

Nutzwertanalyse neuartiger Datenlinktechnologie im Lufttransportsystem

Alexander Hillebrecht

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Luftverkehr
Hamburg



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Forschungsbericht 2025-25

Nutzwertanalyse neuartiger Datenlinktechnologie im Lufttransportsystem

Alexander Hillebrecht

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Luftverkehr
Hamburg

178 Seiten
79 Bilder
29 Tabellen
173 Literaturstellen



Herausgeber:

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e. V.
Wissenschaftliche Information
Linder Höhe
D-51147 Köln

ISSN 1434-8454
ISRN DLR-FB-2025-25
Erscheinungsjahr 2025
DOI: [10.57676/grw4-8925](https://doi.org/10.57676/grw4-8925)

Erklärung des Herausgebers

Dieses Werk – ausgenommen anderweitig gekennzeichnete Teile – ist lizenziert unter den Bedingungen der Creative Commons Lizenz vom Typ Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0), abrufbar über <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>

Lizenz



Creative Commons Attribution 4.0 International

Luftverkehr, Lufttransportsystem, Datenlink, Nutzwertanalyse

Alexander HILLEBRECHT
DLR, Institut für Luftverkehr, Hamburg

Nutzwertanalyse neuartiger Datenlinktechnologie im Lufttransportsystem

Dissertation Technische Universität Hamburg

Der Informationsaustausch mittels Luftfahrt Datenlink ist eine elementare Säule des modernen, leistungsfähigen Luftverkehrsmanagementsystems. Da dieses kontinuierlich gesteigerten Anforderungen und einem stetigem Modernisierungsdruck ausgesetzt ist, ist auch die Modernisierung der Luftfahrt Datenlinktechnologie von zentralem Interesse. Dies trifft in besonderem Maße die Bereitstellung von neuen Funktionalitäten zu, wie zum Beispiel der Vernetzung von Luftverkehrsteilnehmern untereinander, um mit der Bildung sogenannter ad-hoc-Netzwerke Alternativen für den Informationsaustausch auch in ozeanischen oder abgelegenen Regionen zu ermöglichen.

Eine besondere Herausforderung besteht in diesem Zusammenhang in der frühzeitigen Abschätzung des unter technisch-operationellen Gesichtspunkten aggregierten Nutzwertes dieser Technologie für das Lufttransportsystem unter gleichzeitiger Identifikation erster technischer Auslegungsparameter, welche den Nutzwert und die Umsetzbarkeit der betreffenden Technologie wesentlich bestimmen.

Die vorliegende Arbeit beschreibt diese Wechselwirkung zwischen Nutzwert der Datