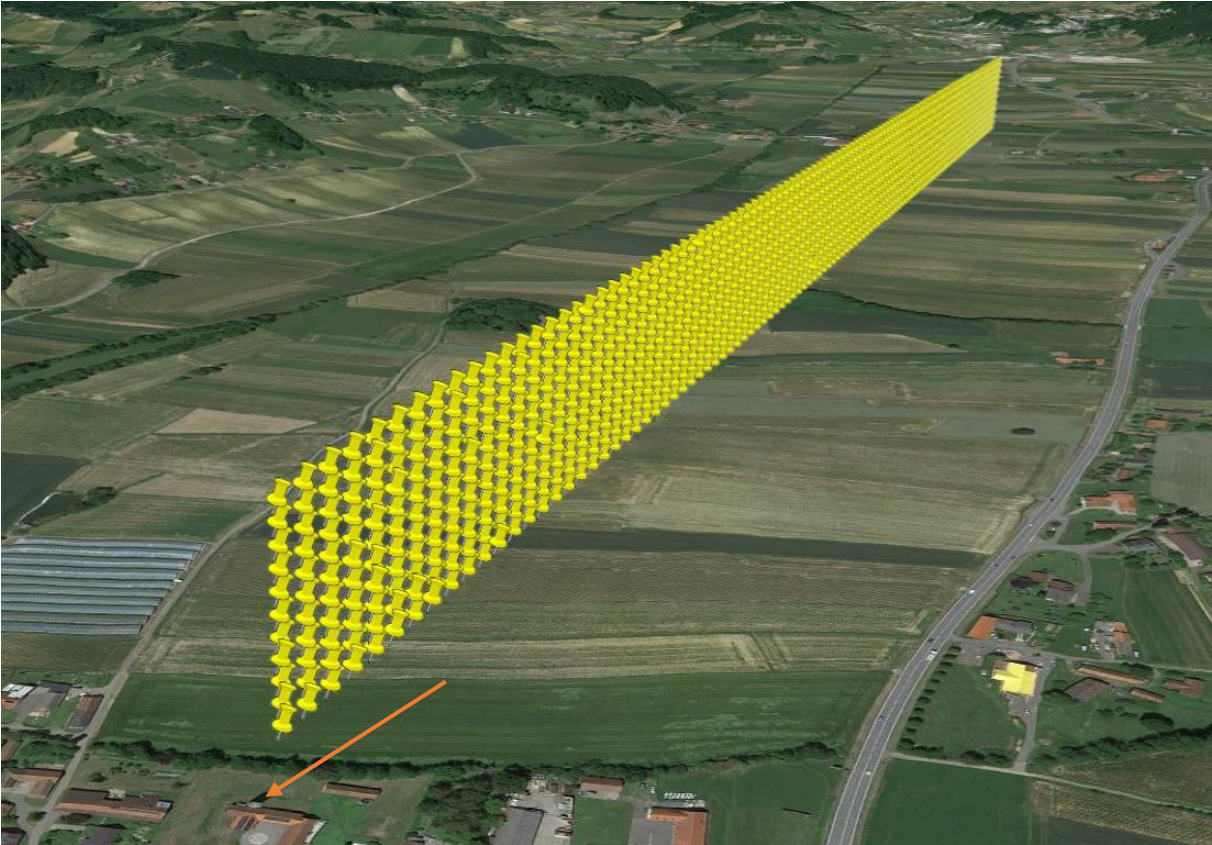


Abbildung 5.24: Testflugpfad für die Messung der Freiraumdämpfung einer Basisstation (Standort bei Pfeilspitze)

Tabelle 5.4: Zusammenfassung der unterschiedlichen Testsetups

Testsetup	Eingesetzte Hard- und Software	Erfasste Daten	Tests
#1	<ul style="list-style-type: none"> Raspberry Pi 3 E303 UMTS USB-Dongle Linux basierter Server (Ubuntu 18.04) Windows PC 	<ul style="list-style-type: none"> Über Linux Skripte erstellte Logfiles 	<ul style="list-style-type: none"> Allgemeiner Funktionstest – Reverse Tunnel UMTS RSSI UMTS Latenzen
#2	<ul style="list-style-type: none"> 4G fähiges Smartphone (Xiaomi Note 4) G-Net Track Pro (App) 	<ul style="list-style-type: none"> Logfiles (G-Net App) KML Files (G-Net App) 	<ul style="list-style-type: none"> LTE-Empfangsstärke und Empfangsqualität LTE-Band
#3	<ul style="list-style-type: none"> LoRa Modul Arduino Raspberry Pi 	<ul style="list-style-type: none"> Über Linux Skripte erstellte Logfiles 	<ul style="list-style-type: none"> LoRa Reichweitentest
#4	<ul style="list-style-type: none"> Raspberry Pi 3 2x ZTE MF831 USB-Dongle Linux basierter Server Windows Laptop 	<ul style="list-style-type: none"> Über Linux Skripte erstellte Logfiles 	<ul style="list-style-type: none"> Langzeitmessungen Latenzmessungen
#5	<ul style="list-style-type: none"> COTS LTE-Antennen 	<ul style="list-style-type: none"> Prüfprotokoll 	<ul style="list-style-type: none"> Sende- und Empfangscharakteristik
#6	<ul style="list-style-type: none"> 4G fähige Smartphones (Xiaomi, Samsung, Ulefone) 	<ul style="list-style-type: none"> Logfiles (G-Net App) 	<ul style="list-style-type: none"> Stationäre Messungen, um Unterschiede zwischen Modellen festzustellen
#7	<ul style="list-style-type: none"> 4G fähiges Smartphone (Xiaomi Redmi 5 Plus, Xiaomi A2 lite) G-Net Track Pro (App) 	<ul style="list-style-type: none"> Logfiles (G-Net App) KML Files (G-Net App) 	<ul style="list-style-type: none"> Durchführung von speziellen Flugpattern zur Analyse der Sendecharakteristik von eNodeBs
#8	<ul style="list-style-type: none"> 4G fähiges Smartphone (OnePlus 7) Azenqos 	<ul style="list-style-type: none"> Logfiles (Azenqos) 	<ul style="list-style-type: none"> Durchführung von speziellen Flugpattern zur Evaluierung des Signal-Fadings eines speziellen eNodeB

5.2.4 Setup der Testsznarien

Als Hard- und Software kamen bei der gesamten Evaluierung COTS-Komponenten zum Einsatz. Um eine fundierte Aussage über die erfassten Parameter zu treffen wurde deshalb, auch zur Erfassung der Messwerte, ebenfalls COTS-Hardware eingesetzt. Erfahrungen aus absolvierten Forschungsprojekten deuteten bereits auf eine grundlegende Funktionalität von Mobilfunk für UAVs hin. Die Testsetups wurden so im Laufe dieser Untersuchungen stetig verbessert und vertieft. Die gesamte Evaluierung lässt sich so in **fünf verschiedene Szenarien** einteilen. Um die Mobilfunk-Messgrößen einschätzen zu können, wurde bei **TestszENARIO #1** mit Tests am Boden begonnen. Mit dem *Testsetup 1* wurden dafür mehrere Testfahrten mittels PKWs durchgeführt. Eine etwa 13 km lange Strecke in der Stadt wurde wiederholt abgefahren, um Messdaten zu erfassen. Dabei konnten die ersten Erkenntnisse

zum Mobilfunknetz der dritten Generation (UMTS) gesammelt werden. Der nächste Schritt war die Erfassung erster Messwerte in der Luft. Dazu wurden bei den ersten Flug-Versuchen Messungen mit den *Testsetups 1* und *2* in einem X8 UAV (siehe Abbildung 3.5) absolviert. Um auch einen Eindruck der Mobilfunkempfangsqualität in größeren Höhen zu bekommen, wurden Testflüge mit einem Leichtflugzeug in der Steiermark durchgeführt. Mit einem Ikarus C42 (siehe Abbildung 5.25) wurden dabei großräumige Testflüge über ländlichem Gebiet vom Flugplatz Weiz-Unterfladnitz (Code LOGW) absolviert.



Abbildung 5.25: Das Leichtflugzeug Ikarus C42 wurde für großflächige Messdatenakquise im Raum Steiermark bis Slowenien eingesetzt

In den im Kapitel 5.1 vorgestellten Forschungsprojekten zeigte lediglich die LoRa Technologie ausreichend Potential für den Einsatz als Backup-Datenlink. Aus diesem Grund wurde auch diese Technologie einerseits am Boden zu Fuß und im PKW sowie andererseits in der Luft mit der Ikarus C42 getestet.

Für das **Testszenario #2** wurden mit dem *Testsetup 4* anfangs Flugversuche mittels einer Direkt-Steuerung über das LTE-Mobilfunknetz erprobt. Dazu wurde ein UAV der Marke Easystar mittels des Raspberry Pi samt Servo Shield ausgestattet, wie in Abbildung 5.26 links zu sehen. Am Laptop wurde der Joystick angesteckt und entsprechend kalibriert, dass die Joystick-Bewegungen in eine entsprechende Ansteuerung der Servos sowie des Motors umgesetzt wurden. Das UAV wurde für den Start geworfen und dann versuchte der Pilot das UAV mittels des Joysticks zu steuern.



Abbildung 5.26: Vorbereitung eines Easystar-UAVs für den LTE-Direktflug und Start des X8-UAVs für den Fly-by-Wire Flug

Da die Direktsteuerung zu keinen zufriedenstellenden Ergebnissen führte, wurden weitere Versuche mit dem um den NAVIO2 erweiterten *Testsetup 4* durchgeführt. Dazu wurde ein X8 UAV verwendet, in dem der NAVIO2 als Flugregler integriert wurde. Durch den Einbau des FCS hatte man die Möglichkeit, das UAV einerseits manuell mittels RC sowie über einen Fly-by-Wire Modus des NAVIO2 zu steuern. Es wurden somit die 2,4 GHz Futaba RC als Sender und ein zur RC passender Empfänger sowie ein LTE USB-Dongle als Datenlink verwendet. Die RC wurde als primäre Steuerung und der LTE-Datenlink als Telemetrie-Link eingesetzt. Das UAV wurde, wie in Abbildung 5.26 rechts zu sehen, gestartet und mittels RC in eine Höhe von etwa 50 Meter AGL gebracht. Der Pilot führte einen Trimm durch, das bedeutet, die Quer- und Höhenruder des UAVs werden durch Eingaben über die RC fein eingestellt, damit das UAV ruhig geradeaus fliegt, wenn man den Steuerknüppel der RC nicht anfasst. Dann wurde über GCS Software Mission Planner per Mausklick die RC deaktiviert und gleichzeitig die Steuerung aktiviert. Dabei übernahm die GCS-Software die Eingaben des Joysticks und übermittelt diese als Lageänderung an das UAV. Die Lagesensorik des FCS sorgte dabei für eine stabile Fluglage. Mittels Eingaben über den Joystick konnte das UAV so über das LTE-Mobilfunknetz gesteuert werden. Diese Art der Steuerung wird als Fly-by-Wire Steuerung bezeichnet, da man als Pilot hierbei nur noch die Lageänderung vorgibt und die Umsetzung, also die PWM-Signalansteuerung der Servos, automatisiert über den Flugregler durchgeführt wird.

Um die Steuerung zu erleichtern – und auch im Hinblick auf einen möglichen BVLOS Einsatz – wurde weiters an der Spitze des X8 UAVs eine Kamera montiert. Mittels der Open Source Software GStreamer wurde so ein Livebild über das Raspberry Pi Kameramodul in HD-Auflösung 720p mit 15 Frames ebenfalls an die Bodenstation übertragen. Auf dem Laptop, der als Bodenstation diente, konnte man so wiederum mittels GStreamer und der Open Source Software VLC Player den Live-Videostream des X8 anzeigen.

Um die Empfangsqualität des *Testsetup 4* zu verbessern, sollten externe Antennen für die LTE USB-Dongle von Huawei und ZTE zum Einsatz kommen. In **Testscenario #3** wurden deshalb COTS LTE-Antennen besorgt, die einerseits einen passenden TS-9 Anschluss für die Dongle aufwiesen und in weiterer Folge an einem UAV montierbar waren. Die teils spärlichen Angaben zu den Parametern der Antennen sollten messtechnisch überprüft werden. Aus diesem Grund

wurden in einer Messkampagne die Sende- und Empfangseigenschaften von drei COTS LTE-Antennen in der HF-Messkammer der FH JOANNEUM vermessen.

Da anstatt professionellem Messequipment die Daten mittels Smartphones akquiriert wurden, sollten auch Abweichungen bei der Datenerfassung untersucht werden. Es galt festzustellen, ob baugleiche Modelle in gleicher Orientierung in geringem Abstand zueinander z.B. die gleichen Signalstärken aufzeichnen. Für **TestszENARIO #4** wurden daher in weiteren Tests einerseits die gleichen und auch unterschiedliche Smartphone Modelle aus unterschiedlichen Preisklassen in unterschiedlichen Anordnungen (gleich oder unterschiedlich orientiert) erfasst.

Die meisten Messdaten wurden in **TestszENARIO #5** in Kooperation mit der Firma Dimetor mit dem Setup #7 und #8 erfasst. Dazu wurden mit dem Skywalker 1900 (siehe Abbildung 3.4) unterschiedliche, mit der Partnerfirma abgestimmte Flugrouten rund um möglichst isolierte Mobilfunkstationen in ländlicher Umgebung durchgeführt. Damit sollte anhand der Messwerte die Abstrahlcharakteristik der Mobilfunkmasten erfasst und verifiziert werden. Dazu wurden in Kooperation mit der Partnerfirma Messkampagnen geplant und für die UAV Piloten Flugrouten ausgearbeitet. Anschließend wurden seitens der Piloten die Routen in der GCS-Software programmiert.



Abbildung 5.27: Planung der UAV Flugrouten für einen speziellen Mobilfunkmast

In Abbildung 5.27 ist eine Ausarbeitung für eine Messkampagne für einen Mobilfunkmasten zu sehen. Dabei musste vor den Messungen vor Ort über eine stationäre Messung mit dem UE überprüft werden, ob das Smartphone am richtigen Mobilfunkmasten, dessen Sendecharakteristik vermessen werden sollte, angemeldet war. Da jeder LTE-Sektor eine eindeutige Identifikation, den ECGI Wert, hat, mussten diese Werte vor den Messungen überprüft und anschließend mit den aufgenommenen Messwerten abgeglichen werden.

Um die Freiraumdämpfung zu untersuchen wurde seitens der Partnerfirma eine spezielle Software (Azenqos) sowie ein spezielles gerootetes Smartphone (Oneplus 7) bereitgestellt. Damit wurden an einem isolierten Mobilfunkmasten spezielle Flugrouten absolviert. Dabei wurden beispielsweise Flüge genau entlang der Hauptsendekeule in verschiedenen Höhen durchgeführt. Die Applikation sorgte dafür, dass das Smartphone sich nicht umbuchte und somit laufend nur die Messwerte der einen Zelle aufgenommen wurden.

Tabelle 5.5: Übersicht der Testszenarien für die zuvor definierten Testsetups

Testszenario	Dazugehöriges Testsetup	Durchgeführte Tests	Durchführungsart sowie eingesetzte Objekte
#1	1, 2, 3	<ul style="list-style-type: none"> • Allgemeiner Funktionstest – Reverse Tunnel • UMTS RSSI • UMTS Latenztests • LoRa Reichweitentests 	<ul style="list-style-type: none"> • Bodentests innerstädtisch mittels PKW • Flugtests mittels X8 UAV am Modellflugplatz Weiz • Flugtests mit dem Ikarus C42 innerhalb der Steiermark
#2	2, 4	<ul style="list-style-type: none"> • LTE-Empfangsstärke (RSRP) und Empfangsqualität (RSRQ) • LTE Latenztests • Einsatz von Mobilfunk als primärer Datenlink (Direktsteuerung), als sekundärer Datenlink für Telemetrie sowie zur Steuerung mittels Joysticks (Fly-by-Wire) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bodentests innerstädtisch mittels PKW • Flugtests am Modellflugplatz Weiz mittels der UAV Modellen X8 und Skywalker 1900 • Flugtests mit dem Ikarus C42 innerhalb Österreichs und Slowenien
#3	5	<ul style="list-style-type: none"> • Vermessung COTS LTE-Antennen 	<ul style="list-style-type: none"> • HF-Messkammer der FH JOANNEUM
#4	6	<ul style="list-style-type: none"> • Stationäre Messungen, um Unterschiede zwischen Modellen festzustellen 	<ul style="list-style-type: none"> • Bodentests innerstädtisch
#5	7, 8	<ul style="list-style-type: none"> • Durchführung von speziellen Flugpattern zur Analyse der Sendecharakteristik von eNodeBs 	<ul style="list-style-type: none"> • UAV Flüge an verschiedenen Standorten Skywalker 1900 in der Steiermark sowie Niederösterreich

6 Auswertung und Verifizierung der Messergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der in Tabelle 5.4 angeführten Testszenarien beschrieben. Dazu werden eingangs Analysen und Evaluierungen der Testdaten präsentiert, sowie anschließend eine Verifikation dieser erläutert. Da nicht alle Auswertungen hier angeführt werden können, da es den Rahmen der Arbeit sprengen würde, sind ergänzende Plots in Anhang B angehängt.

6.1 Zusammenfassung der Messdaten aus den Testszenarien

Ausgehend von **Testszenario #1** wurden die Empfangseigenschaften von UMTS am Boden und in der Luft anhand des *Testsetup 1* gemessen. Für die Bodentests wurde eine etwa 13 km lange Strecke mehrfach mittels PKWs befahren und die Messdaten erfasst. Die Streckenführung ist in Abbildung 6.1 zu sehen.

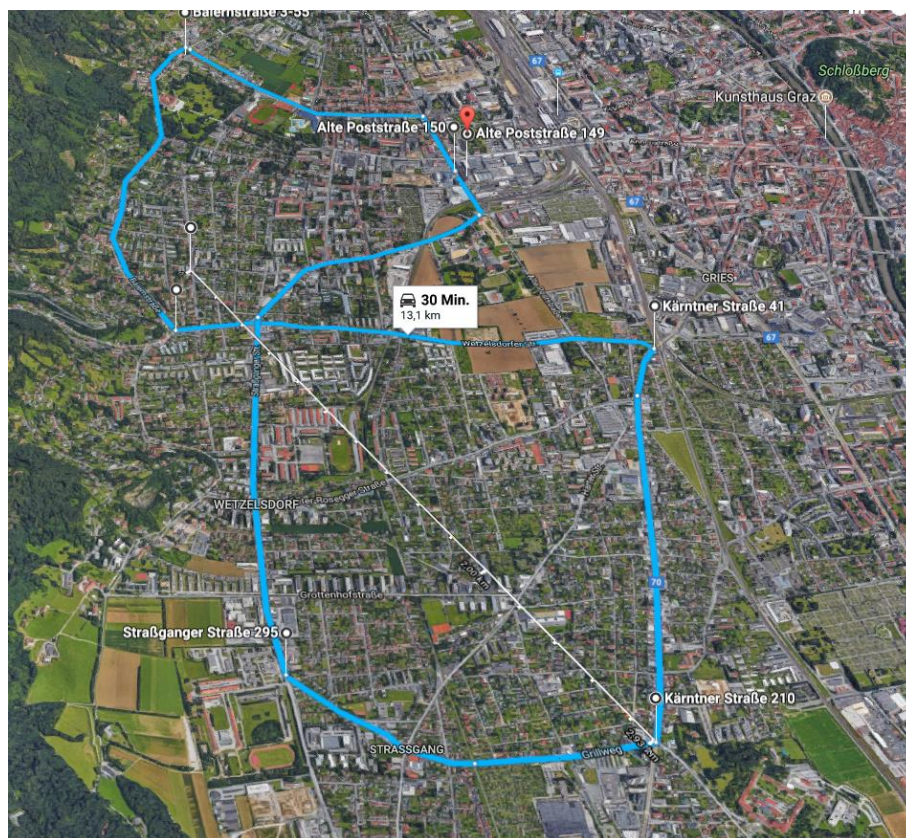


Abbildung 6.1: Testroute für die UMTS-Latenz- sowie RSSI-Messung

Die erfassten Daten beinhalteten den RSSI Wert, Latenzzeiten über Ping-Abfragen des Google DNS Servers 8.8.8.8, Positionsdaten über GPS sowie Datentransfertests. Während der ersten Tests am Boden entlang der in Abbildung 6.1 gezeigten Strecke wurde auch das Umbuchungsverhalten, also das Wechseln der Mobilfunkbasisstationen (Cell) miterfasst. Dies

6.1 Zusammenfassung der Messdaten aus den Testszenarien

wurde anhand einer Abfrage der aktiven Cell-ID festgestellt. Jede Sendestation hat eine eindeutige Cell-ID Nummer. Es gibt leider keine öffentliche aktuelle Datenbank, über die man die Lage einfach bestimmen kann. Das Finden der Basisstationen musste dabei über Umwege erreicht werden. Ausgehend von der vom BMVIT bereitgestellten Webseite <https://www.senderkataster.at/> [234] bekommt man veraltete Informationen über die Lage vieler Mobilfunkstationen, unabhängig von den Betreibern. Es werden, wie in Abbildung 6.2 zu sehen, bei Mouseover über einen Punkt, lediglich Informationen über den Funkdienst, die Protokolle und die Gesamtsendeleistung angegeben.

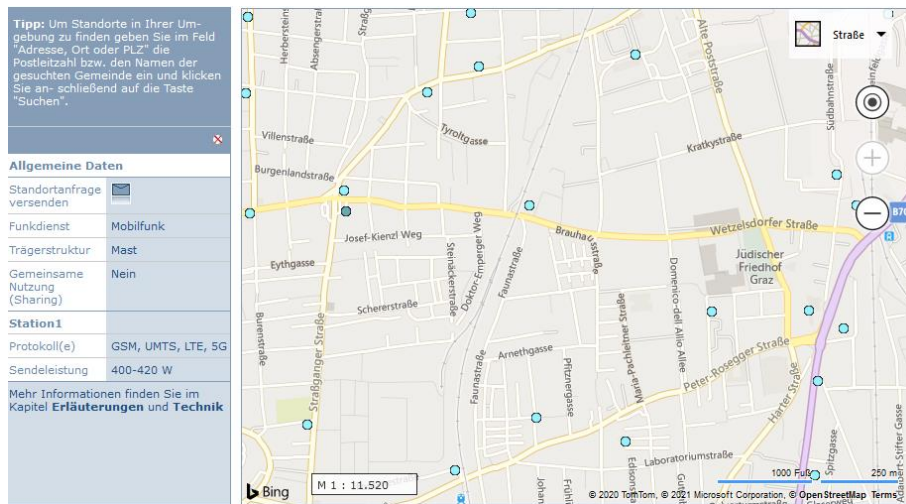


Abbildung 6.2: Auszug aus dem Senderkataster [234]

Für nähere Informationen muss man sich offener Online-Datenbanken wie OpenCellid [235] bedienen. Dabei gibt man in die Suchmaske die Betreiberinformation (MCC und MNC Nummern) sowie die aus den Messungen erhaltenen Werte ein. Damit bekommt man meist ein Ergebnis angezeigt, sofern die Station in der Datenbank hinterlegt ist.

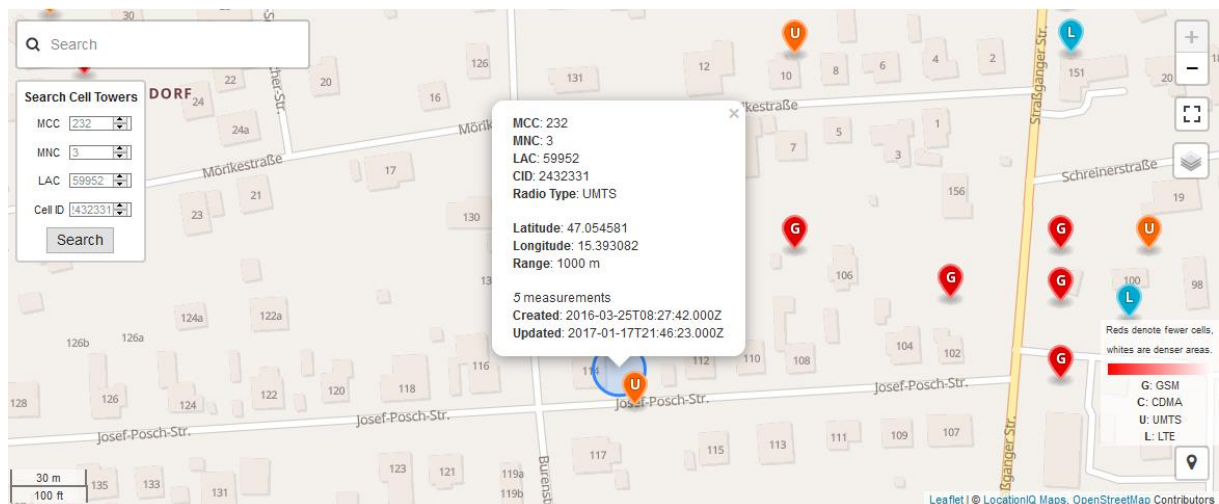


Abbildung 6.3: Mit OpenCellid kann die ungefähre Position der Zelle bestimmt werden [235]

Die Positionsdaten auf OpenCellid entstehen aufgrund von Messungen und deren Eingabe in die Datenbank der Webseite. Daraus wird über eine Peilung der ungefähre Standort der Zelle ermittelt. Um nun den physischen Standort zu bestimmen, kann man mit den Informationen

vom Senderkataster und OpenCellid mittels Google Earth die Antennen auf der Karte suchen und kann damit relativ genau die Position der Zelle bestimmen.

Bei den Messungen wurde festgestellt, dass es innerstädtisch auf der Teststrecke maximal drei Handover-Szenarien gab, und das verteilt auf drei Mobilfunkstationen. Die Position der Sendestationen wurde über die zuvor beschriebenen Schritte bestimmt. Somit konnte die größte Entfernung zu einer Basisstation berechnet werden, die dabei 4,2 km betrug. Dies deutet nach Tabelle 4.6 auf eine Makrozelle hin. Bei allen Testfahrten war der UMTS USB-Dongle auf einen der in Abbildung 6.4 zu sehenden Stationen eingelogged.



Abbildung 6.4: Entlang der Teststrecke buchte sich der Testcluster auf drei Mobilfunkstationen ein [235]

Für die Messung der Empfangsqualität wurden die über die seriellen AT-Kommandos vom UMTS-Modem erhaltene Cell Signal Quality (CSQ) Werte erfasst und in Abbildung 6.5 und Abbildung 6.6 ausgewertet. Die Umrechnung der CSQ Werte wird laut AT Commands Reference Guide [236] einfach über Formel (24) für GSM und UMTS gleichermaßen berechnet. Für ASU wird der gemeldete CSQ Wert eingesetzt. Somit entspricht CSQ 0 dem schlechtesten Empfang von -113 dBm und CSQ 31 dem Besten, -51 dBm.

Die Skalierung der Grafiken ist nicht gleich, daher muss man darauf speziell achten. Auffallend ist, dass innerstädtisch der CSQ Wert und damit der RSSI nie unter -79 dBm gefallen ist, was laut ASU Tabelle im Anhang einem guten Empfang entspricht und Datenraten bis 7,2 MBit/s über HSDPA ermöglicht. Die Flugtests zeigen eine Streuung der Messwerte über den gesamten RSSI Bereich vom besten bis zum schlechtesten Wert. Im Mittel war der UMTS-Empfang in niedrigen Höhen kleiner 100 m AGL besser als beim Streckenflug in größeren Höhen ab 200 m AGL.

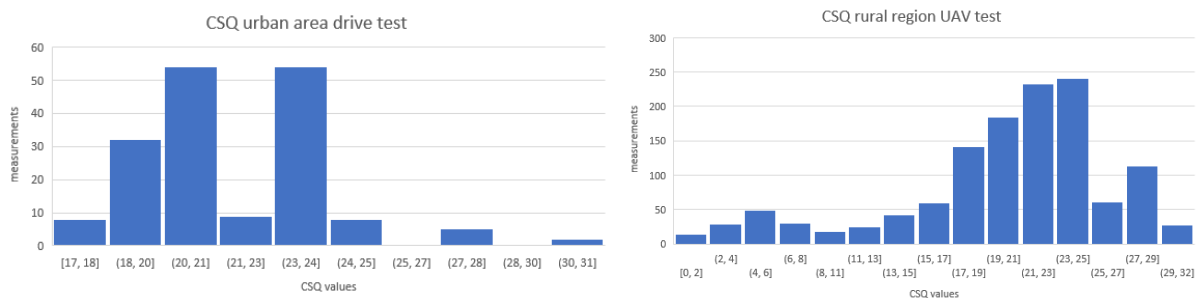


Abbildung 6.5: UMTS CSQ-Messergebnisse aus PKW- (links) und UAV-Tests (rechts)

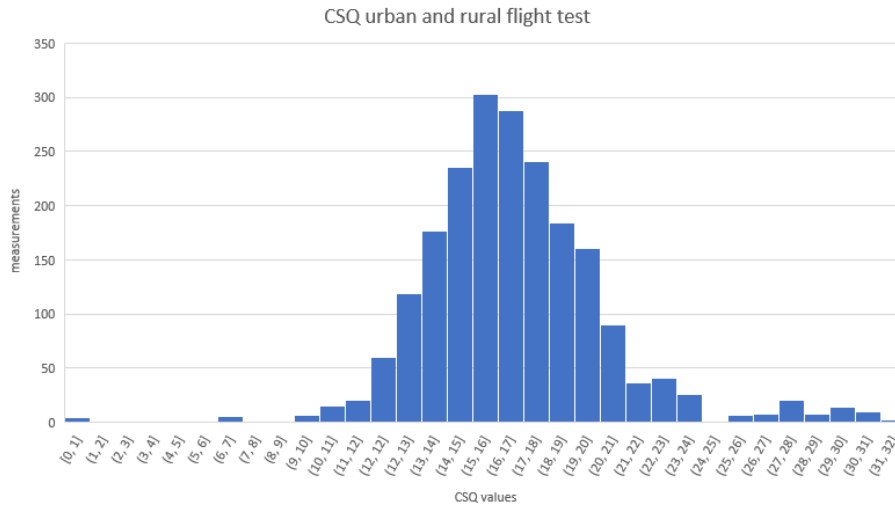
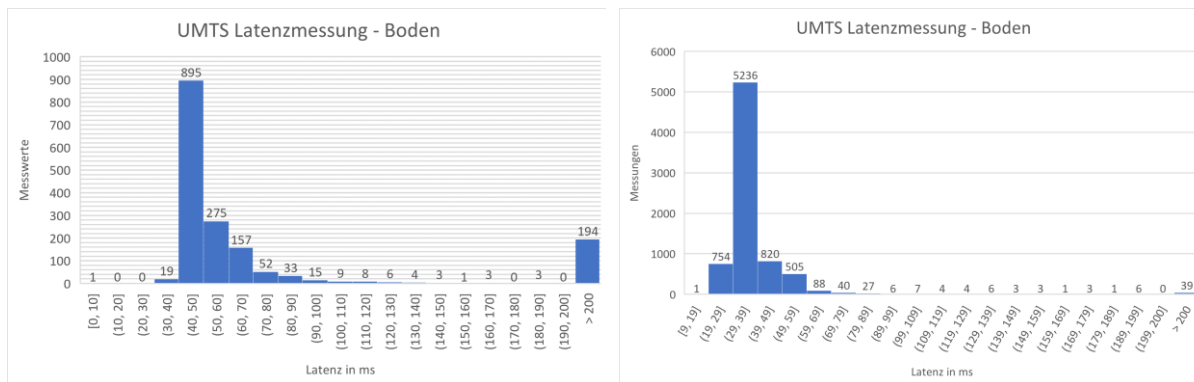


Abbildung 6.6: Großräumiger UMTS Empfangstest mit dem Leichtflugzeug

Um die Latenzen einschätzen zu können, wurden einfache Ping-Tests durchgeführt. Der Ping-Befehl selbst dient als Netzwerkwerkzeug, um zu überprüfen, ob ein bestimmter Netzwerkhost erreichbar ist. Dabei wird ein Anfrage-Datenpaket ausgesendet und, sofern der Host erreichbar ist, augenblicklich zurückgeschickt. Die dabei angezeigte Ping-Zeit beschreibt einerseits die entfernungsabhängige elektrische Signallaufzeit und die Bearbeitungszeit in der Hardware (z.B. Router). Es ergibt eine Einschätzung über die allgemeine Signallaufzeit. Diese Tests wurden mehrfach bei den Testfahrten am Boden durchgeführt und es ergaben sich abweichende Ergebnisse. Zwei Auswertungen sind in Abbildung 6.7 dargestellt. Dabei erkennt man einerseits, dass ein Großteil der Ping-Anfragen mit einer Latenz unter 50 ms beantwortet wurde, es auch Datenpakete gibt, die über eine Sekunde für eine Antwort benötigen oder sogar verloren gingen. Die übliche Latenz bei UMTS liegt laut [237] bei 60 bis 100 ms, somit zeigen die Messungen eine gute Performance des UMTS-Netzes in der Stadt.



UMTS Mobilfunknetz bleibt. Der Farbverlauf in Abbildung 6.9 geht von grün über gelb, bis rot und entspricht dabei gutem bis schlechtem Empfang.

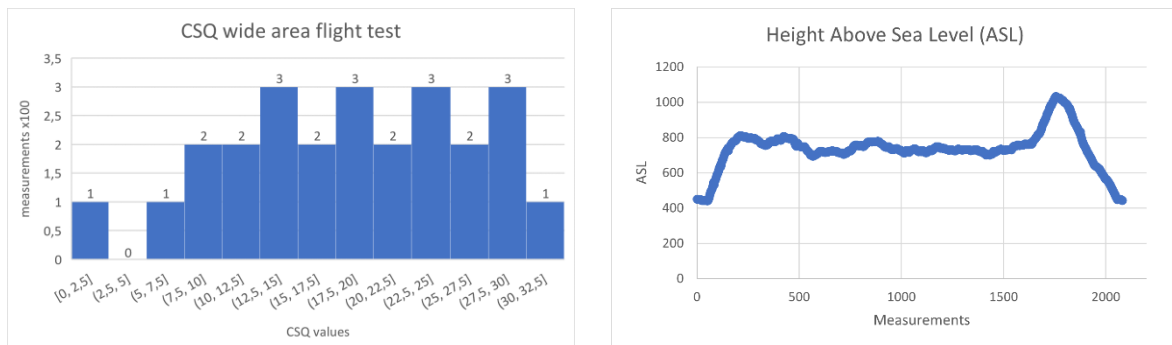


Abbildung 6.8: CSQ Werte und Höhenprofil über dem Meeresspiegel des Fluges

Die gemessenen RSSI Werte wurden zur Vergleichbarkeit mit der Formel (24) in CSQ (entspricht ASU) umgerechnet und der Verlauf ist in Abbildung 6.9: Farblicher Verlauf der UMTS Empfangsqualität mit Handover links dargestellt. Ein Verlauf der Flughöhe ist rechts zu sehen. Die blauen Markierungen zeigen Handover-Szenarien an. Das bedeutet, dass an jeder dieser Stellen seitens des UEs erst evaluiert wird, ob ein anderer Träger gewählt werden soll (Reselection), bevor eine andere Zelle gewählt wird (Handover). Insgesamt kam es bei ca. 100 Cell-Reselections Events zu 14 Handover-Ereignissen.

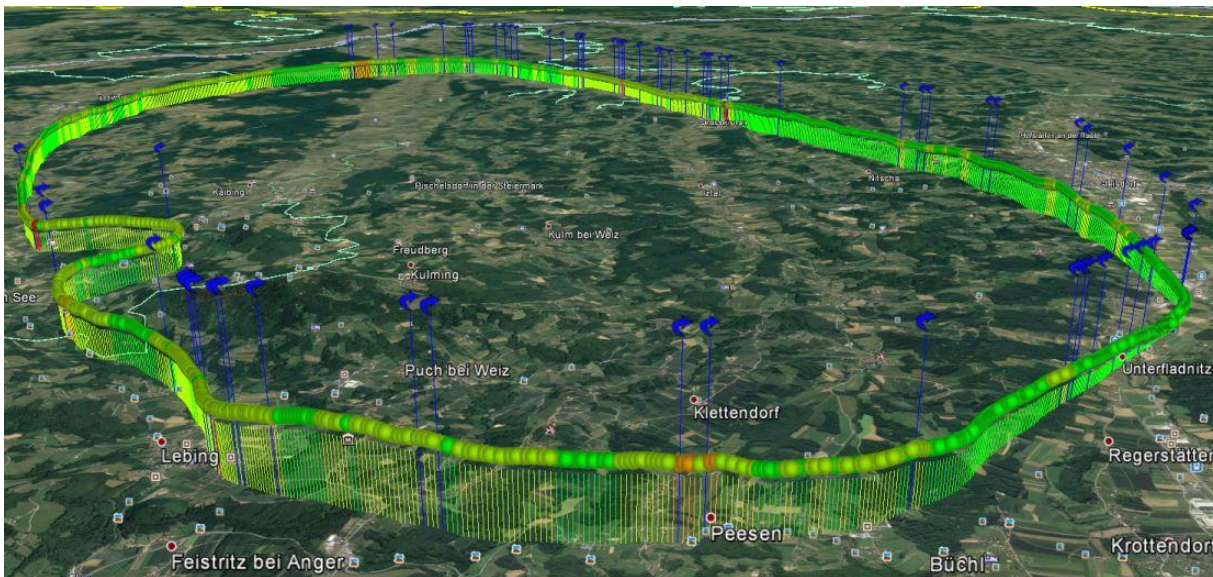


Abbildung 6.9: Farblicher Verlauf der UMTS Empfangsqualität mit Handover

Die Signalqualität während des Testfluges war größtenteils auf einem guten Niveau. Nur 1,5 % aller gemessenen CSQ-Werte lagen unter dem Wert 10 (schlechter Empfang, HSPA möglich, keine Wetterreserve laut Tabelle im Anhang). Für 0,2 % der Zeit war das UMTS Signal verloren. Das bedeutet, umgerechnet in Zeit, dass für 4 Sekunden des 45-minütigen Testfluges kein UMTS Signal zur Verfügung stand.

Die Empfangseigenschaften von der LoRa Module schließt das **Testszenario #1** ab. Dabei wurden mit den in Abbildung 5.18 aufgeführten LoRa Modulen Reichweitentests am Boden

und in weiterer Folge während des in Abbildung 6.9 angeführten Testflugs durchgeführt. Die Bodentests zeigten, dass innerstädtisch die Reichweite durch Abdeckung von Gebäuden sehr limitiert ist. Der Empfänger wurde dabei in einer Höhe von etwa 15 m über Grund auf der Fensterbank im Freien platziert. Der Sender wurde mittels Akkupack betrieben und entweder zu Fuß oder frei platziert auf dem Armaturenbrett im PKW auf der Testfahrt mitgeführt. Gemessen wurde der SNR Wert des Empfangssignals am Empfänger.

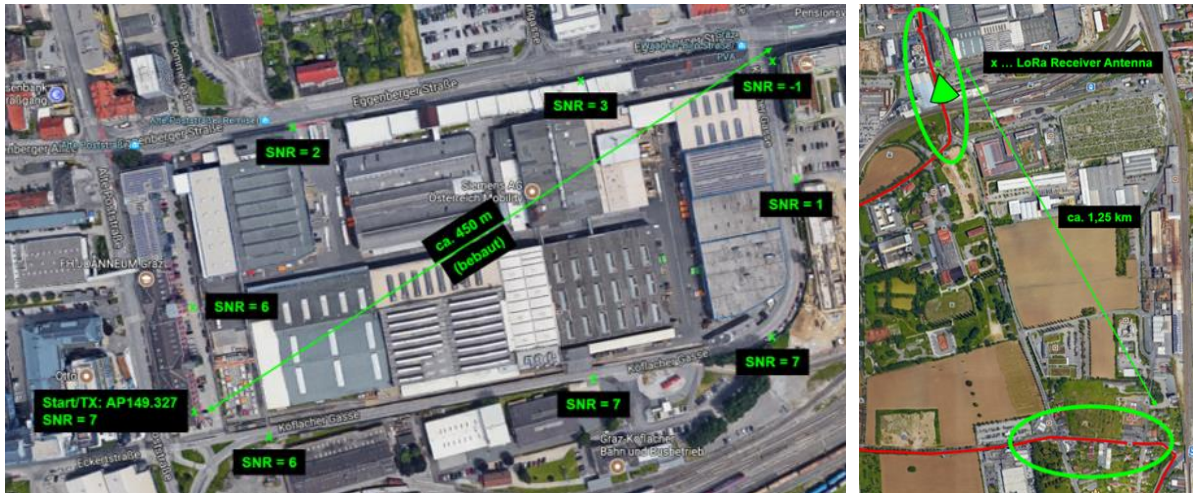


Abbildung 6.10: LoRa Reichweitentests am Boden mit der Libelum LoRa-Hardware

Die größte Entfernung, auf der eine erfolgreiche Übertragung gelang, lag bei knapp über einem Kilometer, das allerdings nur bei direkter Sichtverbindung. Bei Funkabdeckung durch z.B. Gebäude waren Übertragungen nur etwa bis 450 m Entfernung erfolgreich. Während des Flugtests konnten deutlich größere Reichweiten erzielt werden. Der Sender stand dabei am Flugfeld Weiz-Unterfladnitz auf einer freien Fläche und der Empfänger wurde am Armaturenbrett des Icarus C42 platziert. Auffallend war, dass bei Abflug die Verbindung schnell abbrach. Dabei wurde die direkte Sichtverbindung durch das Flugzeug abgedeckt. Die größte Distanz wurde beim Anflug erreicht. Dabei konnten erfolgreiche Übertragungen bis etwa 8 km bei LOS Verbindung erzielt werden.

In weiterer Folge wurden die Messungen rund um das LTE-Mobilfunknetz intensiviert. Dabei lieferte das **Testszenario #2** eine Vielzahl von Ergebnissen. Es wurden anfangs Flüge mit dem Icarus C42 im Raum Steiermark bis Slowenien durchgeführt, um die LTE-Signalqualität im Bereich 150 bis maximal 1000 m AGL zu überprüfen. Eine Visualisierung der Messwerte eines Fluges ist in Abbildung 6.11 zu sehen. Dabei wurden die LTE-Kennwerte RSRP und RSRQ sowie UMTS und GSM Werte mittels der G-Net Track Pro App mit dem Xiaomi Redmi Note 4X Smartphone erfasst und farblich formatiert.

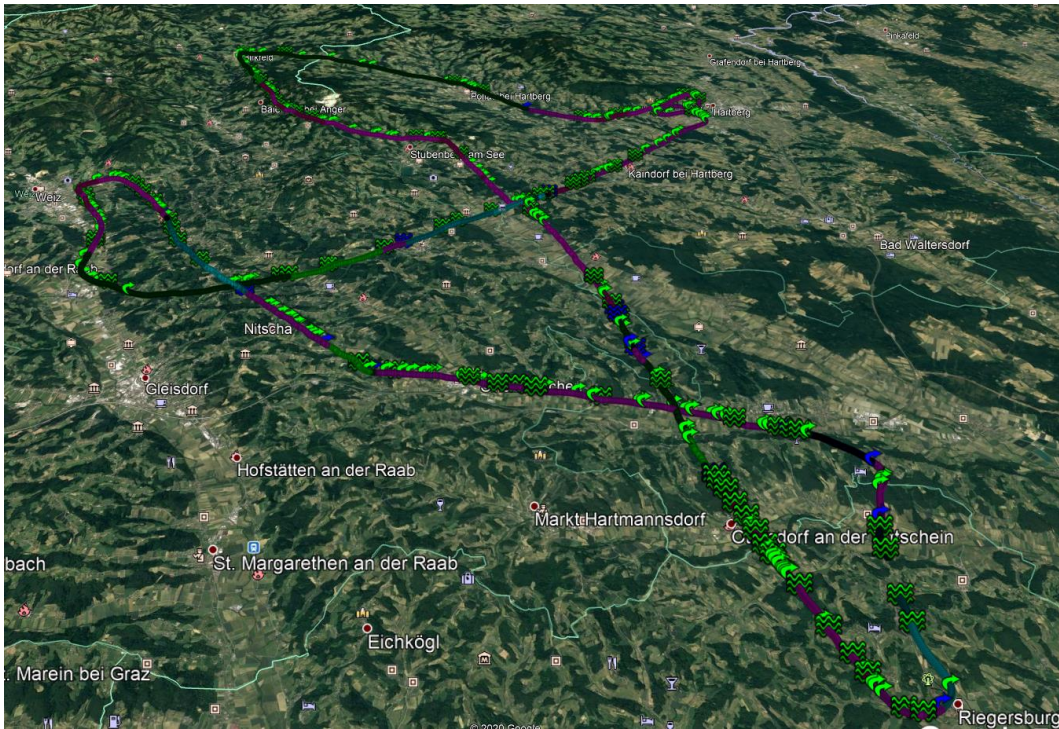


Abbildung 6.11: Großräumiger Testflug mit dem Ikarus C42; grüne Markierungen zeigen Events

Bei diesem Flug erkennt man anhand des Satellitenbildes, dass teilweise über un bebauten hügeligen Gebieten geflogen wurde. Anhand des Höhenprofils erkennt man Flughöhen bis 1400 m über dem Meeresspiegel. Die Durchschnittsgeschwindigkeit war 131 km/h.

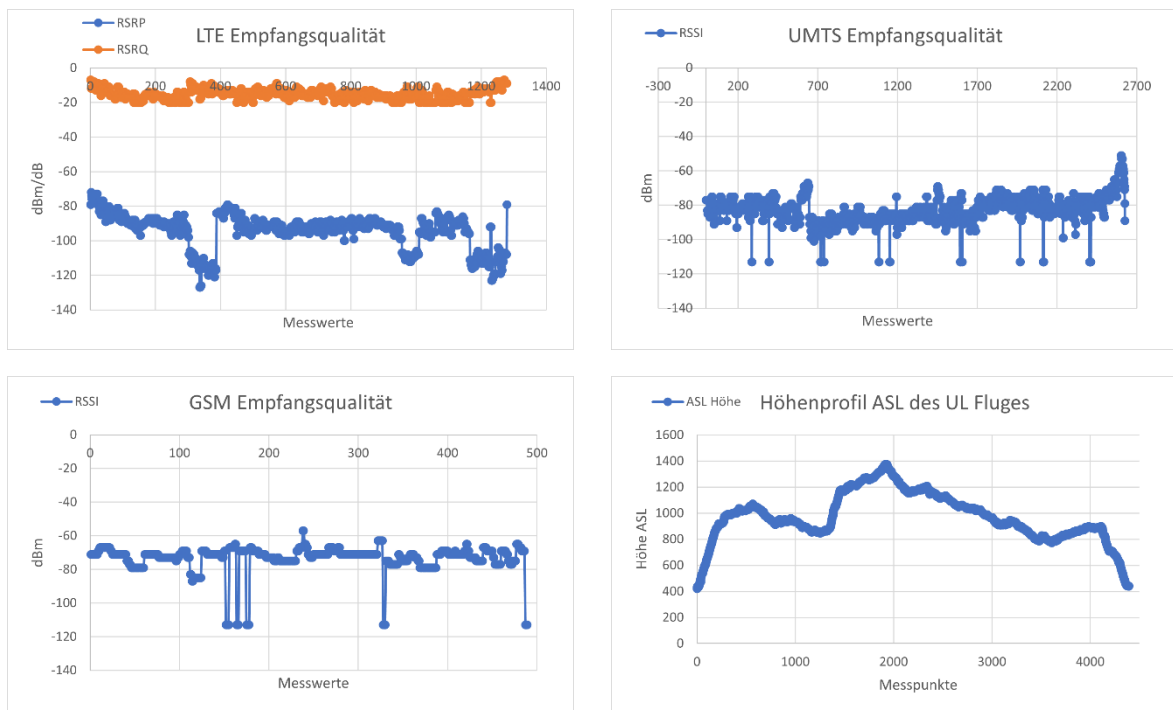


Abbildung 6.12: Übersicht der Signalqualität von LTE (links oben), UMTS (rechts oben), GSM (links unten) sowie die Flughöhe ASL (rechts unten) des Testfluges

Es wird seitens der Mess-App im Schnitt ein Messwert pro Sekunde aufgezeichnet. Dabei ergaben sich über die gesamte Flugdauer von 69 Minuten knapp 4 400 Messwerte. Bei diesem Flug waren häufige Handover-Szenarien festzustellen, was besonders an der ländlichen Region liegt. Bei dieser Messung sollte das Smartphone das LTE Mobilfunknetzwerk bevorzugen. Aufgrund der Topografie wurden die meisten Messwerte (60%) im UMTS-Netz aufgezeichnet, gefolgt von LTE (29%) und GSM (11%). Die Signalstärken sind anhand der Messpunkte in Abbildung 6.12 dargestellt. Eine Übersicht über weitere Statistiken zu dieser Messung ist in Tabelle 6.1 zu sehen.

Während der gesamten Flugzeit war die Empfangsqualität nur für etwa 60 Sekunden unter einem nutzbaren Niveau und für 6 Sekunden in einem sehr schlechten Bereich, was in Relation zur Gesamtflugzeit 1,36% bzw. 0,13% entspricht.

Tabelle 6.1: Messauswertung des Testfluges mit dem Ikarus C42

Mobilfunktechnologie	# Messwerte von gesamt 4395	Signalqualität im Durchschnitt	# Messwerte ohne Empfang
LTE	1279 (29,1%)	RSRP -94,16 RSRQ -15,30	RSRP \leq -131 dBm: 0
UMTS	2626 (59,7%)	RSSI -82,86	RSSI \leq -113 dBm: 43
GSM	489 (11,2%)	RSSI -73,44	RSSI \leq -113 dBm: 17

Anhand der Skalierungen aus Abbildung 5.14 und Abbildung 5.15 , sowie der Tabelle im Anhang entspricht die LTE-Signalqualität einer stabilen Verbindung mit möglichen Schwankungen in der Geschwindigkeit der Datenübertragung. Die durchschnittlichen UMTS und GSM Werte deuten auf eine durchschnittliche stabile Verbindung hin.

In den nächsten Untersuchungen sollten die durchschnittlichen Latenzen der LTE-Verbindung für die Systemarchitektur aus Abbildung 5.5 evaluiert werden. Zur Datenerfassung wurde das *Testsetup 4* verwendet. Bei diesem Aufbau wurde von zwei Endgeräten mit je einem VPN-Tunnel über einen LTE USB-Dongle eine Verbindung zu einem Server hergestellt. Das bedeutet, hierbei muss man mit einer doppelten Latenz rechnen, da der Datenverkehr ausgehend von einem Endgerät über zwei LTE-Datenverbindungen zum zweiten Endgerät geroutet wird. Nach [237] muss man bei LTE allgemein mit Latenzen zwischen 10 und 30 ms rechnen. Es wurden mehrere Tests bis zu einer maximalen Laufzeit von 24 Stunden durchgeführt. Dabei wurde das System zuerst mit und danach ohne externe Antennen in einem Mobilfunknetzwerk eines Providers gemessen. Ein weiterer Test wurde mit externen Antennen sowie je einem Provider je LTE USB-Dongle absolviert. Zum Vergleich wurde auch ein kabelgebundener Test, bei dem alle Geräte über das firmeninterne Netzwerk über LAN miteinander verbunden waren, durchgeführt. Die Endgeräte bekamen jeweils über einen Zeitserver die korrekte Zeit zugewiesen. Die Latenz wurde dann aus der Differenz zwischen Sendezeitpunkt und Empfangszeit gebildet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.2 zusammengefasst.

Tabelle 6.2: Zusammenfassung der stationären LTE-Latenzmessungen

Messwerte	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
Aufbau	LTE USB-Dongle mit internen Antennen	LTE USB-Dongle mit internen Antennen	Mit je 2 externen COTS LTE-Antennen	Mit je 2 externen Antennen und zwei unterschiedlichen Providern	Kabelgebunden über LAN
Mittelwert (ms)	118	119	126	142	20
Minimum (ms)	77	73	75	70	17
Maximum (ms)	1132	1095	661	577	20
Median (ms)	114	115	123	140	20
Ausfälle	0	0	0	97	111
Ausfall gilt ab (ms)	150	150	150	150	150
Laufzeit in h	23	22	24	19	17

Nach Abschluss der Latenzmessungen wurde versucht, ein UAV direkt über Mobilfunk zu steuern. Die Tests fanden am Flugfeld Weiz-Unterfladnitz statt. Anhand der Mittelwerte der Latenzen erschien dies schon vor den Tests als schwieriges Unterfangen. Laut einem Benchmark gängiger 2,4 GHz RCs weisen diese einen durchschnittliche Latenz zwischen 5 bis 45 ms auf [238]. Als Testsetup kam das mit dem NAVIO2 modifizierte *Testsetup 4* zum Einsatz. Der Pilot versuchte, das UAV über den Joystick zu steuern. Nach einigen Versuchen gelang es, das UAV in der Luft zu halten. Die Latenzen machten eine präzise Steuerung jedoch fast unmöglich. Ein Fall trat ein, dass die Verbindung abbrach und das UAV in einem Baum landete. Nach Auswertung der Logfiles brach die Verbindung zwischen dem Raspberry Pi und dem LTE USB-Dongle ab. Durch die Vibrationen des Motors hat sich das USB-Verlängerungskabel vom USB-Dongle gelöst.

Deutlich erfolgreicher verlief der Fly-by-Wire Test. Nachdem das X8 UAV manuell auf eine Flughöhe von etwa 50 m AGL gebracht und mittels Trimmes stabilisiert wurde, konnte erfolgreich auf die Joystick Steuerung umgeschaltet werden. Dabei sorgte der NAVIO2 für eine stabile Fluglage und man konnte selbst ohne Modellflug-Erfahrung das UAV steuern. Diese Tests konnten auch erfolgreich reproduziert werden. Dabei wurden auch spezielle automatisierte Flugmanöver wie das Abfliegen von Wegpunkten oder ein „Coming Home“-Szenario erprobt. In Abbildung 6.14 ist dabei ein Screenshot der GCS zu sehen. In der Abbildung oben erkennt man die Informationen der Mission Planner Software mit dem künstlichen Horizont (links oben) und der aktuellen Karte mit der aktuellen Position des UAVs, den programmierten Wegpunkten (in grün) sowie der geplanten Flugroute anhand der gelben Linien (rechts oben). Unten ist das Live-Bild des UAVs zu sehen. All diese Daten wurden im Downlink über das LTE-Mobilfunknetz an die GCS gesendet, während gleichzeitig die Joystick Inputs bzw. Wegpunktvorgabe an das UAV gesendet (Uplink) wurden.



Abbildung 6.13: Mission Planner Software auf der GCS mit Live Bild des UAVs

Im **Testszenario #3** wurden COTS-LTE Antennen vermessen. Dabei wurden die Sendeleistung sowie die Reflexionsparameter der drei in Tabelle 5.3 genannten Modelle erfasst. Die Untersuchung der Antennen erbrachte sehr unterschiedliche Ergebnisse. Besonders die Antenne 645 668 SMA erwies sich bei der Sendeleistung über den gesamten Frequenzbereich als gut. Eine Übersicht der Sendeleistung bei 90° von zwei der getesteten Antennen ist in Tabelle 6.3 zu sehen. Dabei wurde eine 360° Messung in 5° Schritten durchgeführt. In der Tabelle sind die jeweils besten und schlechtesten Werte bei allen in Österreich vorkommenden LTE-Frequenzen festgehalten. Obwohl das Modell 645 668 SMA nicht optimal angepasst ist, wie in Abbildung 6.14 rechts zu sehen ist, verfügt sie über den größten Antennengewinn aller getesteten Modelle in den verwendeten LTE-Bändern.

Tabelle 6.3: Vergleich der Sendeleistung bei senkrechter Ausrichtung der Antennen

Modell	Frequenz (GHz)	Max dBi @ azimuth	Min dBi @ azimuth
645 668 SMA	0,8	3.2 @ 320°	2.7 @ 30°
GXS404 SMA	0,8	2.4 @ 190°	-2.4 @ 0°
645 668 SMA	1,8	3.3 @ 0°	2.5 @ 280°
GXS404 SMA	1,8	-0.5 @ 350°	-10.7 @ 260°
645 668 SMA	2,1	4.1 @ 30°	3.3 @ 260°
GXS404 SMA	2,1	-2.9 @ 70°	-5.1 @ 300°
645 668 SMA	2,6	1.4 @ 345°	0.1 @ 160°
GXS404 SMA	2,6	-4.6 @ 30°	-8.0 @ 265°

Besonders interessant ist die Verwendung von zwei Antennen dieses Typs. Durch die physikalische Anordnung kann man das Antennendiagramm je nach Anforderung verändern. Die Abstrahlcharakteristik ändert sich je nach Anordnung der beiden Antennen von einer Kugel

zu einem Ellipsoid. Durch Veränderung der Position und des Abstandes kann die Form des Ellipsoids für das UAV optimiert werden.

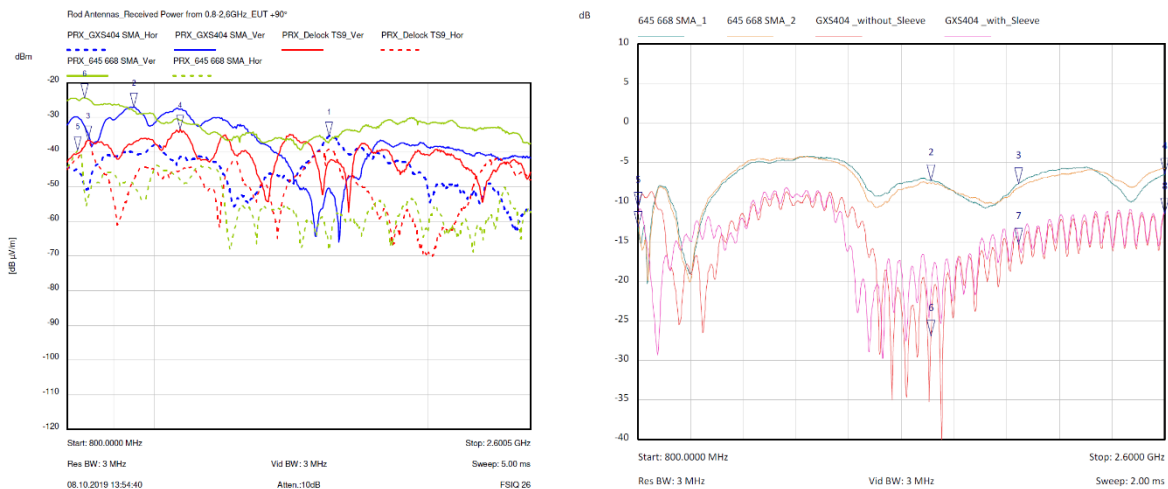


Abbildung 6.14: Die Empfangsleistung (links) und Reflexionsparameter von 0,8 bis 2,5 GHz

Die DELOCK 12479 erwies sich bei den Messungen als ungeeignet. Dies kann an einem Defekt der Antenne oder an einer zu hohen Dämpfung des SMA auf TS9 Adapters liegen. Die Ergebnisse lagen immer 20 dB unter den erwarteten Werten. Das bedeutet sie liegen um den Faktor 100 unter den erwarteten Werten und mussten daher verworfen werden. Die GXS404 erwies sich im Frequenzbereich bis etwa 1,3 GHz als gut, bei höheren Frequenzen ist der Gewinn jedoch zu gering. Dies kann mit dem ca. 2,5 m langen Anschlusskabel, dem Gehäusematerial oder der internen Signalverarbeitung zusammenhängen.

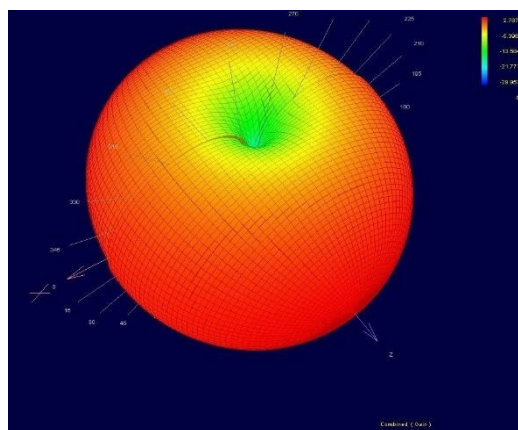


Abbildung 6.15: 3D Antennenpattern des Modells 645 668 SMA

Im Vergleich zum Modell 645 668 SMA ist das GSX404 Modell deutlich besser angepasst, hat aber schlechtere Abstrahleigenschaften. Dieses Modell wurde auch für Messungen mit und ohne Glasfaserabdeckung verwendet. Es fiel auf, dass sich die Abstrahlcharakteristiken zum Teil deutlich veränderten. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Antenne nicht exakt in die Hülle passt. Die dadurch entstehenden Lücken verursachen unterschiedliche dielektrische Übergänge zwischen den Materialien und führen somit zu unterschiedlichen Abstrahlcharakteristiken. Die daraus resultierenden kapazitiven Einflüsse nehmen mit der Frequenz zu, wodurch die Antenne bei höheren Frequenzen weniger effizient ist.

Um die anhand Smartphones ermittelten LTE-Kenngrößen besser einschätzen zu können, wurden im **Testszenario #4** statische Messungen durchgeführt, um die Variation der Messergebnisse der Smartphones zu untersuchen. In Abbildung 6.16 sind die Messergebnisse zweier identer Smartphones (Mi A2 Lite) zu sehen, die im gleichen Mobilfunknetzwerk angemeldet waren. Ein Modell wurde wie in Abbildung 5.22 links zu sehen, eben hingelegt und trägt die Bezeichnung UE_A, während das zweite Modell mit der Bezeichnung UE_H in einem nichtleitenden Gestell senkrecht befestigt wurde. Die Kopfseite beider Smartphones zeigte in die gleiche Richtung. Der Messvorgang wurde fünf Minuten lang durchgeführt, anschließend wurden die Modelle getauscht und der Messvorgang wiederholt.

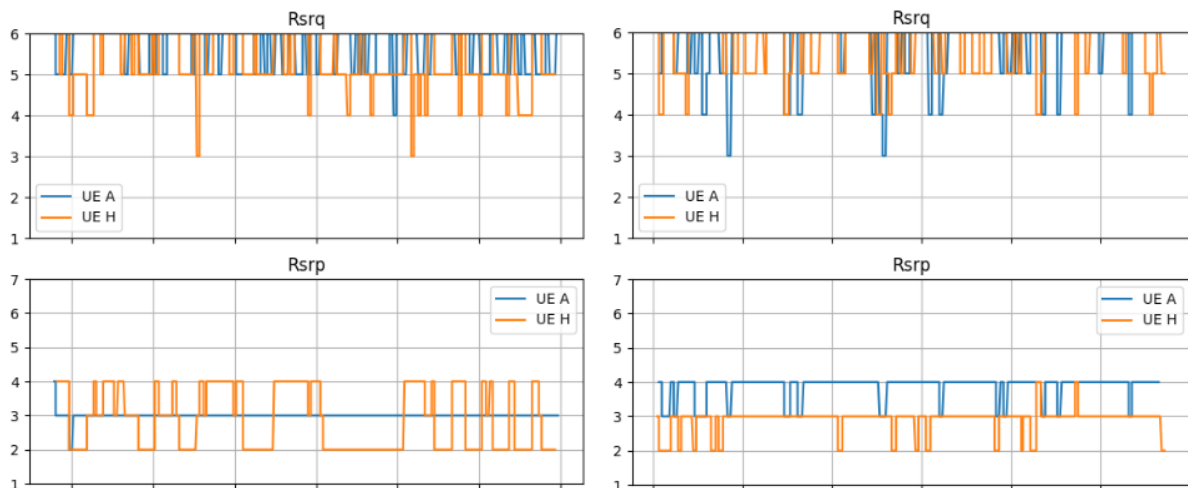


Abbildung 6.16: Übersicht der Messwerte zweier identischer Smartphones in unterschiedlicher Orientierung

Bei dieser Auswertung fällt eine starke allgemeine Schwankung von UE_H auf, unabhängig vom Parameter und der Positionierung. Bei der Analyse der Messwerte fiel auf, dass dieses Modell unabhängig von der Position häufig ein Cellreselection durchführte und teilweise für nur wenige Sekunden in einer neuen Zelle verweilte, ehe wieder auf die ursprüngliche Zelle zurückgewechselt wurde. Eine Übersicht der Werte ist in Tabelle 6.4 zusammengefasst. Die Unterschiede in Messung eins fallen etwas geringer aus als in Messung 2.

Es muss angeführt werden, dass am Messort die Netzabdeckung für das gewählte Mobilfunknetz nur mittelmäßig war. Nichtsdestotrotz gibt es eine Variation der Messwerte in Abhängigkeit von der Lage des UEs. Beim RSRP-Wert kommt man im Schnitt auf Abweichungen von etwa 5 dBm und maximal 18 dBm, was eine große Differenz darstellt. Beim RSRQ-Wert wäre die durchschnittliche Abweichung zwischen 1 und 2 dB bei einer ebenfalls großen absoluten Differenz von 17 dB. Diese großen Absolutwerte kommen von den häufigen Umbuchungen, bei denen speziell das UE_H für kurze Zeiträume von etwa ein bis fünf Sekunden eine schlechte Verbindung hatte.

Tabelle 6.4: Messergebnisse von zwei identen Smartphones in unterschiedlicher Anordnung

Messanordnung und farbliche Zuordnung	RSRP (dBm) Mittelw.	RSRP (dBm) (Max/Min)	RSRQ (dB) Mittelw.	RSRQ (dB) (Max/Min)	Cell Reselection	Serving Time (s) Mittelw.
UE_A In Abb. links blau	-97,23	-91/-100	-16,61	-10/-20	1	135,48
UE_H in Gestell In Abb. links orange	-92,53	-82/-103	-15,04	-7/-20	29	10,18
UE_A in Gestell In Abb. rechts blau	-93,96	-89/-100	-16,09	-9/-20	4	49,23
UE_H In Abb. rechts orange	-101,33	-95/-104	-17,05	-8/-20	23	14,16

Anhand einer Korrelationsrechnung wurde kein linearer Zusammenhang zwischen den Messwerten festgestellt, wie in Tabelle 6.5 dargestellt.

Tabelle 6.5: Statistischer Korrelationsfaktor aus beiden Messungen

Korrelationsfaktor	Messung 1	Messung 2
RSRP	0,019	0,048
RSRQ	0,140	0,076

Eine weitere Messung wurde in direkter LOS zur Mobilfunkstation durchgeführt. Die UEs waren dabei gleich ausgerichtet. Die Auswertung fiel deutlich homogener aus, was an den Kennlinien von RSRP und RSRQ in Abbildung 6.17 zu sehen ist.

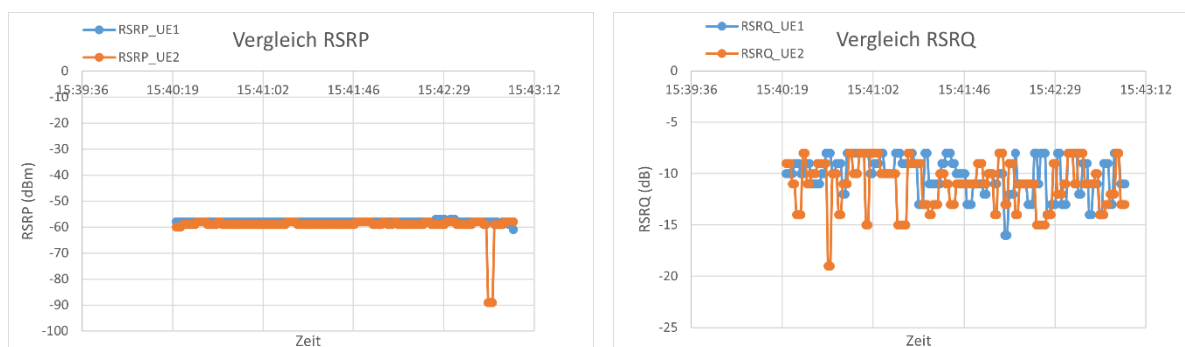


Abbildung 6.17: Wiederholung der Messung bei direkter LOS Verbindung zum eNodeB

Da bei der weiteren Messung mit vertauschten UEs sich die Werte nur unwesentlich änderten, sei in Tabelle 6.6 nur das Ergebnis einer Messung angeführt.

Man kann aus der Messung festhalten, dass das UE_H in den Empfangswerten etwas öfter leicht schwankt. Im Mittel liegen die Parameter jedoch sehr nahe aneinander. Abschließend kann man festhalten, dass allein durch die Auswahl des UEs sich immer ein Delta von einigen dBm für den RSRP sowie dB für RSRQ ergeben wird, was zum größten Anteil an Fertigungs- und Bauteiltoleranzen liegt.

Tabelle 6.6: Statische Messung mit gleichen UEs in derselben Orientierung nahe einer Zelle

Gerät	RSRP (dBm) Mittelw.	RSRP (dBm) (Max/Min)	RSRQ (dB) Mittelw.	RSRQ (dB) (Max/Min)	Cell Reselection	Serving Time (s) Mittelw.
UE_A	-57,99	-57/-61	-10,14	-8/-16	0	180
UE_H	-59,32	-58/-89	-11,05	-8/-19	0	180

Die aufwändigste Messkampagne stellte **TestszENARIO #5** dar. Dabei wurden an unterschiedlichen Orten in Österreich Messflüge an Mobilfunkstationen durchgeführt, oft auch an unterschiedlichen Tagen, um die Abstrahlcharakteristik zu untersuchen sowie allgemein die LTE-Parameter in Höhen bis 150 m AGL zu erfassen. Die erfassten Messwerte wurden in einer Datenbank gesammelt und einerseits von der FH JOANNEUM sowie andererseits vom Projektpartner Dimetor ausgearbeitet.

Tabelle 6.7: Skalierung der RSRP Werte für die Auswertung anhand [239]

RSRP Level	RSRP Wertebereich	Beschreibung
1	-50 bis -65 dBm	Exzellenter Empfang
2	-65 bis -80 dBm	Gute Empfangsbedingungen
3	-80 bis -95 dBm	Ausreichende Empfangsbedingungen für eine stabile Verbindung
4	-95 bis -105 dBm	Akzeptable Bedingungen mit möglichen Abbrüchen
5	-110 bis -125 dBm	Schlechte Empfangsbedingungen, viele Abbrüche
6	-125 bis -140 dBm	Sehr schlechter Empfang, kaum eine Verbindung mögl.

Tabelle 6.8: Skalierung der RSRQ Werte für die Auswertung anhand [240]

RSRQ Level	RSRQ Wertebereich	Beschreibung
1	--3 dB	Optimale Qualität, keine Störung
2	-4 bis -5 dB	Störungen vorhanden, aber ohne Auswirkungen
3	-6 bis -8 dB	Störungen beeinflussen die Verbindung
4	-9 bis -11 dB	Störungen beeinflussen merklich die Verbindung
5	-12 bis -15 dB	Starke Störung, instabile Verbindung
6	-16 bis -20 dB	Sehr starke Störungen, keine Verbindung möglich

Tabelle 6.9: Skalierung der SINR Werte für die Auswertung anhand [241]

SINR Level	SINR Wertebereich	Beschreibung
1	+40 dB bis +20 dB	Beste Bedingungen, kaum Störung
2	+19 dB bis +10 dB	Gutes und stabiles Signal, kaum Störungen
3	+5 dB bis +9 dB	Akzeptables Signal mit leichten Störungen
4	+0 dB bis +4 dB	Ausreichendes Signal, merkliche Störungen
5	-5 dB bis -1 dB	Starke Störung und instabile Verbindung
6	-12 dB bis -5 dB	Sehr starke Störungen, keine (Daten-)Verbindung möglich

Es können hier nur ein paar Auszüge der vielen Ergebnisse präsentiert werden. Die **Skalierung** mit den entsprechenden RSRP, RSRQ sowie SINR Werten ist in den folgenden Tabellen zu sehen, die anhand der Informationen von [239], [240] und [241] erstellt wurden

und in Einklang mit den Tabelle im Anhang sind. Zusätzliche Plots werden im Anhang B ergänzt. Für eine leichtere Lesbarkeit der erstellten Plots wurde die y-Achse skaliert.

Es werden nun **Auszüge der erstellten Plots** der vielen Messflüge präsentiert, wobei bewusst auf die Nennung der verwendeten Provider verzichtet wird. Diese sind in der gesamten Bewertung mit Provider X und Provider Y benannt. Die Auswertungen sollen keinerlei Bewertungen für einen Provider darstellen, sondern lediglich Informationen über die LTE relevanten Parameter in Höhen bis 150 m AGL geben. Als Vorgehensweise wurden immer vor dem Flug isolierte Mobilfunkzellen im ländlichen Bereich ausgewählt. Dann wurden Missionsprofile definiert, um mittels der zu ermittelten Messwerte die Abstrahlcharakteristik der Sendestation sowie die Einflüsse der Umgebung feststellen zu können. In Abbildung 6.18 ist einerseits die Planung des Fluges anhand eines KML Files dargestellt (gelb), andererseits sind Messdaten des Fluges in schwarz als Vergleich hinzugefügt. Es konnten die geplanten Routen nie exakt geflogen werden, da sowohl Umwelteinflüsse als auch die Topologie Einfluss auf das Flugverhalten des UAVs haben.

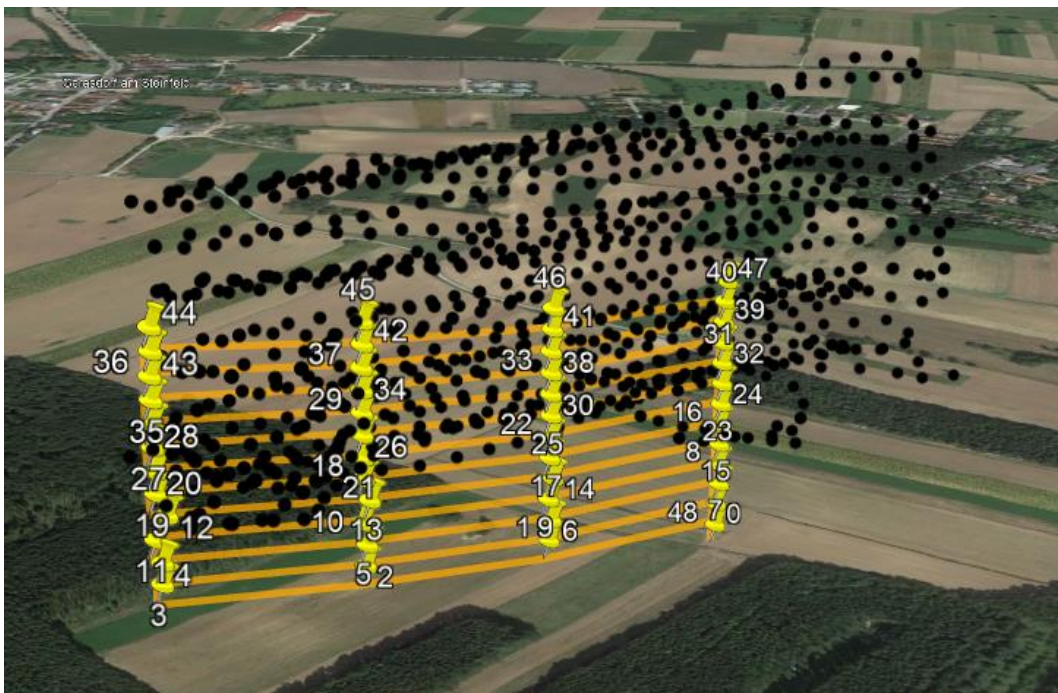


Abbildung 6.18: Vergleich zwischen der Planung der Route und den aufgenommenen Messwerten in der Luft (schwarze Punkte)

Abbildung 6.19 bis 6.22 zeigen grafisch die erfassten Messwerte von zwei Providern an einem Standort, die zu den Flügen aus Abbildung 6.18 gehören. Es ist jeweils der Parameter RSRP und RSRQ entsprechend zur Höhe dargestellt. Die Skalierung entspricht Tabelle 6.7 und 6.8. Man erkennt, dass beide Provider gute RSRP Werte aufweisen, jedoch ein gravierender Unterschied bei den RSRQ Werten vorherrscht. Das liegt daran, dass die Sendestationen der beiden Provider jeweils an unterschiedlichen Orten und somit räumlich getrennt waren. Durch Interferenzen verschlechtert sich somit die Empfangsqualität (RSRQ) des weiter entfernten Sendemastes von Provider X. Trotz der teilweise schlechten Empfangsqualität gab es während dieser Messungen keine kompletten Verbindungsverluste.

6.1 Zusammenfassung der Messdaten aus den Testszenarien

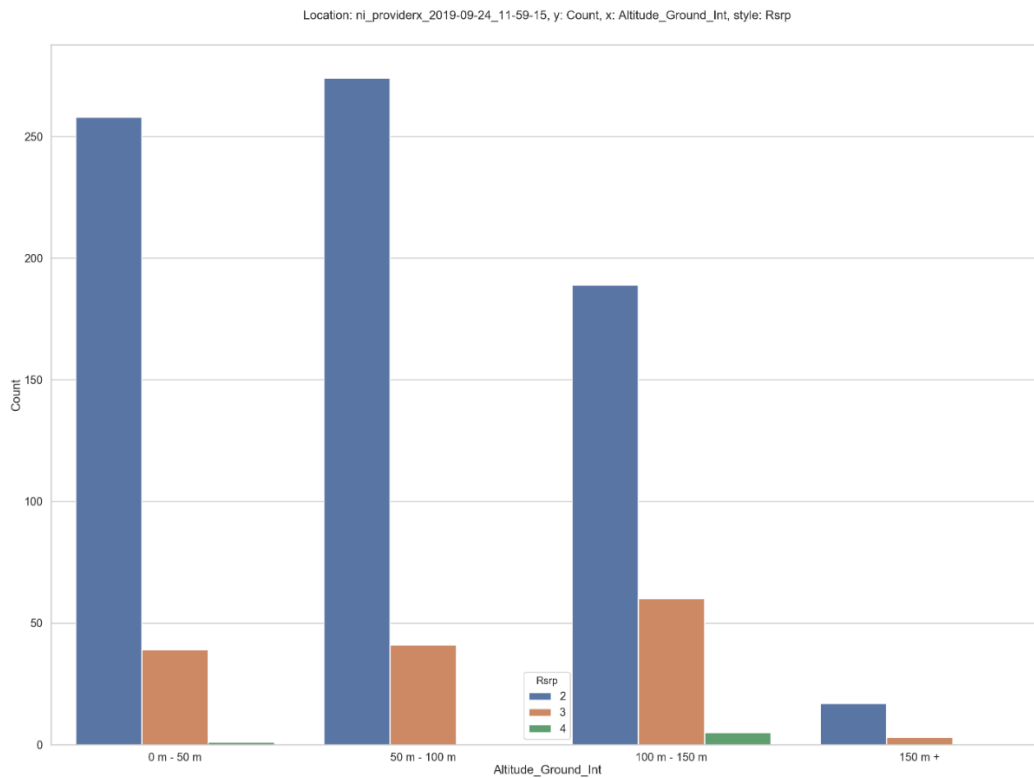


Abbildung 6.19: RSRP-Werte für Provider X gestaffelt nach der Höhe und der Anzahl der Messwerte

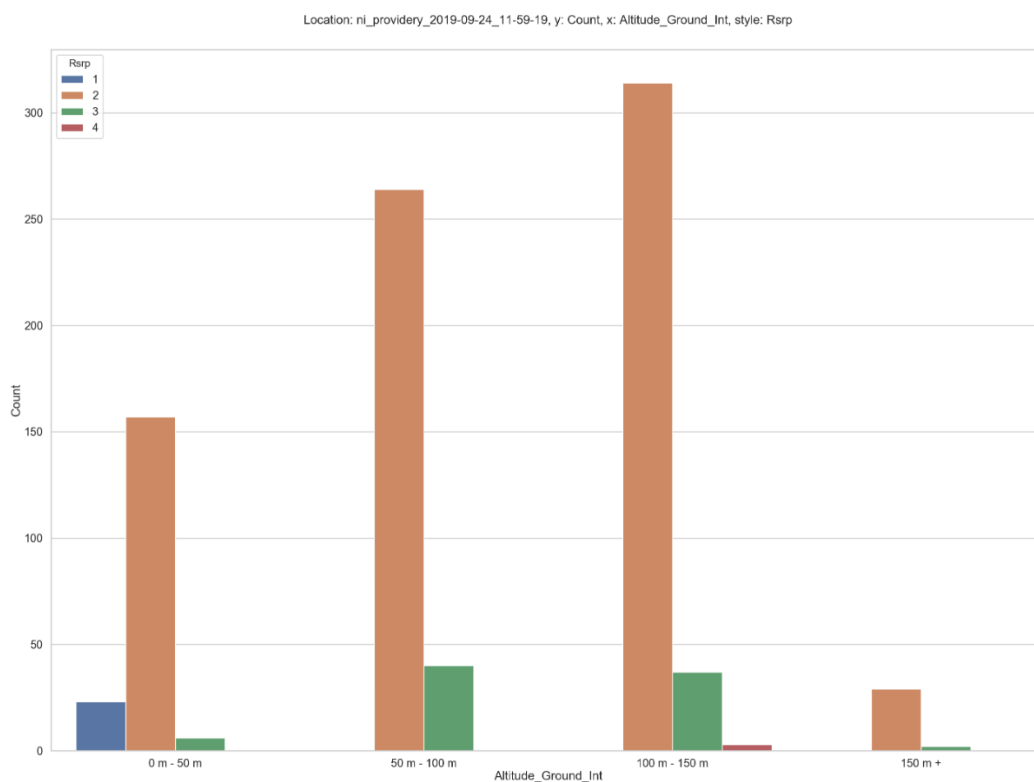


Abbildung 6.20: RSRP-Werte für Provider Y gestaffelt nach der Höhe und der Anzahl der Messwerte

6 Auswertung und Verifizierung der Messergebnisse

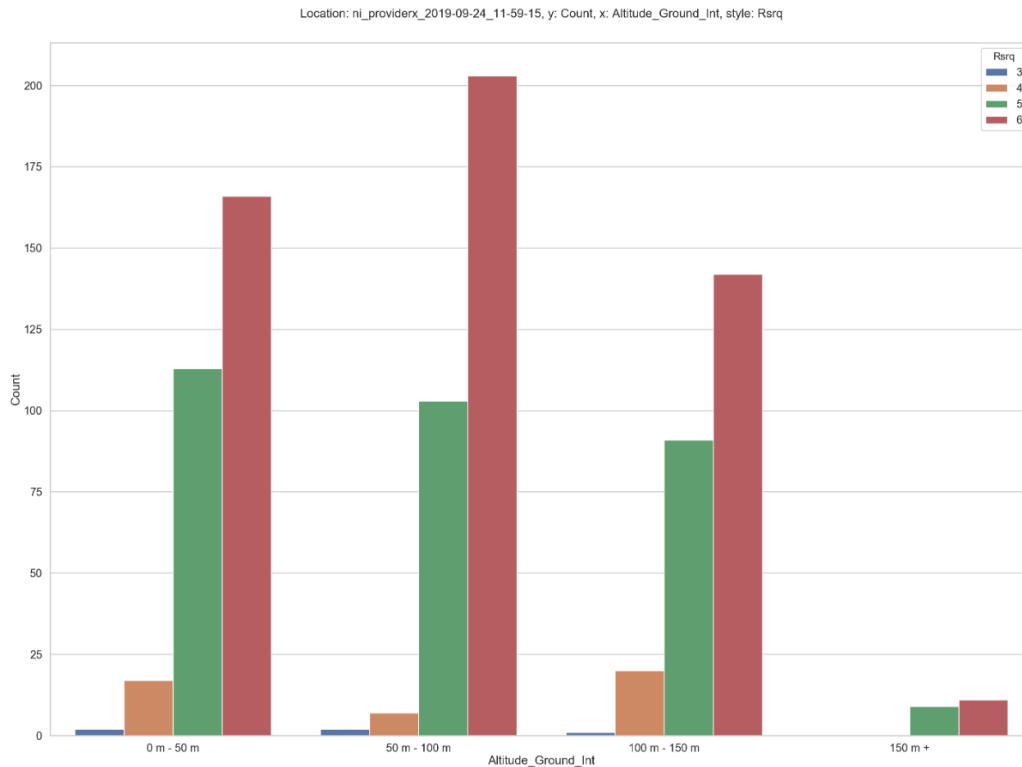


Abbildung 6.21: RSRQ-Werte für Provider X gestaffelt nach der Höhe und der Anzahl der Messwerte

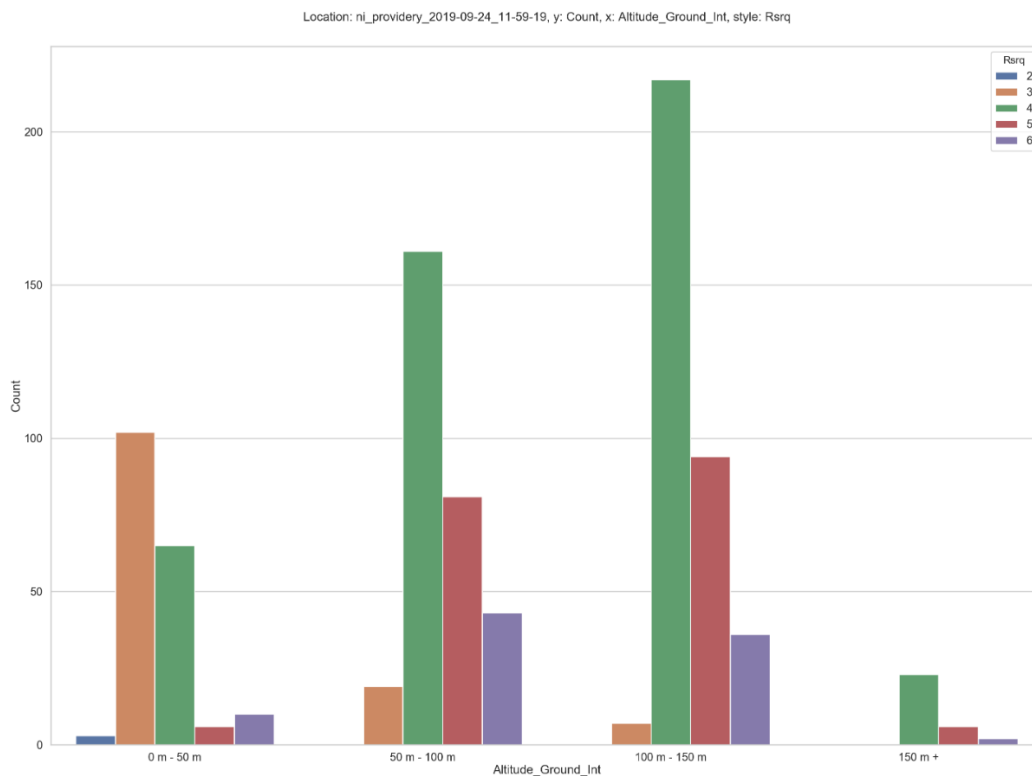


Abbildung 6.22: RSRQ-Werte für Provider Y gestaffelt nach der Höhe und der Anzahl der Messwerte

Bei der Datenerfassung mittels der G-Net Track Pro App werden die Daten etwa mit 1 Hz aufgezeichnet. Daraus konnten auch 3D Karten abgeleitet werden, die den Signalverlauf in der Luft grafisch als Aneinanderreihung von Messpunkten darstellen.

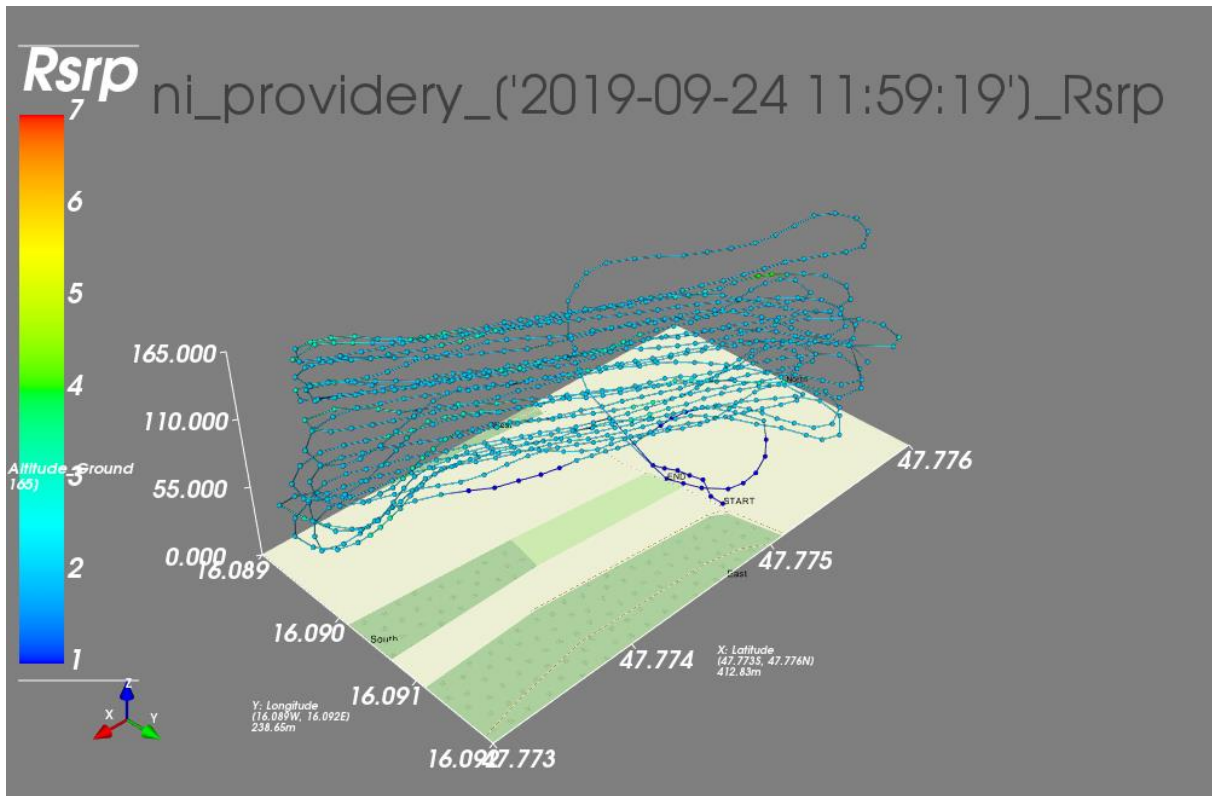


Abbildung 6.23: 3D Darstellung der RSRP Daten des Providers Y

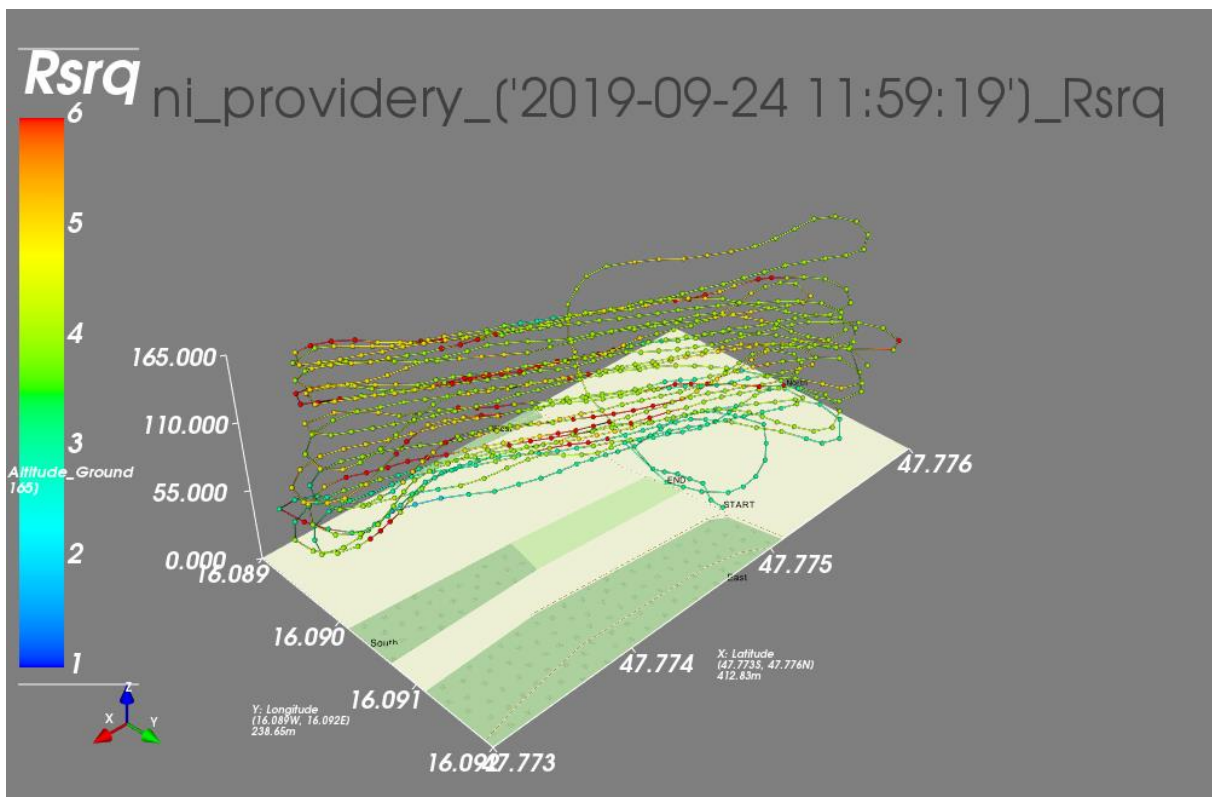


Abbildung 6.24: 3D Darstellung der RSRQ Daten des Providers Y

Anhand der farblichen Skalierung erkennt man speziell in Abbildung 6.24, dass ab einer gewissen Höhe ab etwa 50 m AGL die Interferenzen stellenweise die Signalqualität negativ

beeinflussen und der RSRQ-Wert sich dadurch stark verschlechtert. Die Stellen, an denen die RSRQ-Signalqualität sehr schlecht war, hatten jeweils eine Dauer von unter 5 s.

Für die eine genaue Messung der Freiraumdämpfung wurde mit einer speziellen Software auf einem Oneplus7 Smartphone gemessen. Die Flüge wurden, wie in Abbildung 5.24 zu sehen, an einer isolierten Mobilfunkstation durchgeführt. Die Software sorgte dafür, dass das Smartphone sich nicht umbuchen konnte und so immer nur die Parameter der einen aktiven Zelle aufzeichnete. Das Ergebnis eines Fluges, der nach der Vorgabe aus Abbildung 5.24 durchgeführt wurde, ist in Abbildung 6.26 zu sehen.

Die bei dieser Messung gewonnen Parameter RSRP und RSRQ sowie der Verlauf der Flughöhe sind in Abbildung 6.25 dargestellt. Für den RSRP Wert ist eine Trendlinie eingefügt. Anhand dieser erkennt man, dass der RSRP Wert bei der Abnahme der Höhe linear zunimmt.

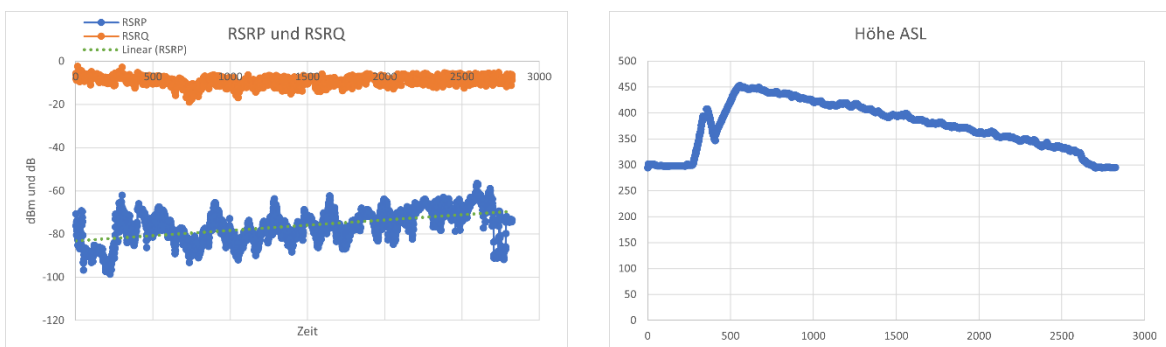


Abbildung 6.25: Die Messergebnisse von RSRP und RSRQ sowie die Flughöhe ASL

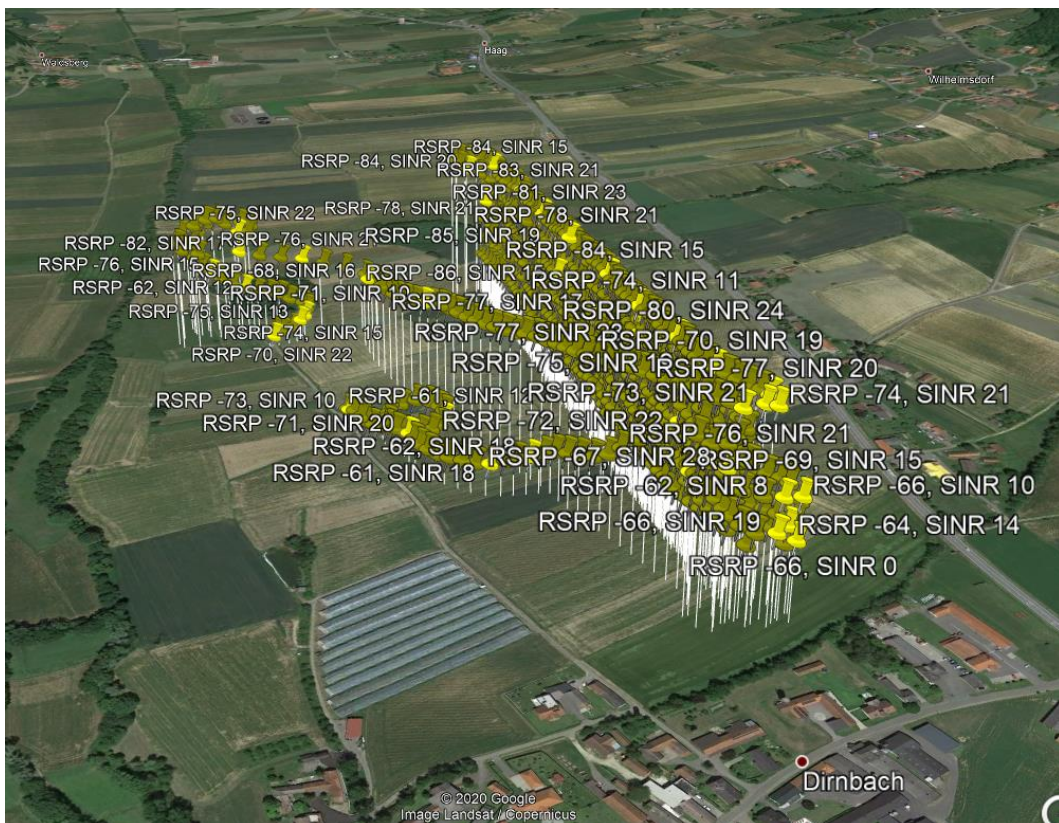


Abbildung 6.26: Ergebnis des Testfluges zur Messung der Freiraumdämpfung einer Sendestation

Betrachtet man die Ergebnisse genauer, dann erkennt man den linearen Verlauf von RSRP mit der Distanz zur Sendestation. Das UAV flog eine 675 m lange gerade Strecke entlang der Hauptsendekeule hin und her und wendete dabei 70 Meter vor der Mobilfunkstation. Das ergibt als größte Entfernung etwa 745 m, die das Smartphone von der Zelle entfernt war.

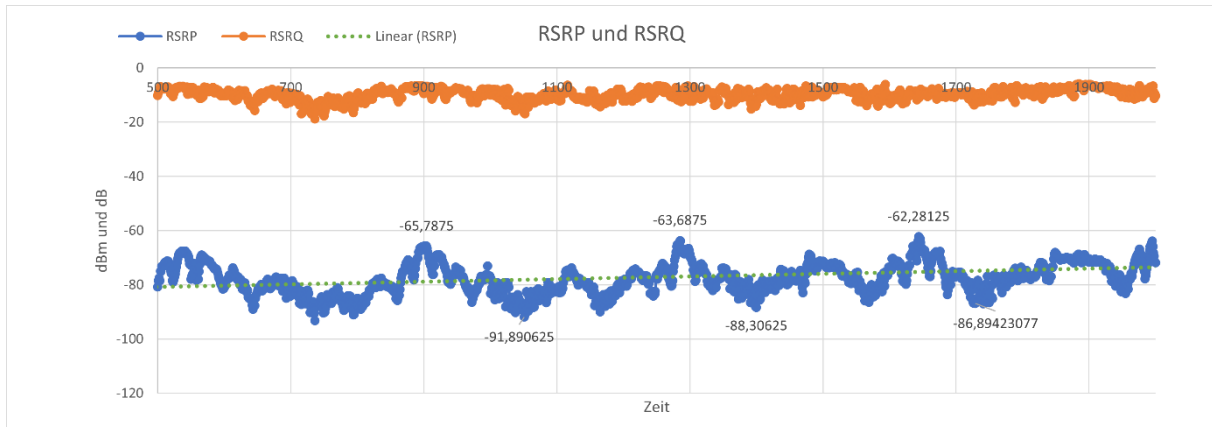


Abbildung 6.27: Vergrößerung des Graphen zeigt die Ab- und Zunahme des RSRP Wertes mit der Entfernung

Der RSRP Wert schwankte zwischen etwa -62 (minimale Entfernung zur Zelle) und -91 dBm (maximale Entfernung zur Zelle) jeweils immer um ein Delta von etwa 25 dBm auf die 675 m Distanz. Eine Zusammenfassung der gemessenen Parameter ist in Tabelle 6.10: Zusammenfassung der Messwerte des Messfluges zu sehen. Man erkennt das Delta von RSRP, das etwa 25 dBm war und der Freiraumdämpfung auf der Flugdistanz entspricht. Der SINR Wert war mit einem Mittelwert von 17,77 dB sehr gut und somit weit von den kritischen 0 dB entfernt.

Tabelle 6.10: Zusammenfassung der Messwerte des Messfluges

Kenngroße	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SINR (dB)
Mittelwert	-76,37	-8,88	17,77
Standardabweichung	7,59	2,03	5,05
Max	-56,51	-2,36	31,1
Min	-98,59	-18,84	-8,1

6.2 Analyse und Evaluierung der Testdaten

Die gesammelten Ergebnisse zeigen, dass die Verfügbarkeit des Mobilfunknetzes bis 150 m AGL und darüber hinaus gegeben ist. Allerdings kann anhand der Messergebnisse die Zellstruktur in der Luft nicht mehr bestimmt werden. Wenn man die theoretische Abstrahlcharakteristik einer Mobilfunkantenne betrachtet, sieht man, dass es zusätzlich zur Hauptkeule auch weitere Nebenkeulen in alle anderen Richtungen gibt. Die Sendeleistung ist entlang der Hauptsendekeule am größten. Betrachtet man Abbildung 6.28, dann erkennt man die Problematik, die auch anhand der Messungen festgestellt werden konnte. Das für den Empfang am Boden in einer Wabenstruktur aufgebaute Mobilfunknetz verliert diese

Wabenstruktur völlig, je höher man vom Boden weggeht. So sieht man, dass das UAV in Abbildung 6.28 zwar näher am eNodeB 1 ist, aber über die Reflexion der Hauptsendekeule ein stärkeres Signal vom weiter entfernten eNodeB 2 bekommt. Das kann zu unerwünschtem Umbuchungsverhalten führen. Weiters ergeben sich durch die Reflexionen am Boden in der Luft deutlich mehr Interferenzen.

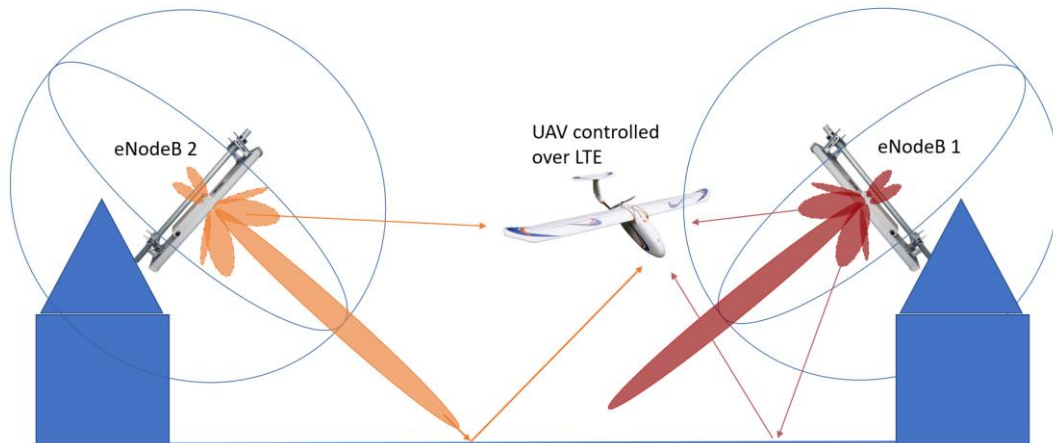


Abbildung 6.28: Das UAV empfängt in der Luft Reflexionen der unterschiedlichen LTE-Sendestationen

Das bedeutet, dass der RSSI-Wert im Nutzfrequenzband steigt. Betrachtet man die Formel (30) für die Signalqualität RSRQ dann erkennt man, dass RSRQ indirekt proportional zu RSSI ist: Bei steigendem RSSI sinkt die Qualität.

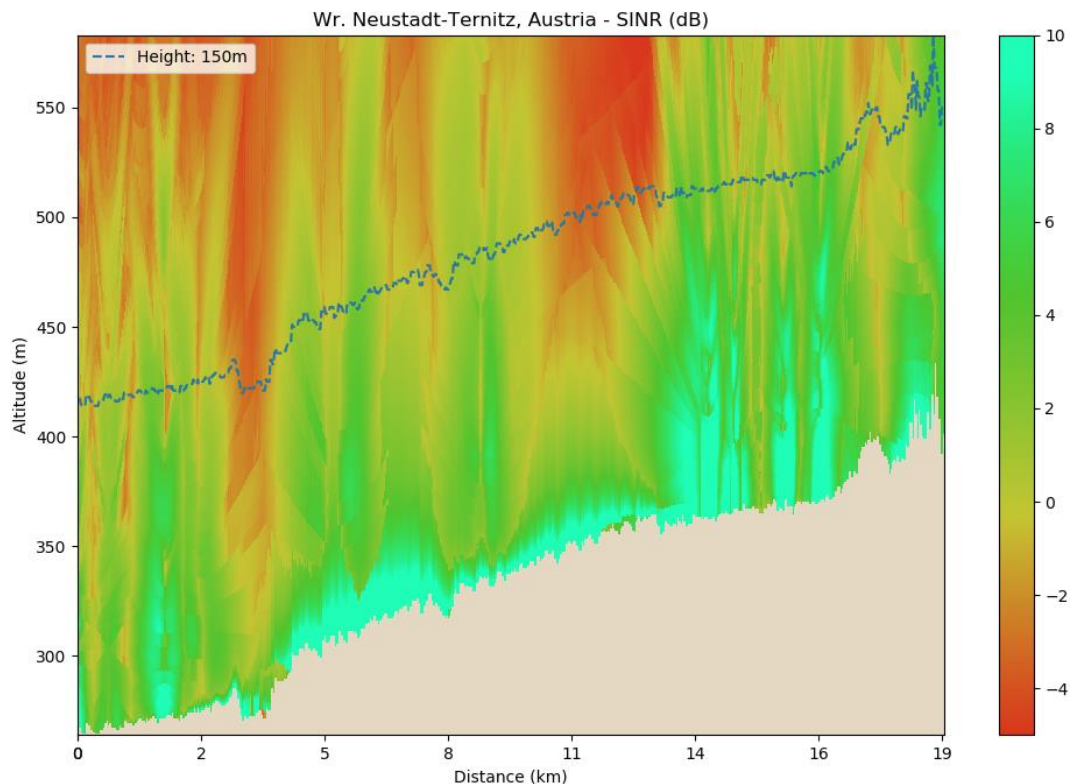


Abbildung 6.29: Verlauf des SINR in Relation zur Höhe (© Dimetor)

So konnte bei den Messungen oft festgestellt werden, dass zwar die Referenzsignalstärke RSRP gute Werte aufwies, jedoch die Qualität eher mangelhaft war (vergl. Abbildung 6.19 bis Abbildung 6.22). Trotzdem konnte man anhand der Messungen feststellen, dass selbst in Höhen bis 1000 m AGL ein Empfang eines Mobilfunksignals möglich ist. Dies konnte durch mehrere Testflüge mit dem Leichtflugzeug verifiziert werden. Selbst ein Roaming, also der Wechsel in ein ausländisches Mobilfunknetz war in der Luft möglich. Anhand der eingeschränkten Signalqualität muss man jedoch mit einer geringeren Datenrate rechnen. Das erkennt man gut anhand der gewonnenen Messdaten, bei denen der RSRP-Wert oft in einem guten Bereich war, während der RSRQ-Wert eher sehr schlecht war, was etwa gut auf den Plots in Abbildung 6.19 bis Abbildung 6.22 zu sehen ist.

Den Verlauf des SINR-Parameters (Siehe Formel (32)) gegenüber der Höhe ist in Abbildung 6.29 dargestellt. Die Skalierung des Parameters ist in Tabelle 6.9 dargestellt. Man erkennt anhand des Farbverlaufs in der Grafik gut, dass selbst bei 150 m AGL teilweise noch sehr gute Empfangsbedingungen (grün bis gelb) vorzufinden sind, man jedoch stellenweise auch mit großen Störungen (rot) rechnen muss. Das liegt, wie zuvor beschrieben, an den mit der Höhe zunehmenden Interferenzen der verschiedenen Reflexionen der Haupt- und Nebensendekeulen aller Mobilfunkstationen in der Umgebung. Erfahrungen anhand der Messergebnisse haben gezeigt, dass eine ausreichende Verbindungsqualität bis etwa 0 dB SINR gegeben sind. Unter einem SINR-Wert von 0 dB ist beispielweise ein Videostream nicht mehr ohne Störungen übertragbar, ein C2-Link wäre aber noch möglich. Das liegt daran, dass ein Steuerkommando nur aus einer geringen Datenmenge (Pakete) besteht und auch bei Verbindungsstörungen anhand der Netzwerktechnik (TCP/IP) diese selbst bei Verlust nachgereicht werden (Automatic Repeat reQuest, ARQ). Durch eine Fly-by-Wire Steuerung, bei der der Flugregler das UAV stabilisiert, fliegt das UAV auch bei kurzzeitigem Verlust des Datenlinks stabil weiter.

Da es mit dem *Testsetup 5* nicht möglich war, mittels des Raspberry Pis die aktuelle Signalqualität des LTE USB-Dongles zu überwachen, wurden, um die grundsätzliche Funktionalität festzustellen, am Flugplatz Weiz-Unterfladnitz Testflüge mit dem kommerziellen UAV des Typs X8 über das Mobilfunknetz durchgeführt. Das UAV wurde manuell gestartet und in einer Flughöhe von 50 Meter ALG wechselte der Pilot auf den Fly-by-Wire Modus des FCS über den Mobilfunkdatenlink. Das UAV konnte dabei auch nach mehrmaligen hin- und herschalten zwischen manuellem und Fly-by-Wire Modus problemlos mittels Joysticks per Mobilfunk gesteuert werden. Es wurde zusätzlich ein Livestream einer an der Front montierten Kamera in HD-Qualität bei 15 fps an die Bodenstation übertragen. Am Boden konnte so der Pilot, wie in Abbildung 6.13 zu sehen, das UAV anhand des Livestreams steuern. Der Livestream, der h.264 endcodiert per UDP Protokoll über Mobilfunk an die GCS gesendet wurde, wies in unregelmäßigen Abständen kurze Bildaussetzer auf, brach jedoch nicht ab. Nach Angaben auf [242] sollte die Datenrate für die gegebene Auflösung und Bildwiederholrate (720p/15) bei etwa 4 Mbit/s liegen. Die Steuerung funktionierte durchwegs flüssig. Ein BVLOS Einsatz wäre auf diese Art realisierbar. Diese Tests konnten mehrfach erfolgreich wiederholt werden.

6.3 Verifikation der Testdaten

Die Verifikation der Testdaten wurde auf mehrere Arten durchgeführt. Auf der einen Seite wurden die Messflüge mit den UAVs an denselben Mobilfunkstationen mehrfach durchgeführt. Dabei konnten ähnliche Resultate erzielt werden. In weiterer Folge wurde anhand gewonnener Messdaten mittels linearer Regression und neuronalen Netzwerken eine Vorhersage der Signalqualität in der Umgebung erstellt, deren Ergebnisse bei erneuten Testflügen überprüft werden können. Dabei wurden für unterschiedliche Abstrahlwinkel θ der Sendestation Datensätze der gesammelten RSRP-Werte eines Messfluges erstellt. Daraus ließen sich für bestimmte Abstrahlwinkel die lineare Regression zwischen den RSRP-Werten und der Distanz berechnen. Für ein θ zwischen 5° und 6° ergibt sich dabei die Freiraumdämpfung über die Entfernung, wie in Abbildung 6.30 dargestellt.

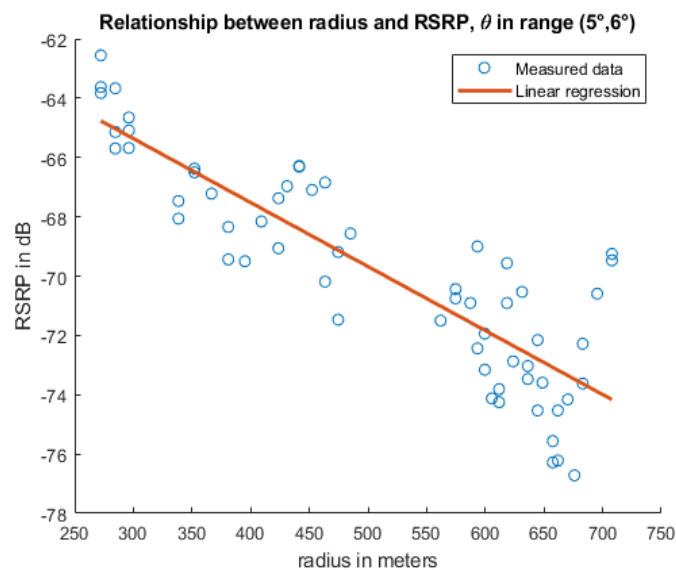


Abbildung 6.30: Lineare Regression von RSRP über die Distanz

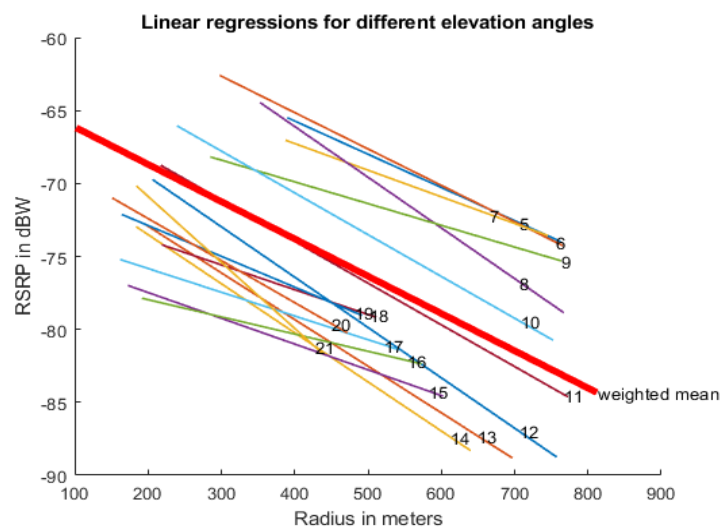


Abbildung 6.31: Gewichtetes Mittel für Elevationen von 5° bis 20°

Berechnet man die Regression für unterschiedliche Abstrahlwinkel θ von 5° bis 20° kann man dafür einen gewichteten Mittelwert bestimmen, wie in Abbildung 6.31 zu sehen. Dieser gewichtete Mittelwert entspricht einer Freiraumdämpfung von etwa 20 dBm auf die Entfernung von 700 m. Das stimmt annähernd mit dem Delta (etwa 25 dBm) aus den Auswertungen aus Abbildung 6.27 überein.

Weiters wurden die möglichen Abweichungen aufgrund der Messhardware, in diesem Fall Mobiltelefone, mittels statischer Messungen untersucht. Die Ergebnisse dieser Messungen zeigen, dass man bei den gemessenen Werten gewisse Abweichungen erwarten muss, diese jedoch in einem vernachlässigbaren Rahmen sind. Die Modems der Mobiltelefone wie auch die der LTE USB-Sticks sind mittlerweile hochintegriert und sind nach den 3GPP Standards entwickelt. Das bedeutet, dass selbst bei schlechten Empfangsbedingungen und teilweisen Signalabbrüchen seitens der Hardware immer noch eine Datenübertragung möglich ist, wenn auch nur mit geringen Datenraten. Da das Mobilfunknetz IP-basiert ist (siehe Kapitel 4.5), sind Netzwerktechniken implementiert, die dafür sorgen, dass verlorengegangene Pakete nachgeliefert werden (TCP/IP). So werden Daten, die durch einen kurzzeitigen Verbindungsverlust nicht angekommen sind, bei erneuter Verbindung nachgereicht.

Bei den Testflügen über das Mobilfunknetz mit dem X8 UAV konnte zwar die grundlegende Funktionalität überprüft werden, jedoch war ein gleichzeitiges Erfassen von Mobilfunk-Parametern direkt über die Mobilfunkverbindung über den LTE USB-Dongle nicht möglich. Um keine Interferenzen und somit Störungen in der Mobilfunkverbindung hervorzurufen, wurde auch auf das Mitführen eines Smartphones für die Messwertdatenerfassung verzichtet. Es wurde dabei lange nach einer Lösung gesucht, wie man die aktuelle Mobilfunk-Signalqualität im UAV auch auf der Bodenstation darstellen kann, allerdings wurde mit den COTS Komponenten keine Lösung dafür gefunden. Die verwendeten LTE USB-Dongle (ZTE MF831, Huawei E3372h) bieten keinerlei Programmierschnittstelle (Application Programming Interface, API), um etwa auf die RSSI, RSRP oder RSRQ Werte zugreifen zu können. Der Stick emuliert bei Anschluss über USB einen Ethernet-Adapter und führt ein NAT aus. Dabei wird über einen DHCP-Dienst am Stick dem verwendeten Gerät, Laptop, PC oder Raspberry Pi eine private IP-Adresse im Bereich 192.168.0.X zugewiesen (X ist üblich ein Wert im Bereich 2 bis 100). Im selben privaten IP-Bereich liegt auch der emulierte USB-Dongle. Über die IP-Adresse 192.168.0.1 kann man auf dessen Weboberfläche zugreifen. Darüber werden einfache Parameter, wie in Abbildung 6.32 zu sehen, A – der Verbindungstyp (LTE, HSPA, UMTS, GPRS), B, der Provider, C der RSSI mittels einer Balkengrafik, D, der Verbindungsstatus und E, der SIM-Status (ge- oder entsperrt) – angezeigt.



Abbildung 6.32: Statusinformationen auf der Weboberfläche des ZTE MF831 [243]

Somit ist es nicht möglich, RSRP oder RSRQ Werte im Standard-Betrieb auszulesen. Im Internet findet man Anleitungen, wie man den ZTE MF831 in einen reinen Modembetrieb versetzen kann (z.B. [244]). Dadurch wird der Stick beispielsweise unter Windows nicht mehr als Netzwerkgerät erkannt. Stattdessen wird der Stick als serielle Schnittstelle erkannt (als COM-Schnittstelle unter Windows, als TTY-Schnittstelle unter Linux) und man kann anhand von Anleitungen wie [245] eine Verbindung zum WAN herstellen.

Es konnten die Messwerte auf der einen Seite durch wiederholtes Messen in Form von statischen und dynamischen Messungen sowie durch Soll-Ist-Vergleiche von Messwerten mit durch neuronale Netze berechneten Parametern, verifiziert werden. Und auf der anderen Seite wurden mittels der erfolgreichen Steuerung von UAVs über das Mobilfunknetz der Proof of Concept geliefert. Auch die Wegpunkt-Steuerung über Mobilfunk funktionierte einwandfrei. Dabei wurden von der Bodenstation über das Mobilfunknetzwerk neue Wegpunkte an das mittels FCS autonom fliegende UAV gesendet, die das UAV dann ansteuerte. Weiters konnten Ausfallsszenarien erprobt werden. Dabei wurde beispielsweise der LTE USB-Dongle der Bodenstation abgesteckt und so ein Ausfall des Datenlinks simuliert. Das UAV befolgte dabei den vorprogrammierten Notfallalgorithmus, flog zu einem vorherbestimmten Wegpunkt und kreiste um diesen.

6.4 Verarbeitung der Messdaten für weitere Anwendungen

Die Erfassung der Messdaten erfolgte im Zeitraum von 2016 bis 2020. Die erfassten Daten lagen dabei als textbasierte Logfiles vor. Darin wurden seitens der verwendeten Mess-Applikationen G-Net Track Pro und Azenqos eine Vielzahl an Parameter, wie Zeit, GPS-Position, RSRP, RSRQ, RSSI etc. [226] von den aktiven und auch von benachbarten Mobilfunkzellen aufgezeichnet.

Um diese Daten verarbeiten zu können, wurde in erster Instanz MS-Excel verwendet. Dadurch konnten schnelle Analysen durchgeführt und einfache Plots erstellt werden. Zur detaillieren, Auswertung dieser Daten wurde die Programmiersprache Python verwendet. Um die textbasierten Daten für die Auswertung vorzubereiten, wurde für jeden Flug eine Datei erstellt. Die Flugdaten mussten dabei in einem CSV-ähnlichen Format vorliegen, bei dem die Daten durch ein Trennzeichen getrennt sind. Die erste Zeile der Logfiles enthält die Titel der jeweiligen Spalten. Jede weitere Zeile stellt einen Aufzeichnungspunkt des Messfluges dar und enthält Parameter wie Zeitstempel, die aktuellen Geokoordinaten (Längengrad, Breitengrad), Sendeleistungsparameter (RSRP, RSRQ, Signal-to-Noise-Ratio (SNR)), Eigenschaften der Nachbarzellen usw.

Vor der Datenanalyse musste eine Datenbereinigung durchgeführt werden. Zum Beispiel wurden Zeilen mit fehlenden Werten gelöscht und Spaltentypen mussten angepasst werden. Datenpunkte, die zu stark von den erwarteten Werten abweichen, wurden herausgefiltert. Nach der Bereinigung war der nächste Schritt das Hinzufügen zusätzlicher Spalten mit Daten, die für die Erstellung des Diagramms benötigt wurden, wie etwa eine Spalte mit der Flughöhe

AGL, um den Flugweg darzustellen zu können. Die Sendeleistung Parameter der APP wurden jeweils in Intervalle (siehe dazu Tabelle 6.7 und Tabelle 6.8) unterteilt und entsprechend in neuen Spalten abgelegt (RSRP, RSRQ, SNR).

Die vorbereiteten Datensätze konnten dann zur Erstellung von Plots verwendet werden. Insbesondere wurden die für die Signalqualität relevanten Parameter wie RSRP und RSRQ in zweidimensionalen (2D) Plots gegen die Zeit oder die Höhe generiert. Auszüge davon sind in Abbildung 6.19 bis Abbildung 6.22 dargestellt. Weiters wurden mittels importierter Karten von OpenStreetMap (OSM) 3-dimensionale (3D) Plots erzeugt, wie in Abbildung 6.23 und Abbildung 6.24 zu sehen ist. Innerhalb dieser 3D-Diagramme konnte man den Pfad des Messfluges als eine Folge von Punkten darstellen. Die Punkte wurden farblich anhand der Skalen aus Tabelle 6.7 und Tabelle 6.8 für den gewünschten Parameter kodiert. Dadurch konnte die Auswertung visualisiert werden und erleichterte die Bewertung der Mobilfunk-Signalparameter.

In weiterer Folge wurde im Rahmen des COIN Projekts FIT4BA auch mit der Firma Dimetor kooperiert. Die Firma arbeitet eng mit Mobilfunkbetreibern zusammen, um mittels Informationen der Mobilfunkbetreiber die aktuelle Auslastung des Mobilfunknetzes zu erfassen. Ziel davon ist es, eine möglichst genaue Angabe der Auslastung des Mobilfunknetzes festzustellen und daraus eine 3D Karte von Mobilfunk-Signalparametern zu generieren. Anhand dieser Information soll vor einem möglichen UAV Flug über das Mobilfunknetz die zu erwartende Signalqualität auf der geplanten Route evaluiert werden. Das Ziel der Firma ist, dass diese Software ein Bestandteil von zukünftigen UTM Systemen sowie des zukünftigen U-Space (siehe Kapitel 2.6) wird.

Aufgrund einer Geheimhaltungserklärung ist es nicht möglich, solche Karten hier zu präsentieren. Allerdings wurde seitens der Firma Dimetor ebenfalls eine Auswertung von Messdaten der UAV-Flüge vorgenommen. Davon können Abbildungen hier gezeigt werden. Als Basis diente hierfür eine Messung, die mittels eines Smartphones (Mi A2 Lite) im Ikarus C42 durchgeführt wurde. Der Flug fand am 06.02.2019 statt und führte vom Flugfeld Weiz-Unterfladnitz entlang der A2 von Ilz nach Oberwart und von dort zum Flugplatz Pinkafeld. Dort wurde durchgestartet und danach die Messung abgebrochen. Das Ergebnis ist in diesem Fall besonders spannend, da nur LTE-Messwerte aufgezeichnet wurden, also eine Umschaltung auf UMTS oder GSM von Seite des Smartphones deaktiviert war.

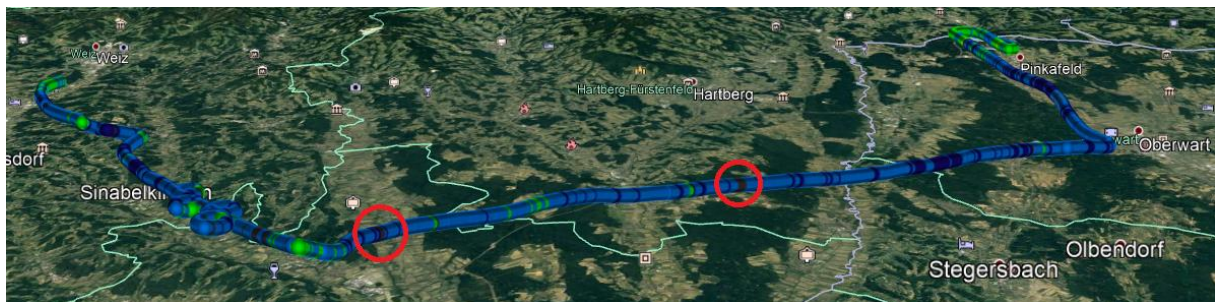


Abbildung 6.33: Flugroute zwischen Weiz und Pinkafeld mit Markierung von zwei kurzen Ausfällen

In Abbildung 6.33 ist der Flugstrecke anhand von Messpunkten für den RSRP Wert nachgezeichnet. Während der gesamten Messdauer von 45 Minuten und 21 Sekunden konnte das Smartphone für eine gesamte Dauer von 51 Sekunden keine Verbindung herstellen. Dabei gab es fünf kurze Ausfälle kleiner als 3 s sowie 9 längere Ausfälle größer als 3 s. Die längsten beiden Ausfälle sind in Abbildung 6.33 Rot markiert und betragen 7 bzw. 9 s.

Die Firma Dimetor hat die Grafik in Abbildung 6.34 bereitgestellt und der Publikation zugestimmt. Es ist anhand der Grafik erkennbar, dass die Zellen, in denen das Smartphone eingeloggt war, sich häufig ändern. Dies bestätigt die Ergebnisse insofern, dass, wie in Kapitel 6.2 beschrieben, sich die Zellstruktur in der Luft ändert. Die Form der Zellen lässt sich daher in der Luft nicht mehr vorherbestimmen und es kommt vermehrt zu Umbuchungen (Handover). In manchen Abschnitten des Fluges war das Smartphone mit über 12 km weit entfernten Zellen (rot) verbunden. Eine weitere wichtige Erkenntnis ist die deutlich stabilere Verbindung neben der Autobahn, wo das Mobilfunknetz auf viele mobile Verbindungen optimiert ist. Im Zeitraum des Fluges neben der Autobahn kam es zu keinen Aussetzern.

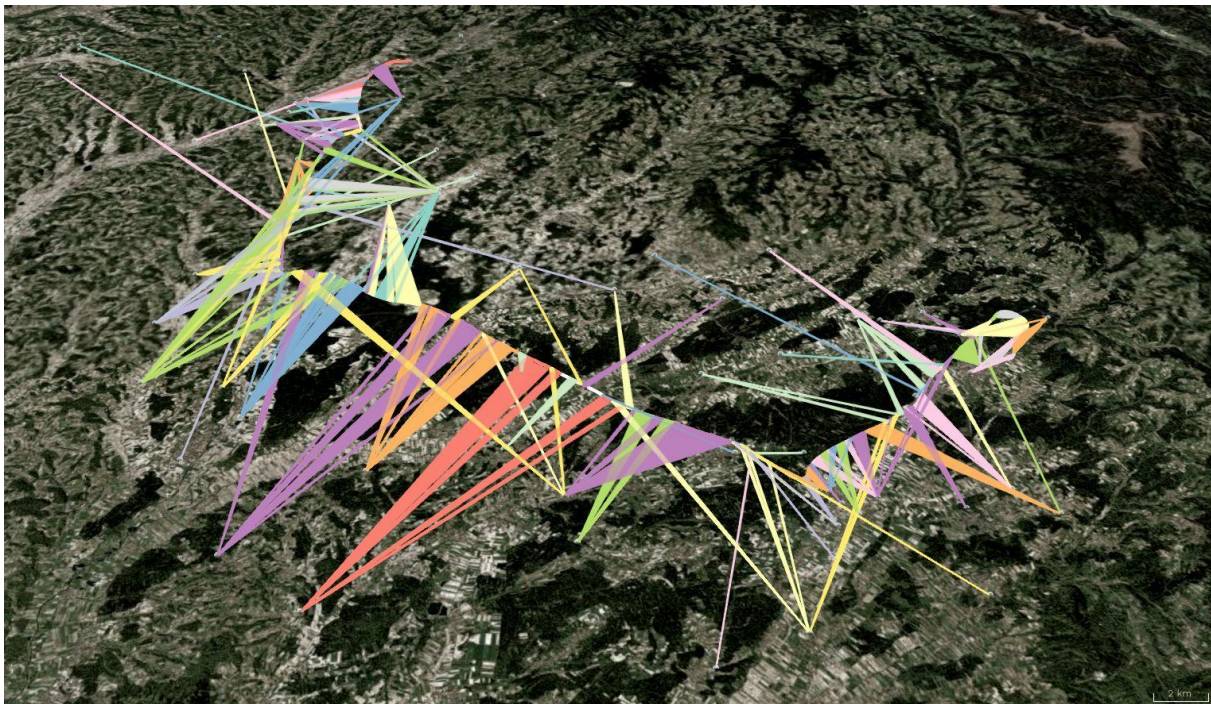


Abbildung 6.34: Darstellung der jeweils aktiven Zellen (farblich codiert) während des gesamten Fluges
© Dimetor

In Abbildung 6.35 sind die Verläufe der Parameter RSRP und RSRQ sowie die Höhe festgehalten. Es ist für die Parameter RSRP und RSRQ ein linearer Mittelwert hinzugefügt, um die grundsätzlich gute Empfangsstatistik hervorzuheben. Die Maximalwerte von RSRP (-200 dBm) und RSRQ (-20 dB) wurden bei Signalausfällen aufgezeichnet. Daher ist die Standardabweichung speziell bei RSRP eher hoch. Anhand der Trendlinien in Abbildung 6.35 oben erkennt man jedoch gut, dass der Median von RSRP und RSRQ ein gutes Ergebnis für die Signalqualität während des Fluges darstellt. Der Tabelle im Anhang nach bedeuten -97 dBm eine stabile Verbindung mit maximal möglichen 25 Mbit/s für den Down- und maximal 7 MBit/s für den Upload.

Tabelle 6.11: Zusammenfassung der erfassten Parameter aus dem Testflug

Kenngröße	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	RSSI (dB)
Mittelwert	-99,82	-14,00	-69,06
Standardabweichung	17,12	3,11	2,54
Median	-97	-14	-69
Max	-80	-5	-63
Min	-200	-20	-69

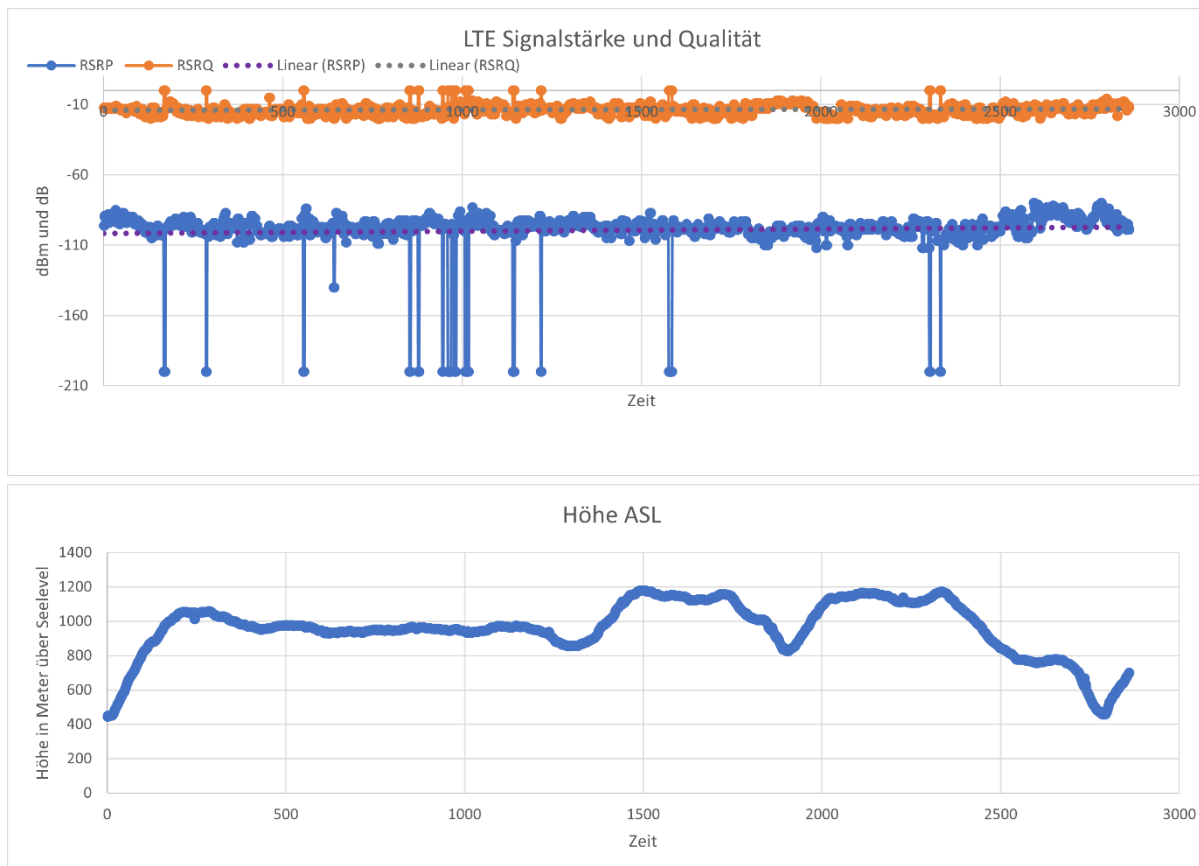


Abbildung 6.35: RSRP und RSRQ sowie das Höhenprofil während des Fluges zwischen Weiz und Pinkafeld

6.5 Evaluierung der IT-Security von UAV-Datenlinks

Ein Punkt, der hier nur kurz diskutiert werden soll, ist der Security Aspekt. Cybersecurity ist vor allem seit der Einführung der Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) und diversen großen Cyberangriffen für viele zumindest ein Begriff. Die große Gefahr, die davon ausgeht, ist aber vielen Menschen immer noch nicht bewusst. Die laut der Presse größten Hacking Attacks, fielen 2013 auf Yahoo mit 270 Millionen gestohlenen Kunden- sowie 2008 auf Heartland Payment Systems, mit 130 Millionen gestohlenen Kreditkarten-Daten [246].

Da der Markt für UAVs stetig wächst und viele Firmen mit den neuen EASA Regularien (siehe Kapitel 2.3) ebenfalls in diesen Markt vorstoßen werden, muss man allgemein auch die Security von UAVs hinterfragen. Als erstes muss man analysieren, auf welche Art und Weise

man ein UAV kompromittieren kann. Ein UAV, das mit einem Flugregler ausgestattet ist, ist wie ein kleiner Computer zu betrachten. Im Flugregler läuft meist ein Linux-basiertes Betriebssystem und sollte man, wie in dieser Arbeit betrachtet, Mobilfunk einsetzen, kommuniziert das UAV über klassische Netzwerkprotokolle (z.B. TCP/IP). Da es eher unwahrscheinlich ist, dass potenzielle Angreifer ein UAV am Boden manipulieren, geht die größte Gefahr vom Datenlink aus. Betrachtet man die aus Kapitel 4.2 genannten kommerziellen und aus dem Modellbau abgeleiteten Fernsteuerungen, werden Frequenzspreizverfahren DSSS und FHSS verwendet. Es ist grundsätzlich nicht einfach eines der beiden Verfahren zu kompromittieren. Allerdings bewies auf dem Security-Analyst-Summit der Sicherheitsexperte Jonathan Andersson, dass es mittels Software Defined Radio (SDR)-Modulen und dem notwendigen Hintergrundwissen sehr wohl möglich sei, ein UAV zu übernehmen [247] und [248]. Das verwendete Gerät nannte Anderson „Ikarus“.

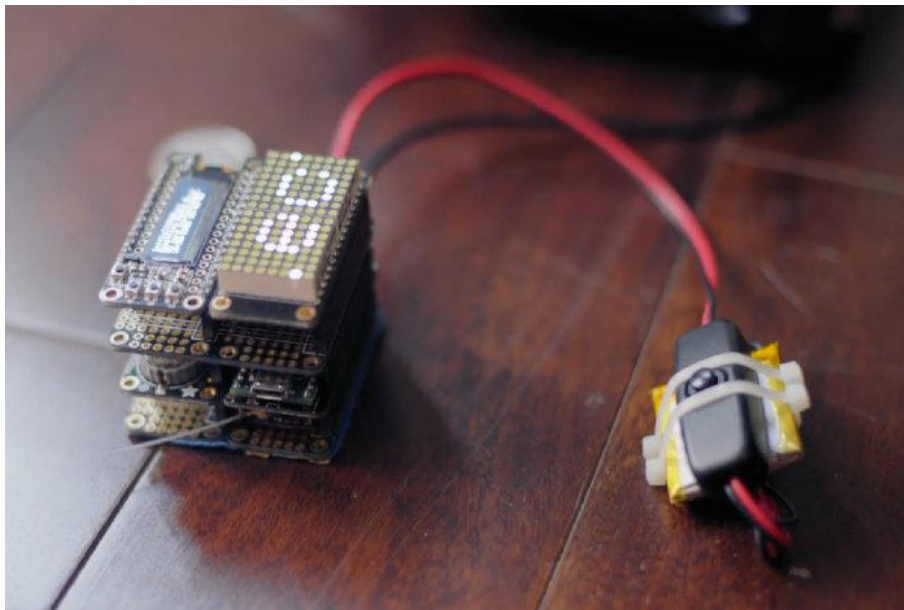


Abbildung 6.36: Mit dem Ikarus soll es möglich sein, DSSS Fernsteuerungen zu entschlüsseln [247]

Dieses Gerät ist aus heutiger Sicht (Jänner 2021) nicht offiziell erhältlich. Wäre dieser „Hack“ mit diesem Gerät durchführbar, würde ein Großteil aller erhältlichen Consumer- sowie kommerziell eingesetzter UAVs davon betroffen sein. Mit einem einfach erhältlichen SDR, wie z.B. dem HackRF und Erfahrung im Bereich Signalverarbeitung besteht definitiv die Möglichkeit, ein FHSS Signal zu übernehmen.

Neben dieser potenziellen Gefahr des „Ikarus“ gibt es auch noch andere Möglichkeiten, ein UAV zu kompromittieren. Dabei geht man nicht den Weg, direkt den C2-Link zu manipulieren, sondern konzentriert sich auf den Telemetrie-Link. Dieser Link wird für die Statusinformation von UAVs wie Lage im Raum, Position (GPS), Heading, Speed over Ground (SOG) etc. verwendet. Weiters verwendet man diesen Link auch, um dem FCS neue Wegpunkte zu schicken, oder die Flugparameter während des autonomen Fluges wie Flughöhe oder SOG zu variieren.

Die verwendete Drahtlos-Technologie für den Telemetrie-Datenlink weist oft keine oder nur geringe Sicherheitsmechanismen auf. Eine Manipulation bzw. eine Kompromittierung des

Telemetrie-Links scheint daher der derzeit einfachste Weg zu sein, die Kontrolle eines UAVs zu übernehmen.

Anhand von Einträgen im Internet zeigt sich weiters eine Lücke im „MAVLink“ Protokoll, die es ermöglicht, ein UAV zu übernehmen [249]. Hierbei handelt es sich aber wiederum um eine Manipulation des Telemetrie-Datenlinks. Eine weitere Möglichkeit diesen zu kompromittieren besteht, wenn z.B. ein Smartphone oder Tablet als Anzeige verwendet wird. Der Datenlink zwischen RC und UAV mag ausreichend sicher sein. Die Fernsteuerung verbindet sich dann jedoch oft über eine nicht ausreichend gesicherte WiFi Verbindung zum Smartphone/Tablet. Dort gibt es oft nur einfache (veraltete) WEP Verschlüsselungen oder, sofern WPA verwendet wird, wird oft nur ein schwaches Passwort gesetzt, das seitens der Anwender nie geändert wird.

Auch hier wäre es möglich, mithilfe eines Raspberry Pi 4 den WiFi-Link zu hacken [250]. Es gibt dafür eine Kali Linux Version für Raspberry Pi, die entsprechende Hacking Tools bereits vorinstalliert hat. Ist diese auf dem Pi installiert, kann man entweder den integrierten WiFi Adapter des Pis oder, für größere Reichweiten, einen externen WiFi-Adapter dafür einsetzen, WiFi-Netzwerke in der Umgebung aufzuspüren. Die Adapter müssen dafür in einen sogenannten „Monitoring Mode“ schaltbar sein. Dies trifft auf den integrierten WiFi-Adapter des Pis und diverse andere Modelle zu. Die SSIDs der Fernsteuerungen sind oft sehr einfach zu identifizieren und haben Herstellerspezifische Namen. Mittels in Kali Linux integrierten Tools kann man dann eine Paket Injektion durchführen. Durch die Paket Injektion kann mittels Brute Force in weiterer Folge das Passwort ermittelt werden. Somit kann man das Passwort knacken und sich schlussendlich in das Netzwerk einklinken. Ist man im Netzwerk, kann man den Daten Traffic beliebig manipulieren. Das bedeutet, es wäre möglich, dem UAV einen neuen Wegpunkt zu geben und gleichzeitig die Eingabe der Fernsteuerung zu deaktivieren.

Bei der Verwendung von Mobilfunk als UAV-Datenlink ist man bezüglich der Funkübertragung von den Security Mechanismen seitens des Mobilfunkstandards abhängig. Die LTE-Datenverbindung gilt grundsätzlich auch als sicher, da besonders viel Wert auf eine Verschlüsselung der Übertragung gelegt wurde. Beim Verbindungsaufbau wird über die SIM-Karte, der für den Nutzer ein Schlüssel generiert. Die Verbindung selbst wird mittels eines symmetrischen Verschlüsselungsverfahrens A5/3 [251] verschlüsselt. Bei GSM wurde die Identifizierung lediglich über das Endgerät durchgeführt. Das führte zum Problem, dass es mittels eines sogenannten IMSI-Catchers möglich war, die auf der SIM-Karte gespeicherte International Mobile Subscriber Identity (IMSI) auszulesen [251]. Dabei wählt sich das UE in eine falsche Funkzelle (den IMSI-Catcher), über die dann die Verschlüsselung deaktiviert werden kann.

Bei UMTS wurde das Verschlüsselungsverfahren durch den KASUMI Algorithmus [252] ersetzt. Dabei handelt es sich um eine paketorientierte Verschlüsselung mittels 64 Bit Schlüssel. Es wird jedes Datenpaket separat verschlüsselt, was eine sehr hohe Sicherheit garantiert. Mit LTE wurde eine Kombination aus TCP/IP und kryptografischen Algorithmen UEA2 bzw. UIA2 implementiert [251]. Diese Verfahren bieten eine Verschlüsselung mit 128 Bit Schlüssel.

Laut [253] gibt es in LTE aufgrund der fehlenden Layer 1-Sicherheitsmechanismen Möglichkeiten, mittels LTE-Relay sich zwischen Teilnehmer und Basisstation zu schalten. Solche LTE-Relays könnten versierte Angreifer aus Software Defined Radios herstellen. Dabei wäre es möglich, den Datenverkehr zu analysieren, jedoch nicht die Daten selbst zu entschlüsseln. Um solche Angriffsszenarien im künftigen 5G Standard zu unterbinden, werden diese Angriffsmöglichkeiten an 3GPP gemeldet, um die neuen Standards gegen solche Attacken abzusichern.

Somit kann zusammengefasst werden, dass der Mobilfunkstandard grundsätzlich gut abgesichert ist, was wiederum zusätzlich für einen Einsatz bei UAVs spricht. Man muss jedoch aufpassen, dass man nicht andere Lücken bietet. Beispielsweise bei Verwendung eines Servers mit öffentlicher IP, über den die Kommunikation mit dem UAV läuft, wäre es fatal, ein schwaches Passwort zu verwenden. So könnte der Server kompromittiert werden und ein Angreifer hätte direkten Zugriff auf die MAVLink Protokolle und somit auf das UAV.

7 Diskussion und Folgerungen

In den Kapiteln 4.1 bis 4.3 wurden die aeronautischen Datenlinks, sowie Funktechnologien für zivile UAVs präsentiert. Aufgrund der veralteten, schmalbandigen und schon derzeit am Limit operierenden Technologien in der zivilen Luftfahrt ist es aus derzeitiger Sicht nicht möglich, diese Technologien auch für zivile UAVs einzusetzen. Weiters ist aeronautische Hardware nicht frei im Handel verfügbar und entsprechend teuer. Zukünftige aeronautische Datenlinks – wie das angesprochene LDACs – wären eine Option für die UAVs, die in die Certified Kategorie fallen. Allerdings ist aus jetziger Sicht (Jänner 2021) noch nicht absehbar, wann diese Technologie kommerziell verfügbar sein wird. Somit wird im Bereich ziviler UAVs primär auf COTS-Hard- und Software zurückgegriffen. Eine Diskussion der verschiedenen Ansätze für Kommunikationslösungen ist im folgenden Kapitel dargestellt. Anschließend folgen im Kapitel 7.2 Bewertungskriterien anhand einer SWOT-Analyse. Abschließend werden im Kapitel 7.3 Vorteile der Anwendung von Mobilfunk als UAV-Datenlink erläutert.

7.1 Übersicht der verschiedenen Ansätze

Ein Großteil der zivilen UAV-Anwendungen wird in Zukunft in der OPEN-Kategorie zugeordnet sein. Das betrifft Hobby-Piloten mit Kamera-UAVs wie auch kommerzielle Anwender, die ihre UAVs im Sichtbereich operieren. Dafür wären grundsätzlich die aktuellen Technologien abgeleitet aus dem Modellbau ausreichend, wenn es rein um die Steuerung der UAVs geht. Für die SPECIFIC-Kategorie gibt es aus derzeitiger Sicht keine dedizierte Hardware für den Datenlink. Dabei kommen neben Modellbau-Komponenten spezielle Longrange-Funkmodule zum Einsatz, die nicht immer die rechtlichen Rahmenbedingungen erfüllen, da sie, um die großen Reichweiten abzudecken, oft mit mehr Sendeleistung operieren, als seitens der Behörden erlaubt ist. Dies birgt große Gefahren für andere, auf diesen Frequenzen operierenden Diensten aufgrund von Störungen in diesen Frequenzbändern.

In weiterer Folge wurde in den Kapiteln 5.1.1 bis 5.1.3 Forschungsprojekte präsentiert, die unterschiedliche Ansätze für UAV-Datenlinks verfolgt haben. Dabei wurde auf COTS-Hardware-Komponenten aufgrund der hohen Verfügbarkeit und des niedrigen Preises gelegt. Folgende Ansätze wurden evaluiert:

1. **Dedizierte Funkhardware** im 2,4 GHz ISM Frequenzband
2. Hochflexible Funkhardware auf Basis von **Software Defined Radio (SDR)**
3. Kombination aus **LoRa und 2G-Technologie** als Backup zu Modellbau RCs
4. Kombination auf Modellbau **RCs und LTE-Modulen**

Der im ersten Ansatz verfolgte Bau einer dedizierten Hardware in einem bestimmten Frequenzband unterliegt denselben Einschränkungen wie kommerzielle Hardware. Die Anwendung ist auf einen bestimmten Frequenzbereich beschränkt und unterliegt somit den Regularien der Behörde (RTR) für dieses Frequenzband. Das bedeutet, die maximale Sendeleistung und somit die maximale Reichweite ist vorgegeben.

Ein Software Defined Radio (SDR) wie im zweiten Ansatz angewendet, hat ein flexibles HF-Frontend, das per Software augenblicklich geändert werden kann. Damit ist es möglich, den

gesamten Drahtlos-Kommunikationspfad wie in Abbildung 4.8 dargestellt, von der Modulation über die Kodierung bis zum HF-Frontend auf Knopfdruck zu ändern. Neben der Tatsache, dass man dafür leistungsstarke Hardware benötigt, muss die Funktionalität zuvor programmiert werden, was wiederum Fehlerpotential bietet. Am Ende erhält man ein hochflexibles, jedoch auch hochkomplexes System, das wiederum die gleichen Einschränkungen (Sendeleistung und somit Reichweite) aufweist, wie jene beim Ansatz in Punkt 1. Außerdem darf man nicht beliebige Sende-Frequenzen verwenden, sondern ist hier ebenso an die Frequenzvorgaben der RTR [179] gebunden. Es gibt derzeit auch kein dediziertes Frequenzband, das exklusiv für UAV Anwendungen bereitgestellt wurde.

Im dritten Ansatz wurden die Technologien LoRa und 2G (GSM) als Backup-Datenlink für ein auf *Single-Board-Computer* (SBC) basierendes *Flight-Control-System* (FCS) angewendet. Der Funktionsumfang war vor allem im Bereich Bandbreite stark limitiert, zeigte in ersten Tests jedoch ein gutes Reichweitenverhalten. Die sehr geringen Datenraten sowie die Ungewissheit der Zukunft des 2G Mobilfunknetzes machten eine Modernisierung dieses Ansatzes notwendig.

Im vierten Ansatz wurde neben klassischen RCs als primärer Datenlink auch auf Mobilfunk der dritten (3G, UMTS) und vierten (LTE) Generation als sekundären Datenlink gesetzt. Vor allem die Kombination aus direkter Steuerung über RC und Fly-by-Wire-, bzw. Wegpunkt-Steuerung über das Mobilfunk-Netz war der erfolversprechendste Ansatz. Dies konnte auch in einem erfolgreichen UAV-Testflug gemeinsam mit der Austro Control als Partner am Flughafen Klagenfurt unter Beweis gestellt werden.

Mittlerweile haben diverse Firmen wie beispielsweise Botlink [22] oder Globe UAV [21] das Potential von Mobilfunk für UAVs bereits erkannt und bieten Hardware-Gesamtpakete an, obwohl dies offiziell seitens der Behörden weder empfohlen bzw. genehmigt wurde. Weiters gibt es auch Firmen wie Dimetor, die in Kooperation mit Mobilfunkbetreibern den Status des Mobilfunknetzes in grafische Darstellung für UAV-Betreiber bereitstellen können. Somit kann vor einem UAV-Flug über das Mobilfunknetz untersucht werden, ob die Signalqualität auf der geplanten Route ausreichend gegeben ist.

Es gibt seitens namhafter Hersteller wie Rohde und Schwarz mobilfunkspezifisches Messequipment wie Endgerät-, Infrastruktur-, Protokolltester und viele mehr [254]. Abgesehen von teuren Anschaffungskosten wäre es nicht möglich gewesen, mit diesen Messgeräten eine Evaluierung im sehr niedrigen Luftbereich (Very Low-Level Airspace, VVL) durchzuführen. Einerseits wären die Geräte zu schwer und andererseits wäre eine Energieversorgung im UAV nicht möglich gewesen. Da es, wie in Kapitel 1.3 eingangs erwähnt, noch keine dedizierte Hardware für UAV-Datenlinks gibt und voraussichtlich auch in naher Zukunft noch nicht geben wird, wird im Falle eines Einsatzes der Mobilfunktechnik für UAVs auch auf COTS Komponenten zurückgegriffen. Darunter fallen LTE USB-Dongle wie auch LTE-Modems und Router aus dem IoT-Bereich. Aus diesem Grund wurden bewusst alle Messungen mittels COTS-Hardware durchgeführt.

Die Messergebnisse zeigen, dass es eine ausreichend gute Signalqualität bis 150 m AGL und darüber gibt. Die Zellstruktur ändert sich allerdings mit der Höhe und daher kommt es häufiger

zu Interferenzen, was zu häufigen Umbuchungen führen kann. Da der Datentransfer über das TCP/IP Protokoll abgewickelt wird, werden verlorene Pakete erneut gesendet. So kann bei erneuter Verbindung die Übertragung der Daten erfolgreich abgeschlossen werden.

Als einzige alternative Technologie, die neben Modellflug-Hardware potenziell als Backup-Datenlink einsetzbar wäre, wurde LoRa analysiert. Die Ergebnisse lagen unter den Erwartungen. Leichte Abdeckung der Antennen führten zu massiven Einbußen bei der Reichweite, was durch einen Testflug evaluiert werden konnte. Auch die Tatsache, dass die Bandbreite sehr reduziert werden muss, um überhaupt höhere Reichweiten zu erzielen und es keine Infrastruktur dafür gibt, sprach für keinen weiteren Einsatz dieser Technologie. Weitere Evaluierungen zu LoRa, wie etwa [255], geben zusätzliche Aussagen über die Zuverlässigkeit. Dabei zeigt sich allgemein die Limitierung in Reichweite und Bandbreite dieser Technologie. Daher wird vom Einsatz von LoRa bei UAVs eher abgeraten. LoRa eignet sich besser bei stationären Low-Power Anwendungen.

Bei Anwendung von Mobilfunk für UAVs spielen die verwendeten Antennen sowie die Antennenanordnung eine wichtige Rolle. Man sollte aufgrund der Kreuz-Polarisation bei Mobilfunk mindestens zwei Antennen um 90° versetzt anbringen. Diese sollten auch in einem Mindestabstand von einer Wellenlänge zu anderen Antennen – beispielweise der RC Empfängerantennen – montiert werden, um Interferenzen zu vermeiden. Ein Problem stellt die Verwendung der Schutzhüllen dar, denn wenn kein homogener Übergang zwischen der Antenne und dem Hüllenmaterial herrscht, hat dies unerwünschte Effekte auf die Antennencharakteristik. Dem könnte entgegengewirkt werden, indem eine der Antennen mit einem homogenen Material in der Hülle gefüllt wird, z. B. mit einem Klebstoff.

Ein weiterer, noch nicht genannter Punkt ist die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Im Projekt DEMONA wurde beispielsweise eine große Anzahl an Systemen (siehe dazu in Kapitel 5.1.3) in einem UAV verbaut. Dies führte bei Reichweitentests, die vor einem Start mittels eines speziellen Programms der Fernsteuerung durchgeführt werden, zu massiver Verschlechterung der Empfangseigenschaften am UAV bezüglich der Steuerkommandos des RCs. Daraufhin wurde die gesamte DEMONA Hardware in der HF-Messkammer der FH JOANNEUM auf ihre EMV Eigenschaften untersucht. Es wurde dabei untersucht, ob Teilsysteme in den funkrelevanten Frequenzbereich Störsignale einstreuen. Dabei konnten unerwünschte Einflüsse im Bereich unter 1 GHz festgestellt werden. Um solchen Störungen entgegenzuwirken, ist es ratsam, störende Hardware z.B. mit Alufolie zu isolieren sowie eine gute Platzierung der Antennen zu wählen. Diese sollten dabei außerhalb des UAVs in ausreichend großen Abstand zueinander angebracht sein. Weiters sollten RC- und Mobilfunk-Antennen in 90° zueinander angebracht werden. RCs nutzen Antennen-Diversität und Mobilfunk ist kreuzpolarisiert. Auf diese Weise kann man den Empfang optimieren.

Beim Einsatz von großen UAVs wird das Mitführen von Transpondern empfohlen. Es gibt mittlerweile entsprechend kleine ADS-B und Mode-S Transponder, die man bei UAVs einsetzen kann. Im Projekt DEMONA wurde am DEMONA-UAV ein Ping200Sr Transponder installiert. Dieser wurde mit einem seitens der Austro Control bereitgestellten internationalen 24 Bit ICAO Code programmiert. In Testflügen im Raum Weiz mit dem Leichtflugzeug Ikarus

C42 wurde die Funktionalität erfolgreich überprüft. Der Transponder war am Flughafen Graz sichtbar. Die Position und der ICAO Code wurde seitens des Flughafen Graz bestätigt. Der Transponder kam auch beim Testflug des DEMONA-UAVs am Flughafen Klagenfurt zum Einsatz. Auch dort konnten die Fluglotsen das Transpondersignal des UAVs im Tower verfolgen. Das Problem bei ADS-B und Mode-S ist jedoch die Höhe. Wenn UAVs damit im urbanen Gebiet fliegen, können die Transpondersignale unmöglich an Flughäfen empfangen werden. Um Transponder also flächendeckend einzusetzen, wäre eine größere ADS-B und Mode-S Infrastruktur notwendig. Auch hier wäre der Mobilfunk eine gute Option, eine UAV zu lokalisieren und zu verfolgen. Anhand der Registrierung des Mobilfunkteilnehmers an den Mobilfunkstationen kann die Position ausreichend genau bestimmt werden.

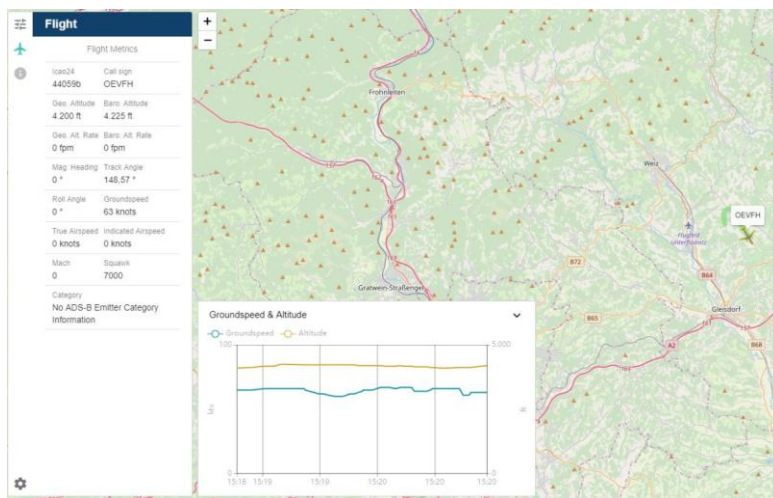


Abbildung 7.1: Vom Flughafen Graz empfangene Transponderdaten (links) und der Pink200Sr Transponder [256] (rechts)

7.2 Bewertungskriterien

Um ein möglichst wertfreies Urteil für den Einsatz der Mobilfunktechnik für UAVs herzuleiten, soll anhand der Kriterien Objektivität, Reliabilität, Validität sowie Handhabbarkeit eine kurze Untersuchung angestellt werden. Zum Abschluss ist eine SWOT Analyse angeführt.

7.2.1 Objektivität

Die Mobilfunktechnologie ist neben der Satellitenkommunikation die einzige öffentliche drahtlose Kommunikationstechnologie, die über eine ausreichend große Infrastruktur verfügt, um in großen Teilen der Welt flächendeckend eingesetzt zu werden. Für einen großflächigen Einsatz von UAVs, der mit durch die neuen EASA Regularien ab 2021 (Siehe Kapitel 2.3) möglich wird, kann für zivile UAVs nur eine dieser beiden Technologien zum Einsatz kommen. Der Vorteil der Mobilfunktechnik ist die deutlich günstigere Anwendung bei einer deutlich höheren Datenrate. Allerdings gibt es noch kaum Mobilfunkendgeräte (Modems), die einfach bei UAVs eingesetzt werden können. Bei Satcom gibt es einiges an Hardware, die auch bei UAVs zum Einsatz kommt, jedoch primär aus dem militärischen Sektor. Zur Einschätzung sei eine Satcom Hardware der Firma Honeywell genannt. Deren „Small UAV Satcom“ System wiegt ein Kilogramm, benötigt 44 Watt im Betrieb und stellt eine maximale Datenrate von 200 kBit/s bereit [257]. Dazu kommen die Inmarsat Betriebsgebühren die laut [258] bei 2 bis 4,8 €

pro MB liegen und über Prepaid Sim Karten angeschafft werden müssen. Als Vergleich sei der LTE USB-Dongle ZTE MF831 aus Abbildung 5.11 angeführt. Dieser wiegt 28g und kann aufgrund der USB-Typ 2.0 Spezifikation maximal 2,5 W abgeben. Ist dieser an einem FCS wie dem Raspberry Pi samt NAVIO2 angeschlossen, benötigt das gesamte System weniger als 15 W. Der LTE USB-Dongle ist dabei mit CAT4 klassifiziert, was Datenraten von maximal 150 Mbit/s im down- und 50 Mbit/s im Upload erlaubt. Die Kosten sind je Provider unterschiedlich, belaufen sich aber bei reinen Data Only Tarifen im Bereich 15 (25 GB Limit) bis 45 € monatlich (unlimitierte Daten).

7.2.2 Validität

Aufgrund der durchgeführten Messungen mittels Smartphones und der dabei ermittelten Ergebnisse kann eine Grundaussage über die Verfügbarkeit des Mobilfunknetzes getroffen werden. Diese Aussage ist, dass das Mobilfunknetz bis in Höhen von 150 m AGL ausreichend zur Verfügung steht, wenn auch nicht flächendeckend. Inwieweit die Zellstruktur sich in der Höhe verändert lässt sich nicht bestimmen. Aufgrund neuer im Mobilfunk implementierter Techniken wie Beamforming ist das Mobilfunknetz hochdynamisch. Bei der Genauigkeit der Messung wurden bewusst Abstriche in Kauf genommen, da kein professionelles Messequipment vorhanden war und damit auch keine Messflüge mit UAVs durchführbar gewesen wären. Da auch mehrfach ein UAV über Mobilfunk gesteuert wurde, gilt dies als Proof-of-Concept. Es gibt mittlerweile Firmen, die kommerzielle Datenlinkmodule basierend auf Mobilfunk für UAVs anbieten. Damit wird diese Technologie für viele Anwender zugänglicher. Allerdings gab es auch Probleme mit Verbindungsabbrüchen, was wiederum gegen den alleinigen Einsatz spricht. Das bedeutet, man muss sich Gedanken über Redundanzen bezüglich des Datenlinks machen.

7.2.3 Reliabilität

Da das Mobilfunknetz hochdynamisch ist, können Messwerte, die am selben Ort zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen wurden, sich voneinander unterscheiden. Trotzdem wurden bei den UAV Flügen jederzeit Signalparameter aufgezeichnet, was die grundlegende Verfügbarkeit in der Luft belegt. Selbst bei großräumigen Flügen mit dem Leichtflugzeug konnten in Höhen bis 1000 m AGL bei Messungen durchwegs gute Signalstärken festgestellt werden. Lediglich etwa 1,5% aller Messwerte deuteten auf Signalausfälle hin.

7.2.4 Handhabbarkeit

Der Zugang zu dieser Technologie ist grundsätzlich einfach. Die Implementierung davon bei UAVs jedoch nicht trivial. Das bedeutet, wenn man sich nicht ein UAV Komplettsystem von GlobeUAV [21] oder ein fertiges LTE-Modul für UAVs von Botlink [22] zulegt, muss man mit Grundlagen der Netzwerktechnik, Mobilfunktechnik und unterschiedlicher Software vertraut sein, um ein funktionierendes Gesamtsystem in Betrieb zu nehmen.

7.2.5 SWOT-Analyse

Die SWOT Analyse soll einen schnellen Überblick über die Vor- und Nachteile des Einsatzes der Mobilfunktechnik bei UAVs geben. Die einzelnen genannten Eigenschaften wurden auch

in der Diskussion zuvor erwähnt, deshalb wird hier nicht näher auf die einzelnen Punkte eingegangen.

SWOT-Analyse



Abbildung 7.2: SWOT Analyse für dem Einsatz von Mobilfunk für UAVs

7.3 Eignung von Mobilfunk als Datenlink für UAVs

Anhand der gesammelten Messergebnisse sowie der Erkenntnisse aus den Forschungsprojekten lässt sich dieser Punkt grundsätzlich mit ja beantworten, allerdings mit Einschränkungen. In der zivilen Luftfahrt, wo Sicherheit die größte Rolle spielt, sind Robustheiten von Systemen von 99,9% gefordert. Diese hohen Verfügbarkeiten, wie sie bei Hard- und Software in der klassischen zivilen Luftfahrt vorkommen, sind für UAVs nicht realisierbar. Die operationellen aeronautischen Datenlinks wie VDL-Mode 2, VDL-Mode 4, HFDL und Mode-S sind rein für die zivile Luftfahrt bestimmt und sind dabei schon am Limit. Bis zukünftige Standards wie LDACs in den operationellen Dienst gehen kann es noch Jahre dauern. Und selbst dann kann jetzt noch nicht vorhergesagt werden, ob diese Technologie dann neben dem Einsatz in der zivilen Luftfahrt noch Reserven für UAV-Anwendungen bietet. Gerade in den UAV-Kategorien SPECIFIC und CERTIFIED werden Alternativen zu den in Kapitel 4.3 vorgestellten Technologien notwendig werden.

7.3.1 Bezug auf die UAV-Kategorien

Zuallererst muss überlegt werden, für welche UAV-Kategorie die Mobilfunk-Technik geeignet wäre. Da in der OPEN-Kategorie keine BVLOS-Flüge erlaubt sind, ist ein Einsatz hierbei nicht notwendig. Das größte Anwendungspotential besteht in der SPECIFIC-Kategorie. Gerade die

Vielzahl an Use-Cases (siehe Tabelle 7.1) und die Option der Realisierung eines BVLOS-Datenlinks mittels Mobilfunks, bringen viele mögliche Anwendungen mit sich. Im Zulassungsprozess (siehe dazu 2.3.2) muss man in der für die SPECIFIC-Kategorie notwendigen SORA (siehe dazu 2.5) entsprechende Redundanzen für den Datenlink vorsehen. Auch wenn keine kontinuierliche und unterbrechungsfreie Datenverbindung garantiert werden kann, muss im Zulassungsprozess auf allfällige Notfallszenarien eingegangen werden. Das umfasst vorprogrammierte und automatisierte Aufgaben des FCS wie etwa ein „wait for reconnect“, „hold position“ oder „coming home“ je nach Dauer des Datenlink-Ausfalls. Für extreme Notfälle, wo keine erneute Datenverbindung zum UAV hergestellt werden kann, muss ein Fallschirm mitgeführt werden, um Schäden jeglicher Art zu minimieren.

Die CERTIFIED-Kategorie ist bis zum aktuellen Stand (Jänner 2021) nicht fertig spezifiziert. Ein Einsatz von Mobilfunk in dieser Kategorie wäre zwar grundsätzlich möglich, da allerdings die Zulassungsbedingungen an die, der zivilen Luftfahrt angelehnt sind, scheint dies aus jetziger Sicht als eher unwahrscheinlich. Die Zulassungsbedingungen orientieren sich dabei, wie im Kapitel 3.1.5 bei Autonomen Flugtaxi erläutert, an den Empfehlungen der SAE, den ARP4754A [110]. Darin wird festgehalten, dass aeronautische Hard- und Software jeweils Luftfahrt-zertifiziert entwickelt und hergestellt werden müssen, was wiederum bei Mobilfunk nicht der Fall ist.

Seitens der ICAO wurde 2015 auf einem Symposium das Thema C2-Datenlink für UAVs behandelt [157]. Dabei wurde festgehalten, dass der C2-Datenlink grundsätzlich seitens der Betreiber zulassungspflichtig ist und nicht die Technik an sich. Das würde wiederum eine Zulassungspflicht für die Netzanbieter bedeuten und nicht für die Mobilfunktechnik selbst. Die Frage wie sich diese Vorschläge seitens der ICAO mit den neuen EASA UAV-Richtlinien harmonisieren bleibt hier allerdings offen.

7.3.2 Ergänzende Maßnahmen für den Einsatz von Mobilfunk

Um einen hohen Sicherheitsstandard für UAVs in der SPECIFIC-Kategorie zu erreichen, muss man hier auf Redundanzen setzen. Im Fall des UAV-Datenlinks betrifft das z.B. den Einsatz von unterschiedlichen Technologien. Das bedeutet einerseits die Anwendung von klassischen RCs für manuelle Start- und Landevorgänge – oder auch nur als Backup – sowie andererseits eine Mobilfunkanbindung für den (autonomen) Streckenflug. Gerade bei der Mobilfunkanbindung sollte man auch zusätzliche Redundanzen berücksichtigen, wie etwa den Einsatz mehrerer Provider. Es zeigte sich auch bei den Messungen, dass der Empfang zumindest eines Providers zumeist gegeben war. Dies lässt sich in Zukunft durch die Einführung einer eSim (elektronische SIM [259]) noch leichter lösen. Dabei muss die Mobilfunkhardware (Modem) eSim fähig sein. Seitens der Mobilfunkbetreiber wären die UAV-Business-Cases eine zusätzliche Einnahmequelle. Deshalb wären hier dedizierte SIM-Karten mit garantierter/reservierter Bandbreite eine ideale Voraussetzung für eine sichere und stabile Datenverbindung. Weiters wäre es auch im Sinne eines zukünftigen U-Space Programms (siehe Abbildung 2.11) ratsam, für den UAV-Verkehr spezielle Flugkorridore vorzusehen. Dabei könnte man entsprechende Sendestationen optimiert für den Betrieb für UAVs entlang

dieser Flugkorridore errichten und so für stabile und störungsfreie Datenkommunikation sorgen.

Ein weiterer Use-Case wäre Last-Mile Zustellungen. Dieser von Paketdiensten bevorzugte Einsatzzweck würde in städtischen sowie ländlichen Gebieten zum Einsatz kommen. Hierbei wären keine Flugkorridore möglich. Da von voll autonomen Flügen in geringen Höhen (etwa 50 m AGL) ausgegangen werden kann und kein Live-Bild während des Fluges übertragen werden muss, wäre bei diesen Einsätzen nur eine geringe Datenrate erforderlich. Aus diesem Grund wäre auch hierfür der Einsatz von Mobilfunk möglich, jedoch mit Redundanzen wie zuvor besprochen. Ein weiterer Hoffnungsträger ist die nächste Mobilfunkgeneration, dazu aber mehr im folgenden Kapitel. In der folgenden Tabelle sind mögliche Use-Cases und die dafür infrage kommenden Datenlink-Technologien aufgelistet. Die Tabelle soll die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten für Mobilfunk bei UAVs aufzeigen und ist dabei nicht vollständig. Weitere Use-Cases findet man online [260].

Tabelle 7.1: UAV-Use-Cases mit Einsatzmöglichkeiten für Mobilfunk

Use-Case	UAV-Typen	Steuerung	Einsatzort	Mögliche Datenlink-Technologie	Risiko bei Ausfall des Datenlinks
Agrar-UAV	Starrflügel, Multicopter oder VTOL	Manuell, autonom über Wegpunkte	Unbebaute Gebiete,	RCs und Mobilfunk	Gering
Baustellenfortschritt-überwachung	Multicopter	Fly-by-Wire	Baustellen	RC, Mobilfunk	Gering
Bereitstellung von Datendiensten	High-Endurance Multicopter- oder Starrflügel	Autonom über Wegpunkte	Veranstaltungen, Katastrophengebiete, entlegene Orte ohne Anbindung	Satcom, Richtfunk mittels Mobilfunks	Je nach Einsatzort gering bis hoch
Entertainment (z.B. Lichtshow)	Leichte Multicopter	Autonom über Wegpunkte	Definierter Einsatzort	WiFi	Gering
FPV	Leichte Multicopter	Manuell	Spezielle Rennstrecken	Analog	Gering
Kartographie	Starrflügel, Multicopter oder VTOL	Manuell, Fly-by-Wire, autonom über Wegpunkte	Urbane sowie ländlicher Raum	RC und Mobilfunk	Je nach Einsatzort gering bis hoch
Katastropheneinsatz	Multicopter oder VTOL	Manuell, Fly-by-Wire und autonom über Wegpunkte	Urbane sowie ländlicher Raum	RC, Mobilfunk	Je nach Einsatzort gering bis hoch
Lagerbestandsaufnahme	Kleine Multicopter	Autonom über Wegpunkte	Indoor	WiFi, Mobilfunk	Gering
Medizinische Notfall-lieferungen	Starrflügel, Multicopter oder VTOL	Autonom über Wegpunkte	Urbane sowie ländlicher Raum	Mobilfunk, ev. Satcom	Je nach Einsatzort gering bis hoch

Use-Case	UAV-Typen	Steuerung	Einsatzort	Mögliche Datenlink-Technologie	Risiko bei Ausfall des Datenlinks
Paketzustellung -großräumig	Schwerlast und High-Endurance Multicopter	Autonom über Wegpunkte	Urbane sowie ländlicher Raum	Mobilfunk	Je nach Einsatzort gering bis hoch
Paketzustellung -Last-Mile	Multicopter	Autonom über Wegpunkte	Urbane sowie ländlicher Raum	Mobilfunk	Je nach Einsatzort gering bis hoch
Photographie und Filmaufnahmen	Multicopter	Manuell und Fly-by-Wire	Urbane sowie ländlicher Raum	RC, Mobilfunk	Je nach Einsatzort gering bis hoch
Städteraumplanung	Multicopter	Manuell, Fly-by-Wire, autonom über Wegpunkte	Urbane Raum	RC, Mobilfunk	Hoch
Unterstützung der Exekutive bei Kriminaleinsätzen	Multicopter	Manuell, Fly-by-Wire, autonom über Wegpunkte	Urbane sowie ländlicher Raum	RC, Mobilfunk	Hoch
Verkehrsanlagenwartung	Starrflügel, Multicopter oder VTOL	Manuell, Fly-by-Wire, autonom über Wegpunkte	Urbane sowie ländlicher Raum	RC, Mobilfunk	Mittel
Werbung	Multicopter	Autonom über Wegpunkte	Urbane Raum	Mobilfunk	Mittel
Zustandserfassung – Flugzeuge	Kleine Multicopter	Manuell, Fly-by-Wire, autonom über Wegpunkte	Indoor	WiFi, Mobilfunk	Gering
Zustandserfassung – Gebäude	Kleine Multicopter	Manuell, Fly-by-Wire	Urbane sowie ländlicher Raum	RC, Mobilfunk	Mittel
Zustandserfassung – Mobilfunkstationen	Multicopter	Manuell, Fly-by-Wire	Urbane sowie ländlicher Raum	RC, Mobilfunk	Mittel
Zustandserfassung - Industrieanlagen	Multicopter	Manuell, Fly-by-Wire	Urbane sowie ländlicher Raum	RC, Mobilfunk	Gering

7.3.3 Neuerungen durch zukünftige Mobilfunkstandards

Mobilfunk in der derzeitigen vierten und bald fünften Generation bietet auch für die unbemannte Luftfahrt ein großes Potential. Speziell Mobilfunkunternehmen erhoffen sich spezielle Use Cases, um neue Einnahmequellen lukrieren zu können. Neben hohen Datenraten soll der neue Mobilfunkstandard der fünften Generation (5G) auch sehr niedrige Latenzen unter 10 ms ermöglichen, was speziell für (UAV-)Steueraufgaben ideal wäre. Über

Horizon2020, das ein EU weites Förderprogramm für Innovation war (von 2014 bis 2020), entstand die Plattform 5G Drones. Über dieses Programm sollen seit Juni 2019 Use-Cases für 5G Anwendungen für UAVs definiert werden [261]. Das Konsortium ist sehr groß und umfasst neben Mobilfunkbetreibern auch beispielsweise die Firma Frequentis AG aus Österreich, die sich stark mit dem Thema *Unmanned Traffic Management (UTM)*-Services befasst [262]. Ein UTM-System ist in Zukunft auch fixer Bestandteil des in Kapitel 2.6 erwähnten U-Space Programms.

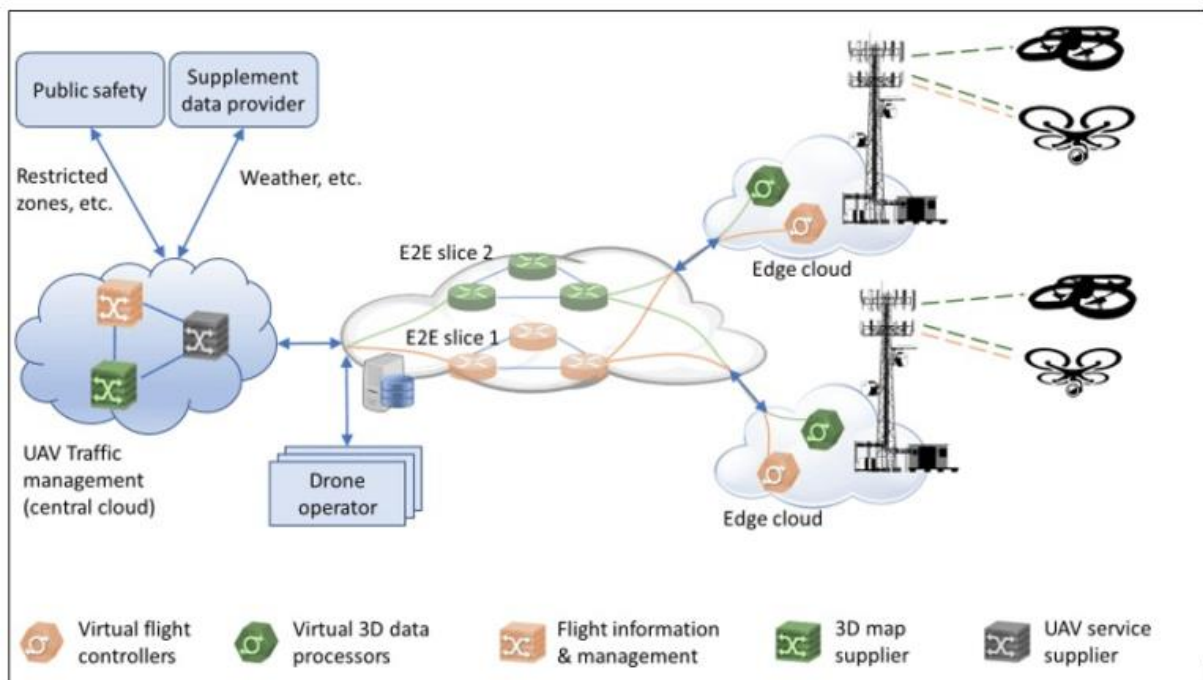


Abbildung 7.3: UAV Traffic Management Use Case

Als Use Cases wären als erstes das UAV Traffic Management genannt. Einen Überblick über den Use Case ist in Abbildung 7.3 zu sehen. Wie schon zuvor erwähnt, kann man Teilnehmer des Mobilfunknetzes anhand von Funkpeilung und über die Einbuchung an einer Funkzelle orten. Damit wäre auch eine Lokalisierung eines UAVs möglich.

Weitere Use Cases wären im Bereich öffentliche Sicherheit gegeben. Im Katastrophenfall können UAVs erste Videoaufnahmen für die Ersthelfer bereitstellen und so einerseits die Sicherheit der Rettungskräfte erhöhen, sowie andererseits über spezielle Kameratechniken wichtige Informationen bereitstellen.

Unter Situationsbewusstsein wird ein weiterer Use Case präsentiert. Dabei geht es unter anderem darum, UAVs mit zusätzlicher Sensorik auszustatten und auf diese Art eine Unzahl an Messdaten zu sammeln. So kann ein Paketlieferungs-UAV mit Luftgütesensoren ausgestattet werden und helfen, die Luftgüte in einer Stadt zu überwachen.

Der letzte genannte Use Case wäre der Einsatz von UAVs bei großen Veranstaltungen. Dabei soll es aber nicht um Überwachung, sondern um Kapazitätserweiterung gehen. Das bedeutet, die UAVs würden selbst kleine Zellen aufspannen und so das Mobilfunknetz für den erhöhten Bedarf erweitern.

Die 5G Technologie bringt sicher noch weitere Vorteile für die Anwendung von UAVs mit sich. Beispielsweise soll es neue Sendefrequenzen im Bereich 700, 850 und 1500 MHz geben. In diesen Frequenzbereichen kann man deutlich höhere Reichweiten erwarten. Weiters soll das Beamforming noch stärker implementiert werden. Dadurch wäre es z.B. auch möglich, die Hauptkeule einer Antenne elektrisch auf das UAV zu optimieren. In Abbildung 7.4 ist eine neue Multiband 5G Antenne abgebildet. Man sieht dabei die oberen Kreuz-Dipol Antennen für 800 MHz und die dahinterliegenden Patchantennen für die höheren Frequenzen über 2 GHz.



Abbildung 7.4: Aufbau einer 5G Multiband-Antenne vorne [263]

7.4 Folgerungen zu den Forschungsfragen

Anhand der gesammelten Ergebnisse soll hier Bezug auf die eingangs gestellten Forschungsfragen aus der Zielsetzung genommen werden:

- **Welche Kommunikationsmodule ermöglichen einen sicheren Betrieb von Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)?**

Aus derzeitiger Sicht kann man dies nicht direkt beantworten. Es kommt auf das Einsatzszenario an. Orientiert man sich dabei an den neuen EASA Regularien, gibt es zwar keine rechtlichen Vorgaben für die eingesetzte Hardware, man kann jedoch für die unterschiedlichen Kategorien Empfehlungen angeben. In der OPEN-Kategorie ist ein Betrieb im Sichtbereich angedacht. Daher sind dort die in Kapitel 4.2 vorgestellten C2-Datenlinks ausreichend. In der SPECIFIC-Kategorie kommt es darauf an, ob man im Sichtbereich (LOS) oder außerhalb des Sichtbereichs (BVLOS) operieren möchte. Innerhalb des Sichtbereichs wird ebenfalls auf die Hardware aus Kapitel 4.2 verwiesen. Für BVLOS-Anwendungen ist aus derzeitiger Sicht zwar keine rechtliche Vorgabe vorhanden, jedoch scheint dafür der Einsatz von Mobilfunk am ehesten geeignet zu sein. Im Hinblick auf die CERTIFIED-Kategorie bleibt

abzuwarten, wie die Behörden entscheiden. Auch hier wäre ein Einsatz von Mobilfunk denkbar. Aufgrund der hohen Gefahr, die im Schadensfall ausgeht, müssen hier jedenfalls Redundanzmaßnahmen auch im Bereich Datenlink getroffen werden. Eventuell ist hier der zukünftige aeronautische Datenlinkstandard LDACs eine weitere Option.

- **Welche Module sind aus technischer Sicht einsetzbar?**

Diese Frage lässt sich direkt mit Kapitel 4.2 und 4.3 beantworten, wenn es um LOS Einsätze geht. Für BVLOS ist dies schwer zu beantworten, weil es keinerlei rechtlichen Grundlagen gibt. Dabei sei auf die Ergebnisse des Forschungsprojekts DEMONA hingewiesen (siehe Kapitel 5.1.3), wo entsprechende Ansätze für einen BVLOS-Betrieb erfolgreich getestet wurden. Eine Option ist jedenfalls eine Kombination aus RCs für Start- und Landemanöver und Mobilfunk für autonome Flugphasen.

- **Welche Anforderungen müssen die Module erfüllen für einen Betrieb im Sichtbereich?**

Die wichtigste Anforderung an den Datenlink ist die Verfügbarkeit. In der allgemeinen zivilen Luftfahrt ist eine Verfügbarkeit von 99,9% gefordert, welche bei Consumer-RCs nicht umgesetzt wurde. Ein weiterer Punkt ist die Störfestigkeit. Diese wird anhand der in Kapitel 4.2 vorgestellten Spreiztechniken weitgehend erreicht, sodass auch ein Betrieb mehrerer UAVs in derselben Umgebung im gleichen Frequenzband problemlos möglich ist. Mobilfunk ist durch den Einsatz von Duplexverfahren ebenfalls störsicher. Im Sichtbereich ist definitiv ein Einsatz von RCs empfehlenswert.

- **Wie ändern sich diese Anforderungen, wenn man das UAV außerhalb des Sichtbereichs steuern möchte?**

Für den BVLOS-Betrieb eines UAVs wäre derzeit die Mobilfunk-Technologie die beste Option. Bei einer manuellen Steuerung wäre dabei eine Fly-by-Wire Steuerung zu bevorzugen, da der Pilot das Verhalten des UAVs nicht mehr direkt sieht und so nicht auf Lageänderungen etwa durch Böen reagieren kann. In Kapitel 5.2.3.4 wurde mit dem *Testsetup 4* eine mögliche Implementierung vorgestellt. Dabei übernimmt der Flugregler die Stabilisierung und der Pilot nutzt die Anzeige auf der Bodenstation, um das UAV zu steuern. Ein Livestream der Sicht nach vorne ist hier empfehlenswert sowie ein künstlicher Horizont, wie in Abbildung 6.13 dargestellt. Dafür muss der Datenlink konstant eine gewisse Bandbreite zur Verfügung haben, da sonst eine Übertragung des Videofeeds nicht möglich wäre. Ein Verlust des Datenlinks wäre an dieser Stelle fatal. Daher muss man hier auf Redundanzen setzen. Diese bestehen einerseits aus Redundanz beim verwendeten Datenlink sowie Maßnahmen, die für die Sicherheit bei einem Ausfall des Datenlinks garantieren. Dazu zählt beispielsweise ein Flugregler, der bei Ausfall des Datenlinks entsprechende Routinen implementiert hat. Darunter fallen z.B. ein „Hold Position“ oder „Coming Home“ Algorithmus. Weiters sollte bei BVLOS-Operationen das UAV immer mit einem Fallschirm ausgestattet sein, der in kritischen Situationen automatisch auslöst.

- **Wie ändern sich diese Anforderungen, wenn man das UAV autonom fliegen lassen möchte?**

Hier kann an die vorigen Aussagen angeknüpft werden. Im autonomen Flug übernimmt der Flugregler die Lageregelung sowie die Ansteuerung der Servos und Motoren, um zum nächsten Wegpunkt zu gelangen. Die Wegpunkte werden über die Bodenstation programmiert. Die Aktivierung des autonomen Fluges kann jederzeit über die Bodenstation oder den RC erfolgen. Man muss dabei wiederum unterscheiden, ob das UAV im oder außerhalb des Sichtbereichs geflogen wird. Im Sichtbereich ist unter Umständen nur ein einfaches Telemetrie-Datenlink Modul, wie in Abbildung 4.19 ganz rechts zu sehen, zusätzlich notwendig. Diese Module übermitteln über 433 MHz die Telemetriedaten des UAVs an die GCS, was wiederum die Bandbreite für die RC minimiert. Bei BVLOS-Einsätzen wäre Mobilfunk die derzeit einzige Wahl. Es gibt zwar die in Abbildung 4.18 zu sehenden Longrange Module, mit denen auch die Übertragung von Telemetrie über eine große Distanz möglich ist, jedoch arbeiten diese mit zu großen Sendeleistungen, die offiziell nicht erlaubt sind.

- **Welche Randbedingungen müssen die Kommunikationsmodule erfüllen, um eine Zulassung zu bekommen?**

Da es keine rechtlichen Vorgaben für die Hardware für UAVs gibt, kann man diese Frage nicht pauschal beantworten. In der OPEN-Kategorie reicht hierfür schon eine CE-Kennzeichnung des Herstellers. Für Zulassungen in der SPECIFIC-Kategorie kann auf die im Projekt DEMONA gesammelten Erfahrungen, in dem ein mit 25 kg MTOW schweres UAV für den Betrieb im gesicherten Luftraum zugelassen wurde, zurückgegriffen werden. Das bedeutet, dass wie in Kapitel 2.3 bezüglich der neuen EASA-Richtlinien beschrieben, es missionsspezifische Zulassungen in der SPECIFIC-Kategorie geben wird. Je nach Mission muss für jedes UAV seitens der Behörde das Risiko evaluiert werden. Dazu muss vom Betreiber jeweils eine Risikobewertung mittels SORA (siehe 2.5) durchgeführt werden. Dabei muss auch in Bezug auf den Datenlink eine Robustheit garantiert werden, das kann nur durch entsprechende Redundanzen gelingen. Das bedeutet, man benötigt redundant ausgeführte Datenlinks (RC und Mobilfunk), einen Flugregler mit implementierten Notfallszenarien (Coming Home, Hold Position) und einen Fallschirm.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In einem Bericht im Standard vom 12.01.2021 [264] wird berichtet, dass bereits 11 000 Personen in nur zwölf Tagen den Drohnenführerschein der Austro Control absolviert haben. Das spricht eindeutig für die neuen EASA UAV-Regularien und zeigt das rege Interesse an UAVs. Daher ist es umso wichtiger, hier in den Regularien für zivile UAVs auch Hard- und Software Standards zu realisieren. Da es bisher (Stand Jänner 2021) jedoch nur Empfehlungen gibt, verwenden UAV-Hersteller vorwiegend Hard- und Software aus dem Modellbaubereich. Im Zuge der neuen UAV-Kategorien werden auch Flüge außerhalb des Sichtbereichs (Beyond Visual Line-of-Sight, BVLOS) durchführbar werden. Dies betrifft vor allem UAVs, die in die SPECIFIC-Kategorie fallen. Für solche Flüge gibt es allerdings keine dedizierte Hardware, die einen ausreichend sicheren Datenlink für BVLOS-Operationen bereitstellt. Daher wurde in dieser Arbeit der Einsatz von Mobilfunk für UAVs untersucht.

8.1 Schlussfolgerungen

Es wurden eine Reihe von Messungen der UMTS- und LTE-Mobilfunknetz am Boden sowie in der Luft durchgeführt. Da das UMTS-Netz in naher Zukunft deaktiviert wird, wurden die Untersuchungen auf die vierte Mobilfunkgeneration intensiviert. Mittels UAVs und einem Leichtflugzeug wurden die Signalparameter von LTE in Höhen bis 1000 m über Grund (Above Ground Level, AGL) und speziell bis 150 m untersucht. Dabei konnten eine hohe Verfügbarkeit und gute Signalstärken festgestellt werden. Mittels UAV-Testflüge über das Mobilfunknetz wurde der Proof-of-Concept mehrfach validiert. Allerdings muss man beachten, dass die Mobilfunktechnik für die Anwendung am Boden konzipiert ist und dabei in wabenförmigen Zellen aufgebaut ist. Diese Zellstrukturen verschwimmen zunehmend mit der Höhe, was durch Interferenzen von benachbarten Sendestationen hervorgerufen wird. Aufgrund dessen ist der Gesamtsignalpegel in der Luft meist gut, jedoch die Qualität mangelhaft. Daher kommt es häufig zu Umbuchungen zwischen Zellen und somit auch kurzzeitig zu Signalverlusten.

Für eine Anwendung von Mobilfunk bei UAVs bedeutet das, dass diese Technologie grundsätzlich einsetzbar ist, aber nicht ohne Redundanzen. Das bedeutet, man sollte für Start- und Landevorgänge auf Fernsteuerungen (Remote Controller, RC) aus dem Modellbau setzen, denn diese sind im Sichtbereich (Line-of-Sight, LOS) reichlich erprobt und funktionieren einwandfrei. In den Flugphasen kann man mittels eines Flugreglers das UAV über Mobilfunk einerseits autonom über Wegpunkte oder andererseits über eine Bodenstation und eine Steuervorrichtung (z.B. Joystick) per Fly-by-Wire steuern. Dabei sollte man bedenken, dass nicht nur ein Provider verwendet wird und man externe Antennen verwendet, um die Empfangsqualität zu optimieren. Weiters sollten bei BVLOS Anwendungen immer Notfallszenarien im Flugregler implementiert sein. Das kann ein „Hold Position“ oder „Return Home“ Algorithmus sein. Als zusätzliche Sicherheitsoption sollte dabei auch immer ein Fallschirm mitgeführt werden.

8.2 Ausblick

Vor allem mit der Einführung des neuen Mobilfunkstandards (5G) auf allen geplanten Frequenzen (derzeit, Jänner 2021, ist nur ein Frequenzband verfügbar) wird es weitere Möglichkeiten geben, einen leistungsstarken und sicheren Datenlink für UAVs zu realisieren. Durch die Authentifizierung von mobilen Endgeräten im Mobilfunknetz hat man weiters auch die Möglichkeit, UAVs, die über das Mobilfunknetz gesteuert werden, zu lokalisieren sowie über die zur SIM-Karte gehörenden Daten auch den Nutzer zu identifizieren. Das wäre vor allem im Hinblick auf den geplanten U-Space sowie neue *Unmanned Traffic Management* (UTM)-Systeme von großem Vorteil. Dabei könnten spezielle Flugkorridore für UAVs definiert werden, auf denen für den UAV-Verkehr angepasste Mobilfunkstationen für die notwendige Bereitstellung des Mobilfunknetzes sorgen.

Literatur

- [1] A. Dang, „Drohnenpilot: "Die Branche wächst und wird weiterwachsen"“, *DER STANDARD*, 1. Juli 2021, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.derstandard.at/story/2000122922615/drohnenpilotdie-branche-waechst-und-wird-weiterwachsen>. Zugriff am: 15. Januar 2021.
- [2] Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft, *Analyse des deutschen Drohnenmarktes*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bdl.aero/de/publikation/analyse-des-deutschen-drohnenmarktes/> (Zugriff am: 30. Oktober 2020).
- [3] D. Dubsky, *Wachstumstreiber Baubranche: Markt für Enterprise-Drohnen wächst um 50 Prozent*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ict-channel.com/security/markt-fuer-enterprise-drohnen-waechst-um-50-prozent.121324.html> (Zugriff am: 30. Oktober 2020).
- [4] SN, „Intelligente Überflieger: Drohnen liegen im Trend“, *Salzburger Nachrichten*, 2. Okt. 2020, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sn.at/panorama/medien/intelligente-ueberflieger-drohnen-liegen-im-trend-93644509>. Zugriff am: 30. Oktober 2020.
- [5] FACC, *eVTOL; Ehang; UAM; Urban Air Mobility; Air taxi: Sharing Economy und die Mobilität von Morgen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.facc.com/BEyond-Blog/Sharing-Economy-und-die-Mobilitaet-von-Morgen> (Zugriff am: 20. November 2020).
- [6] M. Schramm, *Projekt „HEIDI“: Drohne als moderne Brieftaube in den Bergen | Tiroler Tageszeitung Online*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tt.com/artikel/13200039/projekt-heidi-drohne-als-moderne-brieftaube-in-den-bergen> (Zugriff am: 30. Oktober 2020).
- [7] Kleine Zeitung GmbH & Co KG, *Ehang und FACC: Ab 2020 gibt es erste Flugtaxis "Made in Austria"*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kleinezeitung.at/wirtschaft/5587443/Ehang-und-FACC_Ab-2020-gibt-es-erste-Flugtaxis-Made-in-Austria (Zugriff am: 30. Oktober 2020).
- [8] N. Waldmann, „Wissen: Was genau ist eine Drohne?“, *Drone-Zone.de*, 11. Mai 2019, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.drone-zone.de/wissen-was-genau-ist-eine-drohne/>. Zugriff am: 30. Oktober 2020.
- [9] Agri Expo, *Landwirtschaftsdrohne - alle Hersteller aus dem Bereich der Landwirtschaft - Videos*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agriexpo.online/de/landwirtschaftlich-hersteller/landwirtschaftsdrohne-24.html> (Zugriff am: 31. Oktober 2020).
- [10] Micrdrones, *Landwirtschaft*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.microdrones.com/de/anwendungen/landwirtschaft/> (Zugriff am: 31. Oktober 2020).
- [11] A. Wulf, *Mit Drohne Inspektion von Windkraftanlagen, Strommasten und Pipelines*. [Online]. Verfügbar unter: <https://alexwulf.de/portfolio-item/inspektion-von-windkraftanlagen/> (Zugriff am: 31. Oktober 2020).
- [12] LOGXON, *Inspektion von Energieanlagen, Windkraftanlagen u. PV Anlagen mit UAV*. [Online]. Verfügbar unter: <https://logxon.com/anwendungen/energie-inspektion-drohne-thermographi/> (Zugriff am: 31. Oktober 2020).
- [13] ITU Radiocommunication Bureau, „Report ITU-R M.2171: Characteristics of unmanned aircraft systems and spectrum requirements to support their safe operation in non-

-
- segregated airspace“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.itu.int/en/ITU-R/space/snl/Documents/R-REP-M.2171-2009-PDF-E.pdf>
- [14] ITU Radiocommunication Bureau, „Report ITU-R M.2233: Examples of technical characteristics for unmanned aircraft control and non-payload communications links“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.itu.int/en/ITU-R/space/snl/Documents/R-REP-M.2233-2011-PDF-E.pdf>
- [15] European Conference of Postal and Telecommunications Administration, *CEPT.ORG - ECC - Tools & Services - Services - CEPT Workshop on Spectrum for Drones / UAS*. [Online]. Verfügbar unter: <https://cept.org/ecc/tools-and-services/cept-workshop-on-spectrum-for-drones-uas> (Zugriff am: 31. Oktober 2020).
- [16] RTCA, *SC-228 - RTCA*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.rtca.org/sc-228/> (Zugriff am: 31. Oktober 2020).
- [17] RTCA, *DO-362 with Errata - Electronic*. [Online]. Verfügbar unter: https://my.rtca.org/NC__Product?id=a1B36000001y1BQEAY (Zugriff am: 8. Dezember 2020).
- [18] EUROCAE, *ER-012 - Command and Control and ATC Communications Operational Concept (C3 CONOPS) for Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://eshop.eurocae.net/eurocae-documents-and-reports/er-012/#> (Zugriff am: 8. Dezember 2020).
- [19] D. COLIN / JARUS WG 5, „RPAS C2 link Required Communication Performance (C2 RCP) Concept“, 2016. [Online]. Verfügbar unter: http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/storage/Library-Documents/jar_doc_13_rpl_concept_upgraded.pdf
- [20] ICAO, *Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS) (Doc 10019) | ICAO Store*. [Online]. Verfügbar unter: <https://store.icao.int/en/manual-on-remotely-piloted-aircraft-systems-rpas-doc-10019> (Zugriff am: 31. Oktober 2020).
- [21] Globe UAV, *Globe UAV - 4G LTE Solutions for long Distance Flights*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.g-uav.com/> (Zugriff am: 13. November 2020).
- [22] Botlink, *4G LTE Cellular BVLOS Drone Control - XRD - Botlink*. [Online]. Verfügbar unter: <https://botlink.com/4g-lte-cellular-bvlos-drone-control-xrd> (Zugriff am: 13. November 2020).
- [23] Commercial UAV News, *5G!Drones Is Putting the Pieces of the Drone Ecosystem Together to Make Sure They Fit and Can Deliver Value to Stakeholders | Commercial UAV News*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.commercialuavnews.com/europe/5g-drones-is-putting-the-pieces-of-the-drone-ecosystem-together-to-make-sure-they-fit-and-can-deliver-value-to-stakeholders?utm_source=marketo&utm_medium=email&utm_campaign=newsletter&utm_content=newsletter&mkt_tok=eyJpIjoiT0RBeU1qTmtaRFE0TkrZcClInQiOiJYMSt1U2pNXC82eXZqUkErOURseHpTeEZURkVvdIppTjJkZl3a3JXY0hXTmg3bzdLOHdVaUc1K1FoU0pna29aMkNpVGhlcjVDYTN0ZkZzM0Z2Ukk0dTJCXC9ONVdOd2VtU2xtc2J5SUIMdHI3dXduRzdtdUNiUG9HVdQ2R3NpdGVsIn0%3D (Zugriff am: 13. November 2020).
- [24] OTS.at, *Corona-Krise: EU plant Verschiebung der neuen Drohnen-Gesetze auf 2021*. [Online]. Verfügbar unter:

-
- https://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20200423_OTS0077/corona-krise-eu-plant-verschiebung-der-neuen-drohnen-gesetze-auf-2021 (Zugriff am: 30. Oktober 2020).
- [25] Austro Control, „Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitshinweis Nr. 67: Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitsanforderungen für unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.austrocontrol.at/jart/prj3/austro_control/data/uploads/LFA/LTH_LFA_ACE_067.pdf
- [26] C. Briese, R. Fortner, P. Sager und N. Pfeifer, „Vom Modellflughobby zu unbemannten Flugsystemen für die Geodatenerfassung“, Nr. 3, S. 64–74. [Online]. Verfügbar unter: file:///C:/Users/Klaue/AppData/Local/Temp/VGI_201306_Briese.pdf
- [27] L.E.X. Manfred, „ÖSTERREICHISCHER AERO-CLUB“. [Online]. Verfügbar unter: https://aeroclub.at/uploads/download/mso2013_nationaleklassen.pdf
- [28] Rechtsinformationssystem des Bundes, „Bundesgesetzblatt II Nr. 470_2013“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblAuth/BGBLA_2013_II_470/BGBLA_2013_II_470.pdfsig
- [29] Austro Control, „Betriebsbewilligung unbemannter Luftfahrzeuge - Kategorie A“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dronespace.at/jart/prj3/dronespace/data/uploads/FO_LFA_PPS_053_DE_2018-10-30_0910755.pdf
- [30] Austro Control, „Betriebsbewilligung unbemannter Luftfahrzeuge - Kategorie C“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dronespace.at/jart/prj3/dronespace/data/uploads/FO_LFA_PPS_054_DE_2018-10-30_0910669.pdf
- [31] N. Dorfmayr, „Betrieb von Drohnen - Rechtsgrundlagen: WKO E-Day 2018, 12.04.2018“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wko.at/branchen/k/gewerbe-handwerk/berufsfotografen/WKO-Rechtsgrundlagen-uLFZ-Austro-Control.pdf>
- [32] Austro Control, „Anlage C zu LBTH 67: Lufttüchtigkeitsanforderungen für unbemannte Luftfahrzeuge der Kategorie C“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dronespace.at/jart/prj3/dronespace/data/uploads/LTH_LFA_ACE_067_AL_C_2018-10-25_1510509.pdf
- [33] Austro Control, „Anlage F zu LBTH 67: Analyse der Betriebssicherheit für unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dronespace.at/jart/prj3/dronespace/data/uploads/LTH_LFA_ACE_067_AL_F_2017-02-07_1202103.pdf
- [34] Austro Control, „Anlage N zu LBTH 67: Lärmzulässigkeit von unbemannten Luftfahrzeugen der Klasse 1“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dronespace.at/jart/prj3/dronespace/data/uploads/LTH_LFA_ACE_067_AL_N_2018-10-25_1410166.pdf
- [35] Austro Control, „Anlage P zu LBTH 67: Flugprogramm für den Praxisnachweis von uLFZ Piloten in Kategorie C und D“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dronespace.at/jart/prj3/dronespace/data/uploads/LTH_LFA_ACE_067_AL_P_2018-10-25_1410711.pdf

-
- [36] Austro Control, „Anlage D zu LBTH 67: Lufttüchtigkeitsanforderungen für unbemannte Luftfahrzeuge der Kategorie D“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dronespace.at/jart/prj3/dronespace/data/uploads/LTH_LFA_ACE_067_AL_D_2018-10-25_1510445.pdf
- [37] Austro Control, *Bewilligung*. Webseite der Austro Control für Nutzer von UAVs. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dronespace.at/bewilligung> (Zugriff am: 20. November 2020).
- [38] ACG - Play Store, *Drone Space – die Austro Control Drohnen-App – Apps bei Google Play*. [Online]. Verfügbar unter: https://play.google.com/store/apps/details?id=aero.unifly.austrocontrol.launchpad&hl=de_AT (Zugriff am: 21. November 2020).
- [39] OEAMTC - Play Store, *Drohnen-Info – Apps bei Google Play*. [Online]. Verfügbar unter: https://play.google.com/store/apps/details?id=at.oeamtc.drohnen&hl=de_AT (Zugriff am: 21. November 2020).
- [40] Wikipedia, *Category:Civil aviation authorities in Europe - Wikipedia: List of aviation authorities in the EU*. [Online]. Verfügbar unter: https://en.wikipedia.org/wiki/Category:Civil_aviation_authorities_in_Europe (Zugriff am: 22. November 2020).
- [41] B. G. Verkehr, „Fachinformation "Unbemannte Luftfahrtsysteme - UAS (Drohnen)““, Jg. 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bg-verkehr.de/redaktion/medien-und-downloads/informationen/branchen/post-logistik/fachinformation-unbemannte-luftfahrtsysteme.pdf>
- [42] Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz sowie des Bundesamts für Justiz, „LuftVO_DE: Luftverkehrs-Ordnung vom 29. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1894), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 11. Juni 2017 (BGBl. I S. 1617) geändert worden ist“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/luftvo_2015/LuftVO.pdf
- [43] UAV DACH e.V., *Sichere kommerzielle Nutzung von Drohnen - UAV DACH e.V.* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.uavdach.org/> (Zugriff am: 13. November 2020).
- [44] BAZL - Bundesamt für Zivilluftfahrt, *SR 748.941 Verordnung des UVEK vom 24. November 1994 über Luftfahrzeuge besonderer Kategorien (VLK)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19940351/index.html> (Zugriff am: 13. November 2020).
- [45] P. Kobel, *Drohnengesetz für die Schweiz / BAZL*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.futuretrends.ch/blog/drohnengesetz-fuer-die-schweiz-bazl/> (Zugriff am: 13. November 2020).
- [46] EASA, „Introduction of a regulatory framework for the operation of unmanned aircraft: Related A-NPA: 2015-10 —RMT.0230—18.12.2015“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Introduction%20of%20a%20regulatory%20framework%20for%20the%20operation%20of%20unmanned%20aircraft.pdf>

-
- [47] COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2019/945, *EUR-Lex - 32019R0945 - EN - EUR-Lex*. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX:32019R0945> (Zugriff am: 21. November 2020).
- [48] COMMISSION IMPLEMENTING REGULATION (EU) 2019/947, *EUR-Lex - 32019R0947 - EN - EUR-Lex*. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32019R0947> (Zugriff am: 21. November 2020).
- [49] P. EASA, „DURCHFÜHRUNGSVERORDNUNG (EU) 2019/ 947 DER KOMMISSION: über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge“, Jg. 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0947&from=EN>
- [50] Drohnen Multicopter Quadrocopter, *Neue EU Drohnenverordnung 2021*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.drohnen.de/20336/drohnen-gesetze-eu/> (Zugriff am: 21. November 2020).
- [51] EASA, *What are the requirements under the subcategories of the 'open' category? | EASA*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.easa.europa.eu/faq/116452> (Zugriff am: 21. November 2020).
- [52] AIR&MORE Drohnen Blog Österreich, *Drohnen Registrierung EU | Bewilligung Neu - AIR&MORE*. [Online]. Verfügbar unter: <https://airandmore.at/tag/drohnen-registrierung/> (Zugriff am: 21. November 2020).
- [53] AIR&MORE Drohnen Blog Österreich, „Drohnen CE Kennzeichnung: In welche CE Klasse fällt welche Drohne?“, *AIR&MORE OG*, 12. Feb. 2020, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://airandmore.at/drohnen-ce-kennzeichnung-klasse-eu/#czwei>. Zugriff am: 21. November 2020.
- [54] P. EASA, „Richtlinie 2009/48/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Juni 2009 über die Sicherheit von Spielzeug: Spielzeugregelung“. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32009L0048&from=DE>
- [55] Drohnen Multicopter Quadrocopter, *EU-Drohnenführerschein*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.drohnen.de/33450/eu-drohnenfuehrerschein/> (Zugriff am: 21. November 2020).
- [56] EASA, *Open Category - Civil Drones | EASA*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.easa.europa.eu/domains/civil-drones-rpas/open-category-civil-drones> (Zugriff am: 21. November 2020).
- [57] EASA, *Drones (UAS) | EASA*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.easa.europa.eu/the-agency/faqs/drones-uas#category-open-category> (Zugriff am: 21. November 2020).
- [58] EASA, *Specific Category - Civil Drones | EASA*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.easa.europa.eu/domains/civil-drones-rpas/specific-category-civil-drones> (Zugriff am: 21. November 2020).
- [59] P. EASA, „DURCHFÜHRUNGSVERORDNUNG (EU) 2020/639 DER KOMMISSION: zur Änderung der Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 in Bezug auf Standardszenarien für den Betrieb in oder außerhalb direkter Sicht“. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32020R0639&from=EN>

-
- [60] EASA, *What is a LUC? | EASA*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.easa.europa.eu/faq/116522> (Zugriff am: 21. November 2020).
- [61] EASA, *Certified Category - Civil Drones | EASA*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.easa.europa.eu/domains/civil-drones-rpas/certified-category-civil-drones> (Zugriff am: 21. November 2020).
- [62] Austro Control, *Dronespace*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dronespace.at/> (Zugriff am: 21. November 2020).
- [63] Skyoptik, „EU-Drohnenverordnung – FAQ“, *SKYOPTIK - aerial filming*, 1. Sep. 2020, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.skyoptik.at/eu-drohnenverordnung-faq/>. Zugriff am: 21. November 2020.
- [64] JARUS, „JARUS guidelines on Specific Operations Risk Assessment (SORA): Guidelines“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar_doc_06_jarus_sora_v2.0.pdf
- [65] JARUS, „JARUS -Who We Are & What We Do: Aufgaben der JARUS Gruppe“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jarus_who_we_are_what_we_do_v_11_0_23092019.pdf
- [66] K.H. Terkildsen und K. Jensen, „Towards a Tool for Assessing UAS Compliance with the JARUS SORA Guidelines“ in *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Atlanta, GA, USA, 2019, S. 460–466, doi: 10.1109/ICUAS.2019.8798236.
- [67] Luftfahrtmagazin, „Drohnen auf Langstrecken: Genehmigung für Stromtrassen?“, *Luftfahrtmagazin.de*, 11. Okt. 2020, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.luftfahrtmagazin.de/aviation/general-aviation/drohnen/drohnen-auf-langstrecken-genehmigung-fuer-stromtrassen-217425.html>. Zugriff am: 26. November 2020.
- [68] Scribd, *Jar Doc 06 Jarus Sora v2.0 | Risk Management | Risk*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.scribd.com/document/410980114/Jar-Doc-06-Jarus-Sora-v2-0> (Zugriff am: 26. November 2020).
- [69] JARUS-STS-02, „JARUS guidelines on SORA: STANDARD SCENARIO FOR AERIAL WORK OPERATIONS“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar_doc_6_sora_sts_02_edition1.0.pdf
- [70] EASA, „Opinion No 05-2019: Standard scenarios for UAS operations in the ‘specific’ category“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Opinion%20No%2005-2019.pdf>
- [71] JARUS, „JARUS guidelines on SORA JARUS-STS-01: STANDARDSCENARIOFORAERIALWORKOPERATIONS“. [Online]. Verfügbar unter: http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar_doc_6_sora_sts_01_edition1.1.pdf
- [72] JARUS, „JARUS guidelines on SORA JARUS-STS-02: STANDARDSCENARIOFORAERIALWORKOPERATIONS“. [Online]. Verfügbar unter: http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar_doc_6_sora_sts_02_edition1.0.pdf
- [73] Deutsche Flugsicherung - DFS, „Nachrichten für Luftfahrer“, 2017. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dfs.de/dfs_homepage/de/Unternehmen/Richtlinien/1-1163-17.pdf

-
- [74] UAVDACH-Services UG, *SORA-GER Fachgutachten für Betriebsgenehmigungen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://uas-office.de/?portfolio=sora-ger-fachgutachten-fuer-betriebsgenehmigungen> (Zugriff am: 22. November 2020).
- [75] JARUS, „SORA Annex A V1: ConOps Guidelines on collecting and presenting system and operation information for a specific UAS operation“. [Online]. Verfügbar unter: http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar_doc_06_jarus_sora_annex_a_v1.0.pdf
- [76] JARUS, „SORA Annex B V1: Integrity and assurance levels for the mitigations used to reduce the intrinsic Ground Risk Classes“. [Online]. Verfügbar unter: http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar_doc_06_jarus_sora_annex_b_v1.0.pdf
- [77] JARUS, „SORA Annex C V1: Strategic Mitigation Collision Risk Assessment“. [Online]. Verfügbar unter: http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar_doc_06_jarus_sora_annex_c_v1.0.pdf
- [78] JARUS, „SORA Annex D V1: Tactical Mitigations Collision Risk Assessment“. [Online]. Verfügbar unter: http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar_doc_06_jarus_sora_annex_d_v1.0.pdf
- [79] JARUS, „SORA Annex E V1: Integrity and assurance levels for the Operational Safety Objectives (OSO)“. [Online]. Verfügbar unter: http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar_doc_06_jarus_sora_annex_e_v1.0_.pdf
- [80] JARUS, „SORA Annex I V1: Glossary“. [Online]. Verfügbar unter: http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar_doc_06_jarus_sora_annex_i_v1.0.pdf
- [81] SESAR Joint Undertaking, *High performing aviation for Europe*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sesarju.eu/> (Zugriff am: 27. November 2020).
- [82] SESAR Joint Undertaking, *U-space*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sesarju.eu/u-space> (Zugriff am: 27. November 2020).
- [83] SESAR Joint Undertaking, „U-space Blueprint brochure final“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/U-space%20Blueprint%20brochure%20final.PDF>
- [84] C. Bildner, Hg., *Drohnen - legal und professionell*. Passau: Bildner Verlag GmbH, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5987836>
- [85] ICAO, „Unmanned aircraft systems: (UAS)“, Montréal, ICAO circular AN 190, 2011.
- [86] M. Šip, „Grundlagenwissen-Modellflugsport: Schulungsunterlagen“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dmfv.aero/wp-content/uploads/2019/11/Grundlagenwissen-Modellflugsport.pdf>
- [87] Wikipedia, *Tragfläche*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Tragfläche&oldid=205951748> (Zugriff am: 29. November 2020).
- [88] Rc Modellflugzeug, *Rc Flugzeug Ratgeber für Einsteiger und Fortgeschrittene*. [Online]. Verfügbar unter: <https://modellflugzeug-ratgeber.de/> (Zugriff am: 29. November 2020).
- [89] S-Idee - RC Factory, *s-idee 21023 Flugzeug Cessna F949 ferngesteuert mit 2.4 Ghz Technik mit Lipo Akku*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.s-idee.de/rc-flugzeuge/rc-flugzeuge/26/s-idee-21023-flugzeug-cessna-f949-ferngesteuert-mit-2.4-ghz-technik-mit-lipo-akku> (Zugriff am: 29. November 2020).

-
- [90] Skywalker, *New skywalker 1900 | SKYWALKER*. [Online]. Verfügbar unter: <http://skywalkermodel.com/en/91.html> (Zugriff am: 29. November 2020).
- [91] Skywalker, *Skywalker X8 | SKYWALKER*. [Online]. Verfügbar unter: <http://skywalkermodel.com/en/76.html> (Zugriff am: 29. November 2020).
- [92] Hubschrauberflug.de, *Hubschrauber Technik - Hubschrauberflug*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hubschrauberflug.de/de/infos/technik> (Zugriff am: 29. November 2020).
- [93] Hubschrauber-Ferngesteuert, *glossary | Hubschrauber ferngesteuert*. [Online]. Verfügbar unter: <https://hubschrauber-ferngesteuert.net/enzyklopaedie/prefix:p/> (Zugriff am: 30. November 2020).
- [94] Schiebel, *CAMCOPTER® S-100 System - Schiebel*. [Online]. Verfügbar unter: <https://schiebel.net/products/camcopter-s-100-system-2/> (Zugriff am: 29. November 2020).
- [95] Drones-Magazin, „Aero-Enterprise-Intelligente-Inspektion-von-Windkraftanlagen“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.aero-enterprise.com/wp-content/uploads/2020/10/Drones-Magazin-Aero-Enterprise-Intelligente-Inspektion-von-Windkraftanlagen.pdf>
- [96] A. Birsan, „Buss Energy Group investiert in Aero Enterprise“, *Aero Enterprise GmbH - intelligent airborne inspection*, 20. Aug. 2020, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.aero-enterprise.com/de/2020/08/20/buss-energy/>. Zugriff am: 30. November 2020.
- [97] Q. Quan, *Introduction to Multicopter Design and Control*. Singapore, s.l.: Springer Singapore, 2017.
- [98] J. Thielsen, „Tricopter kaufen“, *Drohnen Vergleich*, 1. Aug. 2015, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.drohnen-vergleich.net/tricopter-kaufen/>. Zugriff am: 30. November 2020.
- [99] J. Thielsen, „Quadrocopter kaufen“, *Drohnen Vergleich*, 1. Aug. 2015, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.drohnen-vergleich.net/quadrocopter-kaufen/>. Zugriff am: 30. November 2020.
- [100] ATMOS UAV, *ATMOS UAV | VTOL Drones for Mapping & Surveying*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.atmosuav.com/> (Zugriff am: 4. Dezember 2020).
- [101] V. Technologies, *Homepage*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.deltaquad.com/> (Zugriff am: 4. Dezember 2020).
- [102] Wingtra, *Wingtra – VTOL mapping drone for high-accuracy surveys*. [Online]. Verfügbar unter: <https://wingtra.com/> (Zugriff am: 4. Dezember 2020).
- [103] sUAS News, „A comparison of VTOL mapping drones“, *sUAS News*, 10. Juni 2019, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.suasnews.com/2019/06/a-comparison-of-vtol-mapping-drones/>. Zugriff am: 4. Dezember 2020.
- [104] FACC, *Urban Air Mobility: Der nächste große Schritt für FACC*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.facc.com/BEyond-Blog/Urban-Air-Mobility-Der-naechste-grosse-Schritt-fuer-FACC> (Zugriff am: 5. Dezember 2020).

-
- [105] Cities Today - Connecting the world's urban leaders, *Flying taxi trials in cities set to expand - Cities Today - Connecting the world's urban leaders*. [Online]. Verfügbar unter: <https://cities-today.com/cities-progress-flying-taxi-plans/> (Zugriff am: 5. Dezember 2020).
- [106] Airbus, *CityAirbus*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/urban-air-mobility/cityairbus.html> (Zugriff am: 5. Dezember 2020).
- [107] Lilium, *Introducing the Lilium Jet - Lilium*. [Online]. Verfügbar unter: <https://lilium.com/the-jet> (Zugriff am: 5. Dezember 2020).
- [108] Aviation Today, „Bell Expands Air Taxi Play: AerOS, Digital Infrastructure and All-Electric Nexus“, *Aviation Today*, 6. Jan. 2020, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.aviationtoday.com/2020/01/06/bell-expands-air-taxi-play-smart-cities-digital-infrastructure-and-an-all-electric-nexus/>. Zugriff am: 8. Dezember 2020.
- [109] Aviation Today, „EASA Releases Special Condition for Certifying Electric, Hybrid VTOL Aircraft“, *Aviation Today*, 3. Juli 2019, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.aviationtoday.com/2019/07/03/easa-releases-special-condition-certifying-electric-hybrid-vtol-aircraft/>. Zugriff am: 8. Dezember 2020.
- [110] SAE, *ARP4754A: Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems - SAE International*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sae.org/standards/content/arp4754a/> (Zugriff am: 7. Februar 2021).
- [111] Micropilot, *MicroPilot - World Leader in Professional UAV Autopilots | Clients Page - Fixed-Wing*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.micropilot.com/clients-fixed-wing.htm> (Zugriff am: 5. Dezember 2020).
- [112] Pixhawk, *Pixhawk | The hardware standard for open-source autopilots*. [Online]. Verfügbar unter: <https://pixhawk.org/> (Zugriff am: 5. Dezember 2020).
- [113] Ardupilot, *History of ArduPilot — Copter documentation*. [Online]. Verfügbar unter: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-history-of-ardupilot.html> (Zugriff am: 6. Dezember 2020).
- [114] PX4 Autopilot, *Open Source Autopilot for Drones - PX4 Autopilot*. [Online]. Verfügbar unter: <https://px4.io/> (Zugriff am: 5. Dezember 2020).
- [115] Ardupilot, *Pixhawk Overview — Copter documentation*. [Online]. Verfügbar unter: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-pixhawk-overview.html> (Zugriff am: 5. Dezember 2020).
- [116] E. Ebeid, M. Skriver, K.H. Terkildsen, K. Jensen und U.P. Schultz, „A survey of Open-Source UAV flight controllers and flight simulators“, *Microprocessors and Microsystems*, Jg. 61, S. 11–20, 2018, doi: 10.1016/j.micpro.2018.05.002.
- [117] DJI Official, *DJI - Der Marktführer im Bereich ziviler Drohnen- und Luftbildtechnologie*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dji.com/at/guidance/info#specs> (Zugriff am: 8. Dezember 2020).
- [118] Auterion, *The history of Pixhawk | Auterion*. [Online]. Verfügbar unter: <https://auterion.com/company/the-history-of-pixhawk/> (Zugriff am: 6. Dezember 2020).
- [119] RflySimDoc, *2. Software Package Installation — RflySimDoc 1.0 documentation*. [Online]. Verfügbar unter: https://rflysim.com/en/2_Configuration/SoftwareInstallation.html (Zugriff am: 1. Januar 2021).

-
- [120]Auterion, *Skynode | Auterion*. [Online]. Verfügbar unter: <https://auterion.com/drone-manufacturers/skynode/> (Zugriff am: 6. Dezember 2020).
- [121]MAVLink, *Introduction · MAVLink Developer Guide*. [Online]. Verfügbar unter: <https://mavlink.io/en/> (Zugriff am: 2. Januar 2021).
- [122]Ardupilot, *Mission Planning — Copter documentation*. [Online]. Verfügbar unter: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-mission-planning.html> (Zugriff am: 6. Dezember 2020).
- [123]Ardupilot, *Beagle Bone Blue — Copter documentation*. [Online]. Verfügbar unter: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-beagle-bone-blue.html> (Zugriff am: 6. Dezember 2020).
- [124]robots.ros.org, *Navio2*. [Online]. Verfügbar unter: <https://robots.ros.org/navio2/> (Zugriff am: 6. Dezember 2020).
- [125]DJI Official, *DJI GS Pro - Drohneneinsätze auf dem iPad verwalten - DJI*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dji.com/at/ground-station-pro> (Zugriff am: 6. Dezember 2020).
- [126]UAVenture, *UAVenture*. [Online]. Verfügbar unter: <http://uaventure.com/> (Zugriff am: 6. Dezember 2020).
- [127]QGroundControl, *Overview · QGroundControl User Guide*. [Online]. Verfügbar unter: <https://docs.qgroundcontrol.com/master/en/> (Zugriff am: 6. Dezember 2020).
- [128]Ardupilot, *Mission Planner Home — Mission Planner documentation*. [Online]. Verfügbar unter: <https://ardupilot.org/planner/> (Zugriff am: 6. Dezember 2020).
- [129]H. Flühr, *Avionik und Flugsicherungstechnik: Einführung in Kommunikationstechnik, Navigation, Surveillance*, 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2012.
- [130]M. Zolanvari, R. Jain und T. Salman, „Potential Data Link Candidates for Civilian Unmanned Aircraft Systems: A Survey“, *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, Jg. 22, Nr. 1, S. 292–319, 2020, doi: 10.1109/COMST.2019.2960366.
- [131]ICAO, *SARPs - Standards and Recommended Practices*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.icao.int/safety/SafetyManagement/Pages/SARPs.aspx> (Zugriff am: 30. Oktober 2020).
- [132]EUROCONTROL, *Satellite communications datalink (SATCOM) | EUROCONTROL*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.eurocontrol.int/initiative/satellite-communications-datalink> (Zugriff am: 18. Dezember 2020).
- [133]wavecom, *HF-ACARS*. [Online]. Verfügbar unter: <https://cartoonman.github.io/WAVECOM/wavecomhtm/hfacars.htm> (Zugriff am: 18. Dezember 2020).
- [134]Wikipedia, *VHF Data Link*. [Online]. Verfügbar unter: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=VHF_Data_Link&oldid=973091072 (Zugriff am: 18. Dezember 2020).
- [135]SESAR Joint Undertaking, *SESAR Joint Undertaking | Future communication infrastructure (FCI) terrestrial datalink*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sesarju.eu/sesar-solutions/future-communication-infrastructure-fci-terrestrial-datalink> (Zugriff am: 19. Dezember 2020).

-
- [136] N. FISTAS und EUROCONTROL, „Future Aeronautical Communication System - FCI: Take Off Conference“, 2009. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ffg.at/sites/default/files/allgemeine_downloads/thematische%20programme/veranstaltungen/05fistasfciectltakeoffv11.pdf
- [137] M. Schnell, German Aerospace Center, „Current Status of LDACS Development“, 2014. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.icao.int/safety/acp/acpwgf/the%20first%20meeting%20of%20the%20communications%20panel%20\(cp%201\)/cp-ip01ldacs-presentation.pdf](https://www.icao.int/safety/acp/acpwgf/the%20first%20meeting%20of%20the%20communications%20panel%20(cp%201)/cp-ip01ldacs-presentation.pdf)
- [138] SESAR Joint Undertaking, *SESAR Joint Undertaking | European partners demonstrate the future of datalink communications in aviation*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sesarju.eu/news/european-partners-demonstrate-future-datalink-communications-aviation> (Zugriff am: 20. Dezember 2020).
- [139] A. Novak, *Modern telecommunication networks in the Aeronautical Telecommunication Network (ATN): [proceedings]*. TRANSCOM 2005, 6-th European Conference of Young Research and Science Workers in Transport and Telecommunications, Žilina, Slovak Republic, 27 - 29 June 2005, 1. Aufl. Žilina: Univ, 2005.
- [140] Skybrary, *Controller Pilot Data Link Communications (CPDLC) - SKYbrary Aviation Safety*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.skybrary.aero/index.php/Controller_Pilot_Data_Link_Communications_\(CPDLC\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Controller_Pilot_Data_Link_Communications_(CPDLC)) (Zugriff am: 13. Dezember 2020).
- [141] SESAR Joint Undertaking, *SESAR Joint Undertaking | Showcasing progress of future datalink solutions*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sesarju.eu/news/showcasing-progress-future-datalink-solutions> (Zugriff am: 19. Dezember 2020).
- [142] DLR Portal, *DLR-Flugversuche testen erstmals digitales Übertragungsverfahren mit Navigationsfunktion*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2019/01/20190327_dlr-flugversuche-moderne-technik-fuers-cockpit.html (Zugriff am: 19. Dezember 2020).
- [143] FAI Aeromodelling Commission, *Frequencies*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fai.org/page/frequencies> (Zugriff am: 21. Dezember 2020).
- [144] R. Büchi, *2,4-GHz-Fernsteuerungen: Grundlagen und Praxis*, 1. Aufl.
- [145] Wikipedia, *Elektromagnetische Welle*. [Online]. Verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Elektromagnetische_Welle&oldid=206187496 (Zugriff am: 21. Dezember 2020).
- [146] K. Rothammel und A. Krischke, *Rothammels Antennenbuch: Mit über 135 Tabellen*, 12. Aufl. Baunatal: DARC-Verl., 2001.
- [147] Wikipedia, *Dipolantenne*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Dipolantenne&oldid=206357928> (Zugriff am: 21. Dezember 2020).
- [148] Gerald Oberschmidt, „Grundlagen der Übertragungstechnik: Skriptum zum Kurs“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://dualplus.ibdrigo.de/ueb_19/uebertragung.pdf
- [149] MAXIM integrated, *RF ICs for 2.4GHz ISM-Band FHSS Solutions: Bluetooth, HomeRF, DECT Applications*. [Online]. Verfügbar unter:

-
- <https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/app-notes/9/903.html>
(Zugriff am: 22. Dezember 2020).
- [150] J. Detlefsen und U. Siart, *Grundlagen der Hochfrequenztechnik*, 3. Aufl. München: Oldenbourg, 2009.
- [151] N. Waldmann, „Legale FPV-Frequenzen in Deutschland (Frequenzen & Bänder)“, *Drone-Zone.de*, 24. Feb. 2019, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.drone-zone.de/legale-fpv-frequenzen-in-deutschland-frequenzen-baender/>. Zugriff am: 25. Dezember 2020.
- [152] Team BlackSheep, *Team BlackSheep Online Store - TBS Crossfire 8Ch Diversity Rx*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.team-blacksheep.com/shop/cat:cat_crossfire#product_listing (Zugriff am: 25. Dezember 2020).
- [153] Commercial UAV News, *Buyer's Guide | Commercial UAV News*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.commercialuavnews.com/buyers-guide?term=&searchCats=> (Zugriff am: 25. Dezember 2020).
- [154] AIR&MORE Drohnen Blog Österreich, *Gewerbliche Drohne - AIR&MORE*. [Online]. Verfügbar unter: <https://airandmore.at/tag/gewerbliche-drohne/> (Zugriff am: 25. Dezember 2020).
- [155] J. Wei Lin, „Civil UAV monitoring techniques: State Radio Monitoring Center - China“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/Documents/Events/2018/SMWE-China/Presentations/Day3-1000-1100-Civil%20UAV%20monitoring%20techniques-JiWeilin.pdf>
- [156] Onedrone, *One stop drone shop (FPV, UAV, RC)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.onedrone.com/store/> (Zugriff am: 11. Januar 2021).
- [157] ICAO, „Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS)“, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://skybrary.aero/bookshelf/books/4053.pdf>
- [158] A. Philbin und ICAO, „Technology Workshop ICAO RPAS MANUAL C2 Link and Communications: REMOTELY PILOTED AIRCRAFT SYSTEMS SYMPOSIUM 23-25 March 2015“, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.icao.int/Meetings/RPAS/RPASSymposiumPresentation/Day%202%20Workshop%205%20Technology%20Michael%20Neale%20-%20ICAO%20RPAS%20Manual%20C2%20Link%20and%20Communications.pdf>
- [159] K. Kainrath, M. Gruber, H. Fluhr, E. Leitgeb, W. W. Dautermann und A. Hinze, „Evaluation of Mobile Radio Links as Command-and-Control Links for Unmanned Aerial Vehicles“ in *2018 International Conference on Broadband Communications for Next Generation Networks and Multimedia Applications (CoBCom)*, Graz, 7/11/2018 - 7/13/2018, S. 1–8, doi: 10.1109/COBCOM.2018.8443968.
- [160] D. COLIN / JARUS WG 5, „RPAS C2 link Required Communication Performance (C2 RCP) Concept“. [Online]. Verfügbar unter: http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/storage/Library-Documents/jar_02_doc_jarus_rpas_c2_link_rcp_-_10_oct_2014_1.pdf
- [161] M. Sauter, *Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme: LTE-Advanced, UMTS, HSPA, GSM, GPRS, Wireless LAN und Bluetooth*, 6. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.

-
- [162] Alpha Cephei, *Wie funktioniert eigentlich ein Mobilfunknetz? Teil 1, das GSM-Netz*. [Online]. Verfügbar unter: <https://scienceblogs.de/alpha-cephei/2018/08/31/wie-funktioniert-eigentlich-ein-mobilfunknetz-teil-1-das-gsm-netz/> (Zugriff am: 28. Dezember 2020).
- [163] Deutsche Presse-Agentur, „Hintergrund: Meilensteine in der Geschichte des Internets“, *Die Zeit*, 29. Okt. 2019, 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.zeit.de/news/2019-10/29/meilensteine-in-der-geschichte-des-internets?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.startpage.com%2F. Zugriff am: 28. Dezember 2020.
- [164] 3GPP, *About 3GPP Home*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.3gpp.org/about-3gpp/about-3gpp> (Zugriff am: 28. Dezember 2020).
- [165] ITU, *IMT-2000 Spectrum*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.itu.int/newsarchive/wrc2000/presskit/IMT-2000.html> (Zugriff am: 28. Dezember 2020).
- [166] ITU, *The dawn of 3G mobile systems*. [Online]. Verfügbar unter: http://www.itu.int/itu-news/issue/2000/09/the_dawn.html (Zugriff am: 28. Dezember 2020).
- [167] T. Bassermann, *Allgemeines Seminar - UMTS*. [Online]. Verfügbar unter: <https://homepages.thm.de/~hg10013/Lehre/MMS/SS04/bassermann/text.htm> (Zugriff am: 28. Dezember 2020).
- [168] ITWissen.info, *Multiplexverfahren :: multiplexing*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.itwissen.info/Multiplexverfahren-multiplexing.html> (Zugriff am: 28. Dezember 2020).
- [169] A. Donner, „Moderne Multiplexverfahren arbeiten mit dynamischer Verteilung noch effizienter“, *IP-Insider*, 6. Nov. 2007, 2007. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ip-insider.de/moderne-multiplexverfahren-arbeiten-mit-dynamischer-verteilung-noch-effizienter-a-97423/>. Zugriff am: 28. Dezember 2020.
- [170] U. Freyer, *Nachrichten-Übertragungstechnik: Grundlagen, Komponenten, Verfahren und Anwendungen der Informations-, Kommunikations- und Medientechnik : mit 495 Bildern sowie zahlreichen Beispielen, Übungen und Testaufgaben*, 7. Aufl. München: Hanser, 2017.
- [171] Elektronik Kompendium, *UMTS-Netzarchitektur*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/0910221.htm> (Zugriff am: 28. Dezember 2020).
- [172] LNTwww, *UMTS-Netzarchitektur – LNTwww*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.lntwww.de/Beispiele_von_Nachrichtensystemen/UMTS%E2%80%93Netzarchitektur (Zugriff am: 8. Januar 2021).
- [173] 3GPP, *TS 25.306: Release 16*. [Online]. Verfügbar unter: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=1169> (Zugriff am: 28. Dezember 2020).
- [174] Elektronik Kompendium, *LTE-Netzarchitektur*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/1608191.htm> (Zugriff am: 28. Dezember 2020).

-
- [175] 3GPP, *The Evolved Packet Core*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/100-the-evolved-packet-core> (Zugriff am: 29. Dezember 2020).
- [176] ITWissen.info, 3,9. *Generation :: 3.9G (3.9 generation)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.itwissen.info/3-9DOT-Generation-3DOT-9-generation-3DOT-9G.html> (Zugriff am: 29. Dezember 2020).
- [177] 3GPP, *LTE-Advanced*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced> (Zugriff am: 29. Dezember 2020).
- [178] Rohde & Schwarz, „Beamforming and TM's in LTE: White Paper“. [Online]. Verfügbar unter: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma186/1MA186_2_e_LTE_TMs_and_beamforming.pdf
- [179] Rundfunk und Telekom Regulierungs-GmbH, *RTR - Frequenzen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.rtr.at/de/tk/Frequenzen> (Zugriff am: 31. Oktober 2020).
- [180] Informationszentrum Mobilfunk, *Wie werden Mobilfunknetze geplant und aufgebaut?* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.informationszentrum-mobilfunk.de/technik/netzplanung-netzaufbau> (Zugriff am: 29. Dezember 2020).
- [181] Keysight, *LTE Physical Layer Overview*. [Online]. Verfügbar unter: http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/subsystems/lte/content/lte_overview.htm (Zugriff am: 4. Januar 2021).
- [182] LTE-Anbieter.info, *TDD LTE & FDD LTE | Beide Betriebsarten im Portrait*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lte-anbieter.info/technik/fdd-tdd-lte.php> (Zugriff am: 5. Januar 2021).
- [183] D.M. Rose und J. Baumgarten, „Funknetzplanung für LTE“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.tu-braunschweig.de/fileadmin/Redaktionsgruppen/Institute_Fakultaet_5/IFN/praktikum/nt/Skripte/Funknetzplanung.pdf
- [184] Keysight, *Concepts of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) and 802.11 WLAN*. [Online]. Verfügbar unter: http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/subsystems/wlan-ofdm/Content/ofdm_basicprinciplesoverview.htm (Zugriff am: 4. Januar 2021).
- [185] E. Notes, *4G LTE Modulation: OFDM OFDMA SC-FDMA » Electronics Notes*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/4g-lte-long-term-evolution/ofdm-ofdma-scfdma-modulation.php> (Zugriff am: 4. Januar 2021).
- [186] LNTwww, *Anwendung von OFDMA und SC-FDMA in LTE*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.lntwww.de/Mobile_Kommunikation/Anwendung_von_OFDMA_und_SC-FDMA_in_LTE (Zugriff am: 4. Januar 2021).
- [187] S. Ebadinezhad und S. Hasan, „BER Evaluation in LTE SC-FDMA under Multipath Channels“, *IJRTE*, Jg. 8, Nr. 4, S. 3539–3547, 2019, D7767118419, doi: 10.35940/ijrte.D7767.118419.
- [188] ETSI, „TS 136 211 - V11.7.0 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (3GPP TS 36.211 version 11.7.0 Release

-
- 11)“ [Online]. Verfügbar unter: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136211/11.07.00_60/ts_136211v110700p.pdf
- [189] W. M. J. Zyren, „Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer: Whitepaper, NXP“, 2007. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nxp.com/docs/en/whitepaper/3GPPEVOLUTIONWP.pdf>
- [190] E. Dahlman, S. Parkvall und J. Sköld, *4G LTE/LTE-advanced for mobile broadband*. Amsterdam: Elsevier Acad. Press, 2011.
- [191] inside digital, *LTE Geschwindigkeit im Vergleich - So schnell ist dein Handy*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.inside-digital.de/ratgeber/lte-cat-kategorien-geschwindigkeit> (Zugriff am: 31. Dezember 2020).
- [192] Reuters, „Xiaomi verdrängt Apple beim Smartphone-Absatz von Platz drei“, *Handelsblatt*, 30. Nov. 2020, 2020. Zugriff am: 31. Dezember 2020.
- [193] DeviceSpecifications, *Samsung Galaxy S20 Exynos - Specifications*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.devicespecifications.com/en/model/d15352f4> (Zugriff am: 31. Dezember 2020).
- [194] DeviceSpecifications, *Huawei P40 - Specifications*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.devicespecifications.com/en/model/11f35333> (Zugriff am: 31. Dezember 2020).
- [195] DeviceSpecifications, *Xiaomi Mi 10 - Specifications*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.devicespecifications.com/en/model/3af652f8> (Zugriff am: 31. Dezember 2020).
- [196] DeviceSpecifications, *Apple iPhone 12 - Specifications*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.devicespecifications.com/en/model/926a538b> (Zugriff am: 31. Dezember 2020).
- [197] TTTech, *Time-Triggered Protocol (TTP) - TTTech*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tttech.com/technologies/time-triggered-protocol-ttp/> (Zugriff am: 25. Dezember 2020).
- [198] ITU, *V.250 : Serial asynchronous automatic dialling and control*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.itu.int/rec/T-REC-V.250/de> (Zugriff am: 26. Dezember 2020).
- [199] eBay, *SIM800L V2.0 Quad Band GSM GPRS Modul Antenne Adapter Arduino Raspberry Pi | eBay*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ebay.de/itm/SIM800L-V2-0-Quad-Band-GSM-GPRS-Modul-Antenne-Adapter-Arduino-Raspberry-Pi/253435858665?hash=item3b01f44ee9:g:UzcAAOSws2Rb4K~H> (Zugriff am: 26. Dezember 2020).
- [200] IMST, *iU880B LoRaWAN - Long Range USB-Adapter*. [Online]. Verfügbar unter: <https://shop.imst.de/wireless-modules/lora-products/11/iu880b-lorawan-long-range-usb-adapter> (Zugriff am: 26. Dezember 2020).
- [201] 3rd Generation Partnership Project, „3GPP TS 27.007: Technical Specification Group Core Network and Terminals; AT command set for User Equipment (UE) (Release 17)“, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=1515>

-
- [202] rtl-sdr.com, *RTL-SDR Tutorial: Cheap ADS-B Aircraft RADAR*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.rtl-sdr.com/adsb-aircraft-radar-with-rtl-sdr/> (Zugriff am: 27. Dezember 2020).
- [203] PowerBox Systems, *PowerBox Royal SRS*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.powerbox-systems.com/de/produkte/powerbox-systeme/powerbox-royal-srs.html> (Zugriff am: 27. Dezember 2020).
- [204] LTE-Anbieter.info, *LTE-Sticks: Alle Modelle, Anbieter und Spartipps*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lte-anbieter.info/lte-hardware/sticks/lte-stick-uebersicht.php> (Zugriff am: 1. Januar 2021).
- [205] Damo, *Dealing with Cellular Broadband CGNAT*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.damow.net/dealing-with-cellular-broadband-cgnat/> (Zugriff am: 1. Januar 2021).
- [206] Digital Guide - IONOS, „Classless-Inter-Domain-Routing“, *1&1 IONOS SE*, 7. Juni 2018, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ionos.at/digitalguide/server/knowhow/classless-inter-domain-routing/>. Zugriff am: 2. Januar 2021.
- [207] Digital Guide - IONOS, „Broadcast-Adresse“, *1&1 IONOS SE*, 29. Aug. 2018, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ionos.de/digitalguide/server/knowhow/broadcast-adresse/>. Zugriff am: 2. Januar 2021.
- [208] IANA, *Internet Assigned Numbers Authority*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iana.org/> (Zugriff am: 2. Januar 2021).
- [209] D. McKay, „What Is Reverse SSH Tunneling? (and How to Use It)“, *How-To Geek*, 18. Juli 2019, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.howtogeek.com/428413/what-is-reverse-ssh-tunneling-and-how-to-use-it/>. Zugriff am: 2. Januar 2021.
- [210] Idealo, *LTE Stick Internetgeschwindigkeit 150 Mbit/s; externer Antennenanschluß Preisvergleich | Günstig bei idealo kaufen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.idealo.at/preisvergleich/ProductCategory/18618F1610336-1743098-5403704.html> (Zugriff am: 2. Januar 2021).
- [211] Amazon, *ZTE MF831 4G TD-LTE / FDD USB Surf stick: Amazon.de: Computer & Zubehör*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.amazon.de/ZTE-MF831-TD-LTE-Surf-stick/dp/B01HZWWS8W> (Zugriff am: 2. Januar 2021).
- [212] Amazon, *Huawei entsperrt E3372-LTE / 4G 150 Mbit: Amazon.de: Computer & Zubehör*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.amazon.de/dp/B0104LV06M/ref=dp_prsubs_2 (Zugriff am: 2. Januar 2021).
- [213] Wikipedia, *Freiraumdämpfung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Freiraumdämpfung&oldid=203738101> (Zugriff am: 4. Januar 2021).
- [214] R.D. Wölfle, *Ausbreitungs-Modellrechnungen: Elektrosmoginfo*. [Online]. Verfügbar unter: http://www.ralf-woelfle.de/elektrosmog/redir.htm?http://www.ralf-woelfle.de/elektrosmog/technik/funkfeld_4.htm.
- [215] Wikipedia, *Mobile phone signal*. [Online]. Verfügbar unter: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Mobile_phone_signal&oldid=992276120 (Zugriff am: 4. Januar 2021).

-
- [216]LTE-Anbieter.info, *ASU Wert - Signalstärke messen und interpretieren*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lte-anbieter.info/technik/asu.php> (Zugriff am: 4. Januar 2021).
- [217]3GPP, *Specification # 36.211*. [Online]. Verfügbar unter: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2425> (Zugriff am: 5. Januar 2021).
- [218]K. Kainrath, J. Feiner, W. Zugaj, E. Leitgeb, H. Fluehr und M. Gruber, „Evaluation of data sets for mobile radio signal coverage up to 150 meters above ground“ in *2020 International Conference on Broadband Communications for Next Generation Networks and Multimedia Applications (CoBCom)*, Graz, Austria, 7/7/2020 - 7/9/2020, S. 1–6, doi: 10.1109/CoBCom49975.2020.9174053.
- [219]CableFree, *LTE RSRQ to SINR - CableFree*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/lte-rsrq-sinr/> (Zugriff am: 5. Januar 2021).
- [220]3GPP, *Specification # 36.133*. [Online]. Verfügbar unter: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2420> (Zugriff am: 5. Januar 2021).
- [221]S. Balea, „Radio Performance Concepts - learn about radio concepts“, *YateBTS*, 2018, 2018-08-14EEST12:52:33+03:00. [Online]. Verfügbar unter: <https://yatebts.com/documentation/concepts/radio-performance-concepts/>. Zugriff am: 5. Januar 2021.
- [222]Wikipedia, *Location Area*. [Online]. Verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Location_Area&oldid=202719422 (Zugriff am: 10. Januar 2021).
- [223]RF Wireless World, *LTE Identifiers-IMSI,PLMN,MCC,MNC,MSIN,GUTI,TIN,TMSI,MMEI,ECI,ECGI,TAI,LBI,TEID*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/LTE-Identifiers.html> (Zugriff am: 10. Januar 2021).
- [224]ETSI, „TS 127 007 - V10.3.0 - Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; AT command set for User Equipment (UE) (3GPP TS 27.007 version 10.3.0 Release 10)“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/127000_127099/127007/10.03.00_60/ts_127007v100300p.pdf
- [225]DeviceSpecifications, *Xiaomi Redmi Note 4X - Technischen Daten und Spezifikationen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.devicespecifications.com/de/model/9910413e> (Zugriff am: 4. Januar 2021).
- [226]Gyokov Solutions, *Manual G-NetTrack – Gyokov Solutions*. [Online]. Verfügbar unter: <https://gykovsolutions.com/manual-g-nettrack/> (Zugriff am: 4. Januar 2021).
- [227]Cooking Hacks, *Extreme Range Links: LoRa 868 / 900MHz SX1272 Module for Arduino, Waspote and Raspberry Pi*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.cooking-hacks.com/documentation/tutorials/extreme-range-lora-sx1272-module-shield-arduino-raspberry-pi-intel-galileo.html> (Zugriff am: 5. Januar 2021).

-
- [228] Huawei, „HUAWEI E3372 LTE USB Stick Product Description“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.manualslib.com/manual/1336636/Huawei-E3372.html>
- [229] 3GPP, *Specification # 36.101*. [Online]. Verfügbar unter: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2411> (Zugriff am: 6. Januar 2021).
- [230] Madison Technologies, *What Is The Polarisation Of A GSM Or LTE Network?* -. [Online]. Verfügbar unter: <https://madison.tech/what-is-the-polarisation-of-a-gsm-or-lte-network/> (Zugriff am: 6. Januar 2021).
- [231] Delock, *12479 Delock LTE Antenne TS-9 Stecker 90° 3 dBi omnidirektional starr schwarz Klebmontage*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.delock.de/produkt/12479/merkmale.html> (Zugriff am: 6. Januar 2021).
- [232] Dimetor, *Dimetor*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dimetor.com/> (Zugriff am: 7. Januar 2021).
- [233] FFG, *FIT4BA*. [Online]. Verfügbar unter: <https://projekte.ffg.at/projekt/3014958> (Zugriff am: 7. Januar 2021).
- [234] BMVIT, <https://www.senderkataster.at>. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.senderkataster.at/> (Zugriff am: 8. Januar 2021).
- [235] OpenCellID, *OpenCellID - Open Database of Cell Towers & Geolocation*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.opencellid.org/#zoom=16&lat=47.05766&lon=15.39976> (Zugriff am: 8. Januar 2021).
- [236] Telit wireless solutions, „AT Commands Reference Guide“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sparkfun.com/datasheets/Cellular%20Modules/AT_Commands_Reference_Guide_r0.pdf
- [237] U. Mansmann, „LTE“, *Heise*, 12. Apr. 2019, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.heise.de/select/ct/2019/9/1555931629845676>. Zugriff am: 8. Januar 2021.
- [238] R/C Tech Forums, *Radio Benchmark program and results. - R/C Tech Forums*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.rc-tech.net/forum/radio-electronics/991213-radio-benchmark-program-results.html> (Zugriff am: 9. Januar 2021).
- [239] LTE-Anbieter.info, *RSRP | Interpretation und Bestimmung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lte-anbieter.info/technik/rsrp.php> (Zugriff am: 9. Januar 2021).
- [240] LTE-Anbieter.info, *RSRQ | Bestimmung und Bedeutung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lte-anbieter.info/technik/rsrq.php> (Zugriff am: 9. Januar 2021).
- [241] LTE-Anbieter.info, *SINR und SNR | Relevanz für Mobilfunknutzer*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lte-anbieter.info/technik/sinr.php> (Zugriff am: 14. Januar 2021).
- [242] Wikipedia, *H.264*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=H.264&oldid=206279288> (Zugriff am: 14. Januar 2021).
- [243] 1&1 Hilfe Center, *Symbole des 1&1 Surf-Sticks ZTE MF 831 LTE*. [Online]. Verfügbar unter: <https://hilfe-center.1und1.de/wlan-router-und-surf-sticks-c84088/surf-sticks-c84085/zte-mf-831-lte-c85540/konfiguration-c85541/symbole-des--1und1-surf-sticks-zte-mf-831-lte-a796848.html> (Zugriff am: 12. Januar 2021).

-
- [244]J. Brandstetter, „ZTE MF831 in den Modembetrieb versetzen“, *TechStream*, 13. März 2019, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.techstream.at/zte-mf831-in-den-modembetrieb-versetzen/>. Zugriff am: 12. Januar 2021.
- [245]OpenWrt Wiki, *Use 3g/UMTS USB Dongle for WAN connection*. [Online]. Verfügbar unter: <https://openwrt.org/docs/guide-user/network/wan/wwan/3gdongle> (Zugriff am: 12. Januar 2021).
- [246]Die Presse, *Die zwölf größten Hacker-Angriffe*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.diepresse.com/5123711/die-zwolf-grossten-hacker-angriffe#slide-16> (Zugriff am: 12. Januar 2021).
- [247]Full Drone, *Simple device can hack drones in mid-air • Full Drone*. [Online]. Verfügbar unter: <https://fulldrone.com/icarus-hack-drones/> (Zugriff am: 12. Januar 2021).
- [248]A. Perekalin, „Drohne in 11 Millisekunden auf und davon“, *Kaspersky*, 19. Apr. 2017, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kaspersky.de/blog/drone-gone-in-11-ms/10078/>. Zugriff am: 12. Januar 2021.
- [249]Hackaday, *Hijacking Quadcopters With A MAVLink Exploit*. [Online]. Verfügbar unter: <https://hackaday.com/2015/10/15/hijacking-quadcopters-with-a-mavlink-exploit/> (Zugriff am: 12. Januar 2021).
- [250]Raspberry tips, *How To Hack Wifi on a Raspberry Pi with Kali Linux | Raspberry tips*. [Online]. Verfügbar unter: <https://raspberrypitips.com/hacking-wifi-raspberry-pi/> (Zugriff am: 12. Januar 2021).
- [251]A. Eisner-Klee, *Die Netzsicherheit bei Mobilfunknetzen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://businessblog.magenta.at/netzsicherheit-mobilfunknetze/> (Zugriff am: 12. Januar 2021).
- [252]Wikipedia, *KASUMI*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=KASUMI&oldid=176634288> (Zugriff am: 12. Januar 2021).
- [253]D. Zivadinovic, „Schneller Mobilfunk: Sicherheitslücken in LTE“, *heise Online*, 28. Juni 2018, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.heise.de/security/meldung/Mobilfunk-Sicherheit-Sicherheitsluecken-in-LTE-4093507.html>. Zugriff am: 12. Januar 2021.
- [254]Rohde & Schwarz, *Messgeräte und -systeme für Mobilfunk – Messtechnik*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.rohde-schwarz.com/at/produkte/messtechnik/messgeraete-und-systeme-fuer-mobilfunk/pg-uebersicht_86247.html (Zugriff am: 7. Januar 2021).
- [255]M. Cattani, C.A. Boano und K. Römer, „An Experimental Evaluation of the Reliability of LoRa Long-Range Low-Power Wireless Communication“, *JSAN*, Jg. 6, Nr. 2, S. 7, 2017, doi: 10.3390/jsan6020007.
- [256]uAvionix, *ping200Sr Mode S Transponder - uAvionix*. [Online]. Verfügbar unter: <https://uavionix.com/products/ping200sr/> (Zugriff am: 12. Januar 2021).
- [257]Honeywell, „SMALL UAV SATCOM“. [Online]. Verfügbar unter: file:///C:/Users/Klause/AppData/Local/Temp/N61-2386-000-000_UAV_SATCOM-bro.pdf
- [258]B. Schenk, *Homepage von Kap Hoornier und Weltumsegler Bobby Schenk*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bobbyschenk.de/n006/tv.html> (Zugriff am: 11. Januar 2021).

-
- [259]Magenta, *Die eSIM - SIM-Karte der Zukunft*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.magenta.at/esim> (Zugriff am: 11. Januar 2021).
- [260]J. Waite, „38 Ways Drones Will Impact Society: From Fighting War To Forecasting Weather, UAVs Change Everything“, *CB Insights*, 9. Jan. 2020, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.cbinsights.com/research/drone-impact-society-uav/>. Zugriff am: 16. Januar 2021.
- [261]H2020 ICT-19-2019, *5G!Drones, “Unmanned Aerial Vehicle Vertical Applications’ Trials Leveraging Advanced 5G Facilities”* [Online]. Verfügbar unter: <https://5gdrones.eu/use-case-scenarios/> (Zugriff am: 11. Januar 2021).
- [262]Frequentis.com, *FREQUENTIS predicts a converged UTM/ATM*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.frequentis.com/en/pr/frequentis-predicts-converged-utmatm> (Zugriff am: 11. Januar 2021).
- [263]Deutsche Telekom AG, *So funktionieren die neuen Mobilfunkantennen für 5G*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.telekom.com/de/blog/netz/artikel/heptaband-antenne-5g-530618> (Zugriff am: 11. Januar 2021).
- [264]Der Standard, „1.000 Personen legten in Österreich Drohnenführerschein ab“, *DER STANDARD*, 12. Jan. 2021, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.derstandard.at/story/2000123230170/1-000-personen-legten-in-oesterreich-drohnenfuehrerschein-ab>. Zugriff am: 12. Januar 2021.

Anhang A: Eigene Publikationen

Publikationsliste mit Stand 31.01.2021

Wissenschaftliche Beiträge (peer reviewed papers):

1. **„Modification of a commercial fixed-wing-UAV with mobile radio for Beyond Visual Line of Sight operability“**; K. Kainrath, M. Gruber, A. Hinze, H. Flühr, E. Leitgeb, abstract accepted for the 44th International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MiPro), Opatija, Croatia, paper will be published via IEEE
2. **„Evaluation of Commercial Off-The-Shelf LTE Antennas for Use on Unmanned Aerial Vehicles“**; K. Kainrath, H. Flühr, W. Stocksreiter, R. Findenig, E. Leitgeb, M. Gruber, 2020 43rd International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MiPro), Opatija, Croatia, published via IEEE
3. **„Evaluation of data sets for mobile radio signal coverage up to 150 meters above ground“**; K. Kainrath, J. Feiner, W. Zugaj, E. Leitgeb, H. Flühr, M. Gruber, 2020 International Conference on Broadband Communications for Next Generation Networks and Multimedia Applications (CobCom), Graz, Austria, published via IEEE
4. **„Evaluation of Cyber Security in Digital Avionic Systems“**; K. Kainrath, M. Fruhmann, K. Gebeshuber, E. Leitgeb, M. Gruber; 2020 Third Intl. Workshop on Safety, securiTy, and pRivacy In automotiVe systEms (STRIVE), Antwerp, Belgium, published via IEEE
5. **„Evaluation of Mobile Radio Links as Command-And-Control Links for Unmanned Aerial Vehicles“**; K. Kainrath, M. Gruber, H. Flühr, E. Leitgeb, W. Dautermann, A. Hinze; 2018 International Conference on Broadband Communications for Next Generation Networks and Multimedia Applications (CobCom), Graz, Austria, published via IEEE
6. **„Communication techniques for Remotely piloted Aircraft with Integrated Modular Avionics“**; K. Kainrath, M. Gruber, H. Flühr, E. Leitgeb; 2016 International Conference on Broadband Communications for Next Generation Networks and Multimedia Applications (CobCom), Graz, Austria, published via IEEE
7. **„Software Defined Radio als Teil einer integrierten modularen Avionik für Remotely Piloted Aircraft Systems“**; K. Kainrath, M. Gruber, H. Flühr; 2015 Deutscher Luft und Raumfahrtkongress, Rostock, Deutschland, Netzpublikation, Deutsche Nationalbibliothek
8. **„RPAS Systems Overview and Configuration Tool“**; M. Gruber, H. Flühr, H. Jelinek-Nigitz, K. Kainrath, R. Fortner, M. Ritzinger; 2015 CEAS Air and Space Conference 2015, Delft, Netherlands

Wissenschaftliche Vorträge:

1. **„Evaluierung der Cyber Security im Bereich der Avionic“**; K. Kainrath, M. Fruhmann, K. Gebeshuber; Fachvortrag; 2019 Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Darmstadt, Deutschland
2. **„Entwicklung einer mobilen Ground Control Station für den Betrieb eines Unmanned Aerial Vehicle außerhalb des Sichtbereichs“**; K. Kainrath, M. Gruber, H. Flühr, A. Hinze; Fachvortrag 2018 Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Friedrichshafen, Deutschland
3. **„Aviation Cyber Security Study“**; K. Kainrath, K. Gebeshuber, M. Fruhmann, M. Gruber; Fachvortrag; 2017 Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, München, Deutschland
4. **„Integrierte Modulare Avionik für Remotely Piloted Aircraft Systems“**; K. Kainrath, M. Gruber, H. Flühr; Poster; 2016 Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Braunschweig, Deutschland
5. **„Software Defined Radio als Teil einer integrierten modularen Avionik für Remotely Piloted Aircraft Systems“**; K. Kainrath, M. Gruber, H. Flühr, Fachvortrag; 2015 Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Rostock, Deutschland

Anhang B: Tabellen und zusätzliche Plots

Die Arbitrary Strength Unit (ASU) ist eine dimensionslose Einheit zur Erfassung der Signalqualität bei Mobilfunk. Sie kann unabhängig von der Mobilfunkgeneration eingesetzt werden. Der ASU Wert ist etwa zwischen 0 bis 99. Ein Mapping der Werte auf die der Mobilfunkgeneration entsprechenden Parameter ist in den folgenden Tabellen [216] angegeben. Mwconn beschreibt die Anzeige der Software Mwconn, einem Freeware Tool für mobile Internetverbindungen an x86 Hardware.

LTE (ASU Ausgabeklassen 95 ... 48)

ASU	RSRP		RSSI (RSRQ: -3 dB)		RXL in Prozent		Bemerkung/Verfügbarkeit
					3GPP	Mwconn	
95	-45	dBm	-25	dBm	100%	100%	Nahezu perfekte Verbindung, maximal mögliche Datenrate kann erreicht werden. Beste Voraussetzung für LTE und LTE Advanced (in Zukunft)
94	-46	dBm	-26	dBm	99%	100%	
93	-47	dBm	-27	dBm	98%	100%	
92	-48	dBm	-28	dBm	97%	100%	
91	-49	dBm	-29	dBm	96%	100%	
90	-50	dBm	-30	dBm	95%	100%	
89	-51	dBm	-31	dBm	94%	100%	
88	-52	dBm	-32	dBm	93%	99%	
87	-53	dBm	-33	dBm	92%	98%	
86	-54	dBm	-34	dBm	91%	97%	
85	-55	dBm	-35	dBm	89%	96%	
84	-56	dBm	-36	dBm	88%	94%	
83	-57	dBm	-37	dBm	87%	93%	
82	-58	dBm	-38	dBm	86%	92%	
81	-59	dBm	-39	dBm	85%	91%	
80	-60	dBm	-40	dBm	84%	90%	
79	-61	dBm	-41	dBm	83%	89%	
78	-62	dBm	-42	dBm	82%	88%	
77	-63	dBm	-43	dBm	81%	87%	
76	-64	dBm	-44	dBm	80%	85%	
75	-65	dBm	-45	dBm	79%	84%	
74	-66	dBm	-46	dBm	78%	83%	
73	-67	dBm	-47	dBm	77%	82%	
72	-68	dBm	-48	dBm	76%	81%	
71	-69	dBm	-49	dBm	75%	80%	
70	-70	dBm	-50	dBm	74%	79%	Sehr stabile und witterungsbeständige Verbindung möglich. Maximale Datenraten können erreicht werden.
69	-71	dBm	-51	dBm	73%	78%	
68	-72	dBm	-52	dBm	72%	76%	
67	-73	dBm	-53	dBm	71%	75%	
66	-74	dBm	-54	dBm	69%	74%	
65	-75	dBm	-55	dBm	68%	73%	
64	-76	dBm	-56	dBm	67%	72%	
63	-77	dBm	-57	dBm	66%	71%	
62	-78	dBm	-58	dBm	65%	70%	
61	-79	dBm	-59	dBm	64%	69%	
60	-80	dBm	-60	dBm	63%	67%	
59	-81	dBm	-61	dBm	62%	66%	
58	-82	dBm	-62	dBm	61%	65%	
57	-83	dBm	-63	dBm	60%	64%	
56	-84	dBm	-64	dBm	59%	63%	
55	-85	dBm	-65	dBm	58%	62%	
54	-86	dBm	-66	dBm	57%	61%	
53	-87	dBm	-67	dBm	56%	60%	
52	-88	dBm	-68	dBm	55%	58%	
51	-89	dBm	-69	dBm	54%	57%	
50	-90	dBm	-70	dBm	53%	56%	
49	-91	dBm	-71	dBm	52%	55%	
48	-92	dBm	-72	dBm	51%	54%	

LTE (ASU Ausgabeklassen 47 ... 0)

ASU	RSRP		RSSI (RSRQ: -3 dB)		RX in Prozent		Bemerkung/Verfügbarkeit
					3GPP	Mwconn	
47	-93	dBm	-73	dBm	49%	53%	Stabile und witterungsbeständige Verbindung möglich, extrem schlechtes Wetter kann die Datenrate negativ beeinträchtigen.
46	-94	dBm	-74	dBm	48%	52%	
45	-95	dBm	-75	dBm	47%	51%	
44	-96	dBm	-76	dBm	46%	49%	
43	-97	dBm	-77	dBm	45%	48%	
42	-98	dBm	-78	dBm	44%	47%	Max. Download: 15 ... 25 MBit/s; Max. Upload: 4 ... 7 MBit/s
41	-99	dBm	-79	dBm	43%	46%	
40	-100	dBm	-80	dBm	42%	45%	Stabile und witterungsbeständige Verbindung möglich, schlechtes Wetter kann die Datenrate beeinträchtigen.
39	-101	dBm	-81	dBm	41%	44%	
38	-102	dBm	-82	dBm	40%	43%	
37	-103	dBm	-83	dBm	39%	42%	
36	-104	dBm	-84	dBm	38%	40%	
35	-105	dBm	-85	dBm	37%	39%	
34	-106	dBm	-86	dBm	36%	38%	
33	-107	dBm	-87	dBm	35%	37%	
32	-108	dBm	-88	dBm	34%	36%	
31	-109	dBm	-89	dBm	33%	35%	
30	-110	dBm	-90	dBm	32%	34%	Stabile Verbindung möglich, Witterungseinflüsse führen zu starken Schwankungen, gelegentliche Aussetzer sind hier wahrscheinlich.
29	-111	dBm	-91	dBm	31%	33%	
28	-112	dBm	-92	dBm	29%	31%	
27	-113	dBm	-93	dBm	28%	30%	
26	-114	dBm	-94	dBm	27%	29%	
25	-115	dBm	-95	dBm	26%	28%	
24	-116	dBm	-96	dBm	25%	27%	
23	-117	dBm	-97	dBm	24%	26%	
22	-118	dBm	-98	dBm	23%	25%	
21	-119	dBm	-99	dBm	22%	24%	
20	-120	dBm	-100	dBm	21%	22%	
19	-121	dBm	-101	dBm	20%	21%	
18	-122	dBm	-102	dBm	19%	20%	
17	-123	dBm	-103	dBm	18%	19%	
16	-124	dBm	-104	dBm	17%	18%	
15	-125	dBm	-105	dBm	16%	17%	Stabile Verbindung nur unter günstigen Bedingungen, sehr wetterempfindlich, Abbrüche möglich.
14	-126	dBm	-106	dBm	15%	16%	
13	-127	dBm	-107	dBm	14%	15%	
12	-128	dBm	-108	dBm	13%	13%	
11	-129	dBm	-109	dBm	12%	12%	
10	-130	dBm	-110	dBm	11%	11%	Max. Download: 0 ... 2.500 kBit/s; Max. Upload: 0 ... 500 kBit/s
9	-131	dBm	-111	dBm	9%	10%	
8	-132	dBm	-112	dBm	8%	9%	Keine stabile Verbindung möglich, Unterbrechungen, Aussetzer und Abbrüche sind sehr wahrscheinlich!
7	-133	dBm	-113	dBm	7%	8%	
6	-134	dBm	-114	dBm	6%	7%	
5	-135	dBm	-115	dBm	5%	6%	
4	-136	dBm	-116	dBm	4%	4%	
3	-137	dBm	-117	dBm	3%	3%	Max. Download: 0 ... 1.000 kBit/s; Max. Upload: 0 ... 200 kBit/s

ASU Tabelle für UMTS / HSDPA / HSPA+ (ASU Ausgabeklassen 0 ... 31)

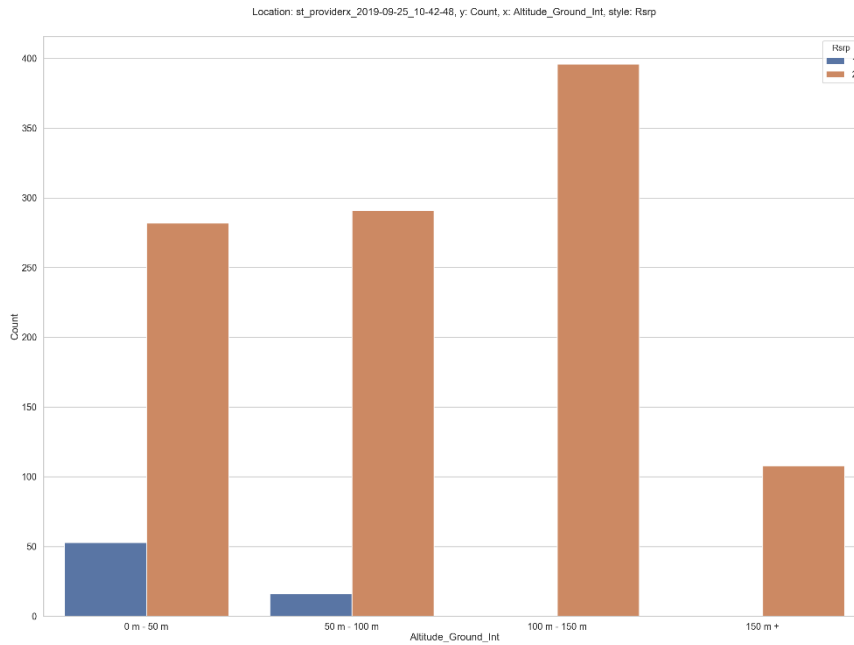
ASU	RSSI (-113 dBm)	RSSI (-116 dBm)	Prozent (Mwconn)	Bemerkung/Verfügbarkeit
31	-51 dBm	-54 dBm	100%	HSPA+ möglich (wenn verfügbar)
30	-53 dBm	-56 dBm	97%	HSPA+ möglich (wenn verfügbar)
29	-55 dBm	-58 dBm	94%	HSPA+ möglich (wenn verfügbar)
28	-57 dBm	-60 dBm	90%	HSPA+ möglich (wenn verfügbar)
27	-59 dBm	-62 dBm	87%	HSPA+ möglich (wenn verfügbar)
26	-61 dBm	-64 dBm	84%	HSPA+ möglich (wenn verfügbar)
25	-63 dBm	-66 dBm	81%	HSPA+ möglich (wenn verfügbar)
24	-65 dBm	-68 dBm	77%	HSPA+ möglich (wenn verfügbar)
23	-67 dBm	-70 dBm	74%	HSDPA, maximale Datenrate 7,2 Mbit/s
22	-69 dBm	-72 dBm	71%	HSDPA, maximale Datenrate 7,2 Mbit/s
21	-71 dBm	-74 dBm	68%	HSDPA, maximale Datenrate 7,2 Mbit/s
20	-73 dBm	-76 dBm	65%	HSDPA, maximale Datenrate 7,2 Mbit/s
19	-75 dBm	-78 dBm	61%	HSDPA, maximale Datenrate 7,2 Mbit/s
18	-77 dBm	-80 dBm	58%	HSDPA, maximale Datenrate 7,2 Mbit/s
17	-79 dBm	-82 dBm	55%	HSDPA, maximale Datenrate 7,2 Mbit/s
16	-81 dBm	-84 dBm	52%	HSDPA, maximale Datenrate 7,2 Mbit/s
15	-83 dBm	-86 dBm	48%	HSDPA, stabile Verbindung
14	-85 dBm	-88 dBm	45%	HSDPA, stabile Verbindung
13	-87 dBm	-90 dBm	42%	HSDPA, stabile Verbindung
12	-89 dBm	-92 dBm	39%	HSDPA, stabile Verbindung
11	-91 dBm	-94 dBm	35%	HSDPA, stabile Verbindung
10	-93 dBm	-96 dBm	32%	HSDPA möglich, keine Wetterreserve
9	-95 dBm	-98 dBm	29%	HSDPA möglich, keine Wetterreserve
8	-97 dBm	-100 dBm	26%	HSDPA möglich, keine Wetterreserve
7	-99 dBm	-102 dBm	23%	HSDPA möglich, keine Wetterreserve
6	-101 dBm	-104 dBm	19%	HSDPA möglich, keine Wetterreserve
5	-103 dBm	-106 dBm	16%	HSDPA möglich, instabile Verbindung
4	-105 dBm	-108 dBm	13%	HSDPA möglich, instabile Verbindung
3	-107 dBm	-110 dBm	10%	HSDPA möglich, instabile Verbindung
2	-109 dBm	-112 dBm	6%	Nur UMTS, Abbrüche wahrscheinlich
1	-111 dBm	-114 dBm	3%	Nur UMTS, Abbrüche wahrscheinlich
0	-113 dBm	-116 dBm	0%	Kein Netz

ASU Tabelle für GSM GPRS und EDGE

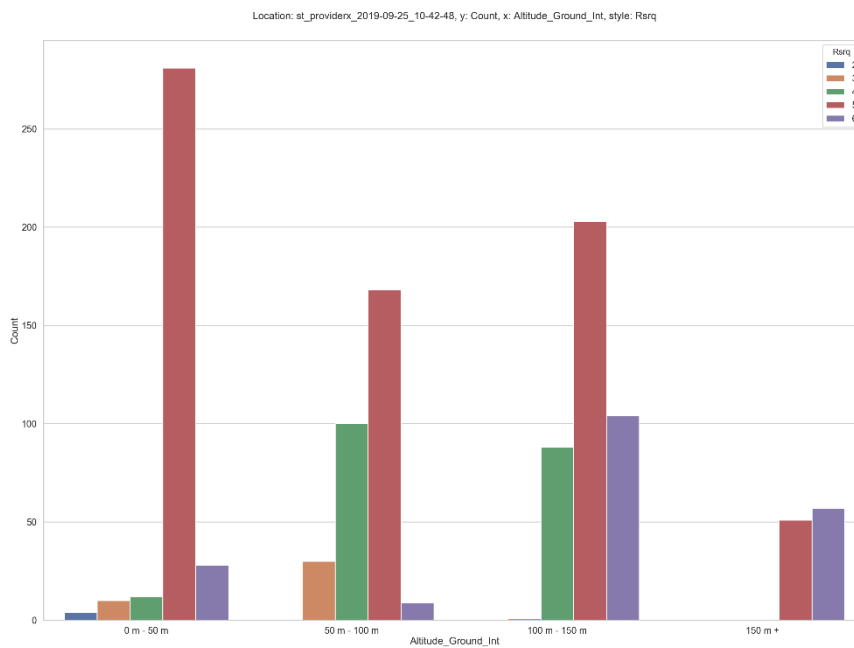
ASU	RSSI – alt (-111 dBm)	RSSI – neu (-113 dBm)	Prozent (MWconn)	Bemerkung/Verfügbarkeit
31	-49 dBm	-51 dBm	100%	E-EDGE möglich (bis zu 1 Mbit/s)
30	-51 dBm	-53 dBm	97%	E-EDGE möglich (bis zu 1 Mbit/s)
29	-53 dBm	-55 dBm	94%	E-EDGE möglich (bis zu 1 Mbit/s)
28	-55 dBm	-57 dBm	90%	E-EDGE möglich (bis zu 1 Mbit/s)
27	-57 dBm	-59 dBm	87%	E-EDGE möglich (bis zu 1 Mbit/s)
26	-59 dBm	-61 dBm	84%	EDGE, maximale Datenrate (220 kBit/s)
25	-61 dBm	-63 dBm	81%	EDGE, maximale Datenrate (220 kBit/s)
24	-63 dBm	-65 dBm	77%	EDGE, maximale Datenrate (220 kBit/s)
23	-65 dBm	-67 dBm	74%	EDGE, maximale Datenrate (220 kBit/s)
22	-67 dBm	-69 dBm	71%	EDGE, maximale Datenrate (220 kBit/s)
21	-69 dBm	-71 dBm	68%	EDGE, maximale Datenrate (220 kBit/s)
20	-71 dBm	-73 dBm	65%	EDGE, maximale Datenrate (220 kBit/s)
19	-73 dBm	-75 dBm	61%	EDGE, maximale Datenrate (220 kBit/s)
18	-75 dBm	-77 dBm	58%	EDGE, maximale Datenrate (220 kBit/s)
17	-77 dBm	-79 dBm	55%	EDGE, maximale Datenrate (220 kBit/s)
16	-79 dBm	-81 dBm	52%	EDGE, maximale Datenrate (220 kBit/s)
15	-81 dBm	-83 dBm	48%	EDGE, stabile Datenverbindung
14	-83 dBm	-85 dBm	45%	EDGE, stabile Datenverbindung
13	-85 dBm	-87 dBm	42%	EDGE, stabile Datenverbindung
12	-87 dBm	-89 dBm	39%	EDGE, sehr langsame Datenverbindung
11	-89 dBm	-91 dBm	35%	EDGE, sehr langsame Datenverbindung
10	-91 dBm	-93 dBm	32%	GPRS, maximale Datenrate (54 kBit/s)
9	-93 dBm	-95 dBm	29%	GPRS, maximale Datenrate (54 kBit/s)
8	-95 dBm	-97 dBm	26%	GPRS, stabile Datenverbindung
7	-97 dBm	-99 dBm	23%	GPRS, stabile Datenverbindung
6	-99 dBm	-101 dBm	19%	GPRS, stabile Datenverbindung
5	-101 dBm	-103 dBm	16%	GPRS, sehr langsame Datenverbindung
4	-103 dBm	-105 dBm	13%	GPRS, sehr langsame Datenverbindung
3	-105 dBm	-107 dBm	10%	GPRS, sehr langsame Datenverbindung
2	-107 dBm	-109 dBm	6%	Nur GSM, Abbrüche wahrscheinlich
1	-109 dBm	-111 dBm	3%	Nur GSM, Abbrüche wahrscheinlich
0	-111 dBm	-113 dBm	0%	Kein Netz

Weitere Plots aus den Messergebnissen:

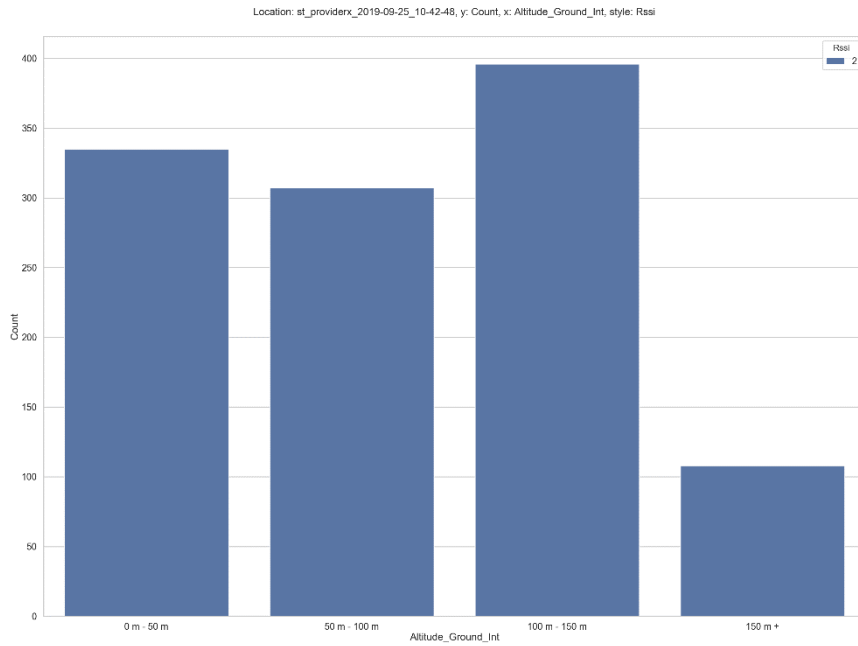
Als Datenquelle diente ein Flug in der Steiermark, bei dem Messdaten gleichzeitig für zwei Provider gesammelt wurden. Die Parameter RSRP, RSRQ, RSSI und SINR sind grafisch dargestellt, anhand der Skalierung aus Tabelle 6.7 bis Tabelle 6.9.



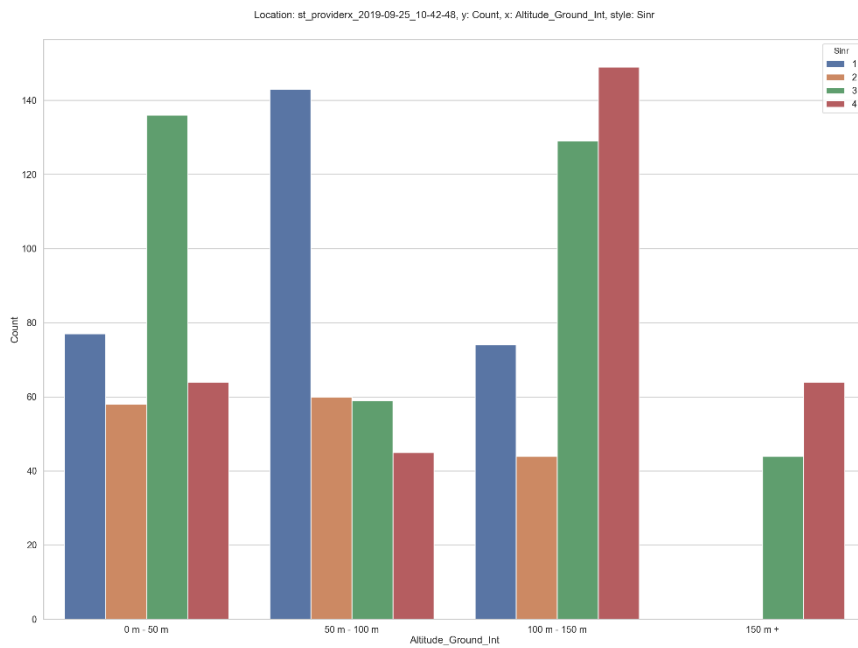
RSRP Werte Provider X



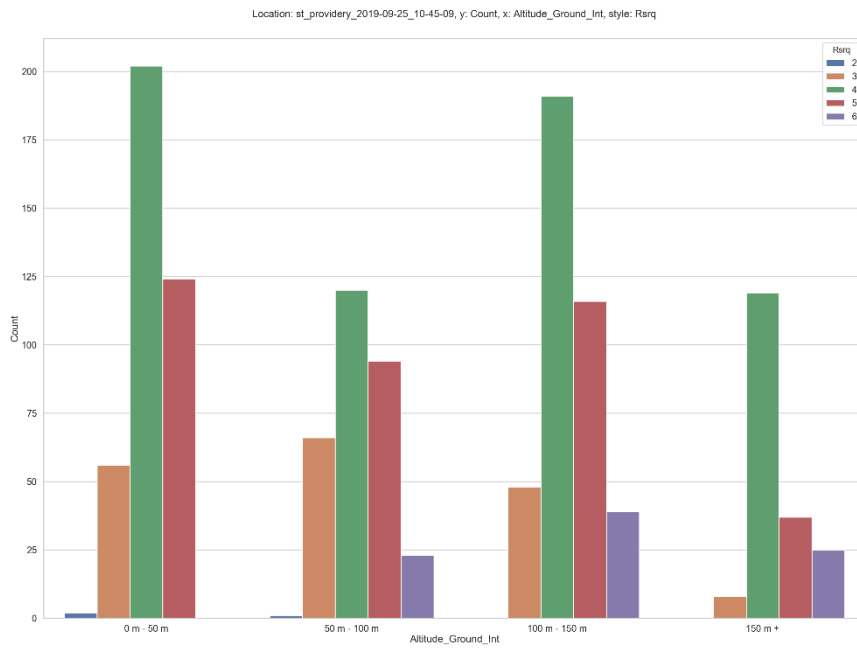
RSRQ Werte Provider X



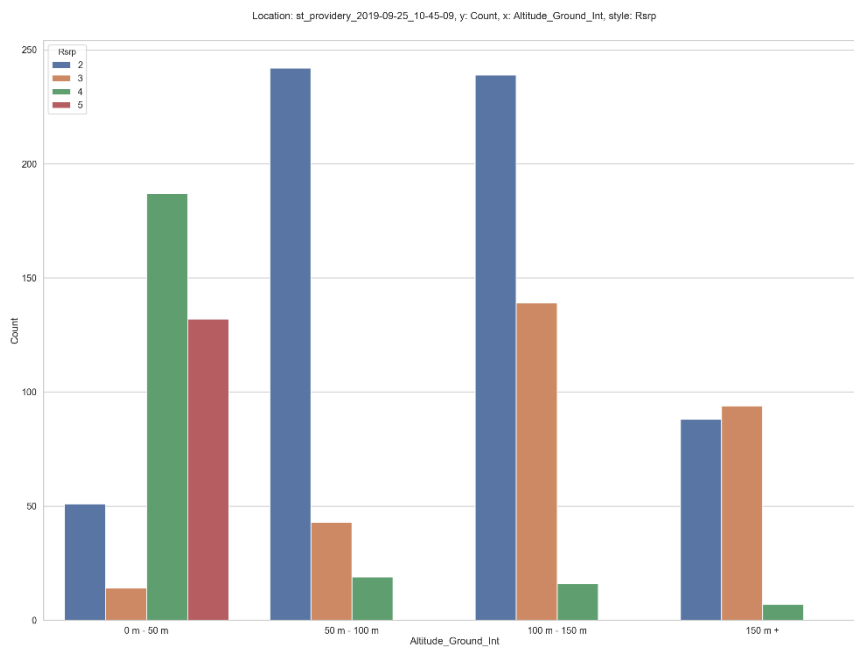
RSSI Werte Provider X



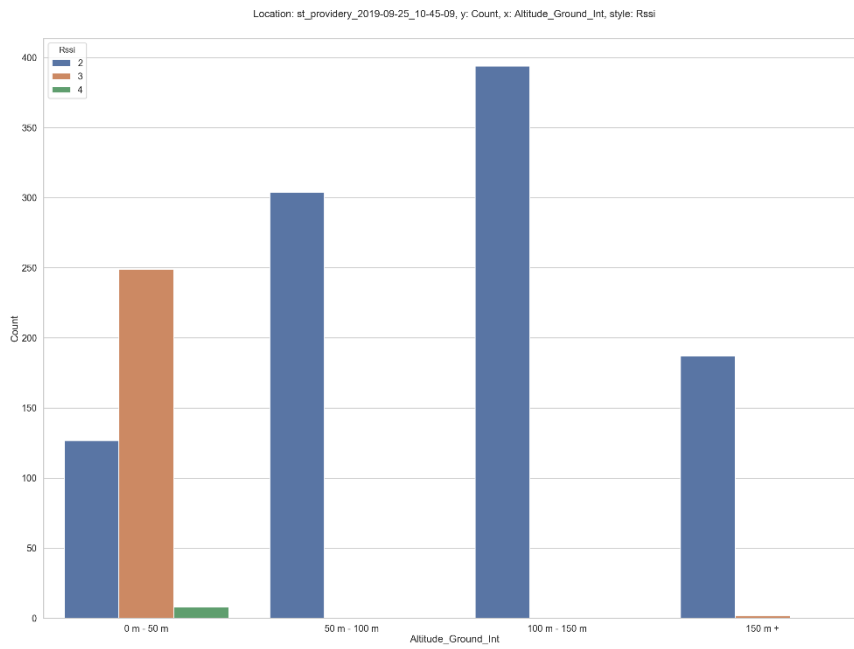
SINR Werte Provider X



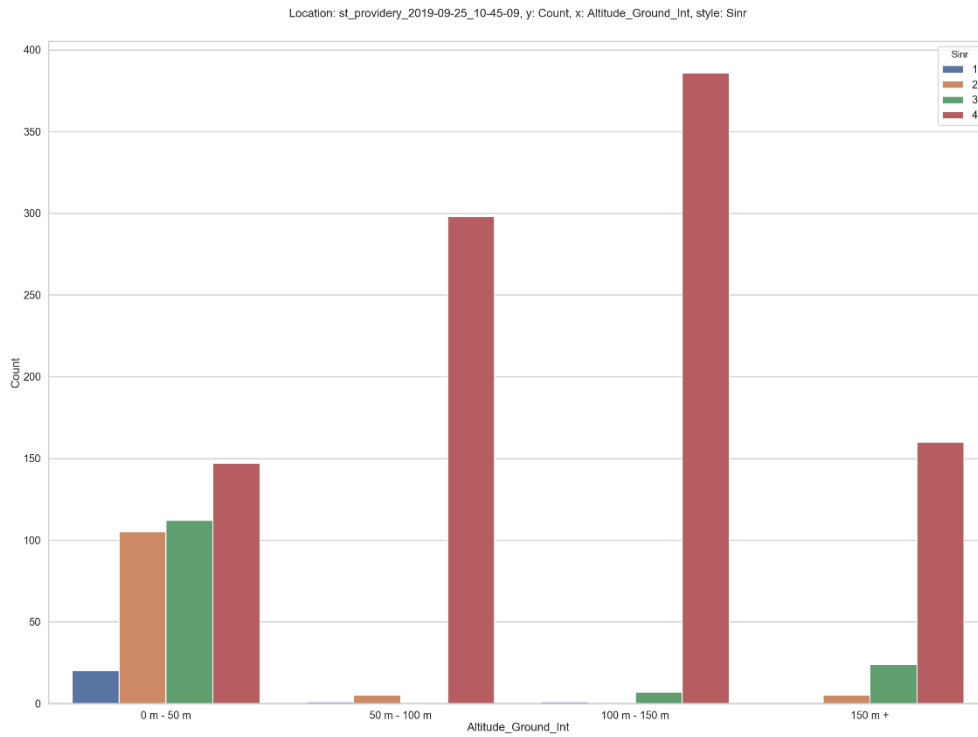
RSRP Werte Provider Y



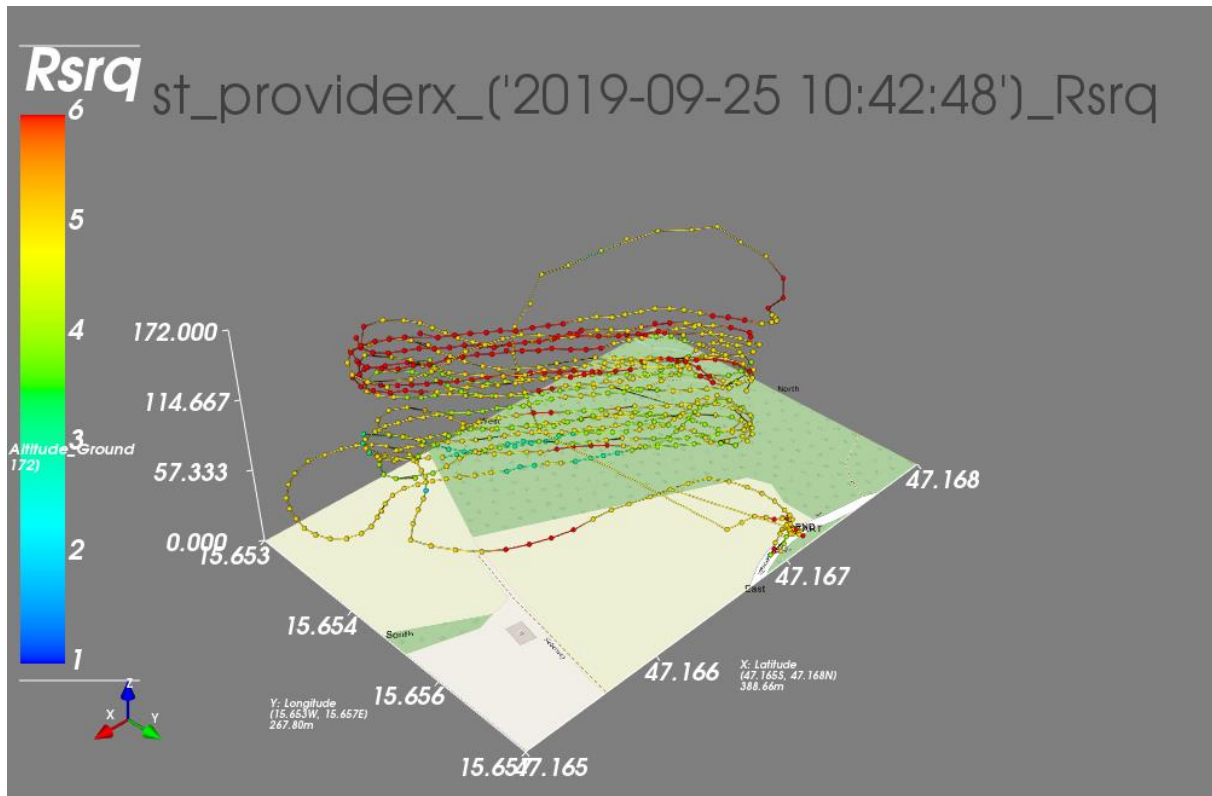
RSRQ Werte Provider Y



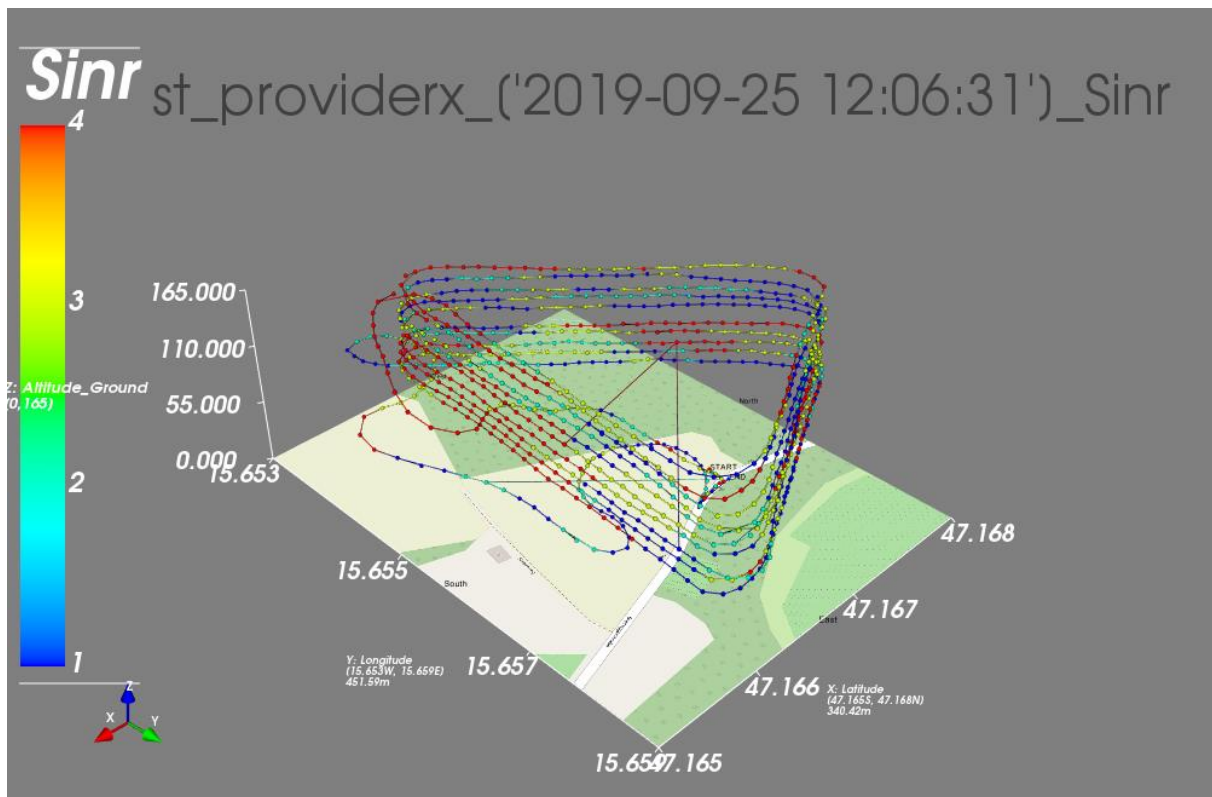
RSSI Werte Provider Y



SINR Werte Provider Y



3D Karte der RSRP Werte für Provider X aus dem vorigen Flug.



3D Plot von SINR Werten eines anderen Flugprofils am selben Ort

Anhang C: Lebenslauf



DI Klaus Kainrath

PERSÖNLICHE DATEN:

Mela-Spira-Straße 37a, A-8054 Graz

Tel.: +43650/9303608

Mail: klaus.kainrath@gmx.net

geb. am 09.01.1978 in Graz, Steiermark

Österreichischer Staatsbürger, verheiratet, zwei Kinder

AUSBILDUNG:

- 10|1988-10|1996 Bundesrealgymnasium Oeversee – Graz
 10|1996-12|2008 Studium der Telematik – Spezialisierung optische Nachrichtentechnik – TU Graz
 10|2013-12|2013 Diplomausbildung Projektmanagement – BFI Graz
 seit 2014 Doktorats-Studium in Elektrotechnik – Institut für Hochfrequenztechnik

BERUFSERFAHRUNG:

- 02|2002-08|2004 Nachhilfeunterricht Mathematik – Begleitendes Lernsystem – Graz
 10|2002-07|2004 EDV – Kursleiter in der Erwachsenenbildung – Graz – Club Körösi
 10|2003-02|2004 Kundenberater und Skipper für Segeln Echt – Graz (jetzt Suntours SL Sailing GmbH)
 01|2005-12|2013 Gutachter und Experte (seit 2011) für die Bundesprüfstelle für Positivprädikatisierung von Computer und Konsolenspielen – Bundesministerium für Familie und Jugend – Wien
 04|2010-09|2017 Wissenschaftlicher Mitarbeiter – FH JOANNEUM Graz – Institut für Luftfahrt/Aviation
 seit 10|2017 Hochschullektor – FH JOANNEUM Graz – Institut Luftfahrt, Institut Produktionstechnik

FORTBILDUNGEN:

- 2010 Summer Business School – Einführung ins Projektmanagement, FH JOANNEUM, Graz
 2011 DO-178b/DO-254 Zertifizierungs-Workshop – TTTech, Wien
 2013 Altera FPGA Design, Timing und Simulation Training – El Camino, Mainburg
 2014 DO-178c/DO-254 Zertifizierungs-Workshop – AAI Wien
 2019 Aviation Cyber-Security Standards in Practices – Eurocae Paris

PERSÖNLICHE FÄHIGKEITEN:

- Sprachkenntnisse Deutsch (Muttersprache), Englisch in Wort und Schrift (verhandlungssicher), Französisch, Spanisch, Slowakisch Grundkenntnisse
 EDV-Kenntnisse Windows, Linux, MS-Office, Altera Quartus II, Eagle CAD, Matlab
 Sonst. Kenntnisse Führerschein A/B, Segelschein FB 2

SOZIALE KOMPETENZEN:

- Gute Führungsqualitäten, hohe Einsatzbereitschaft und Zielstrebigkeit
 Gute Teamfähigkeit und soziale Kompetenz, kommunikativ und streßresistent

INTERESSEN UND HOBBYS:

- Musik, Elektronik, Computer, Fußball, Reisen, Segeln
 seit 6|1996 Songwriter und Sänger der Band *Surfacetension* – www.surfacetension.at

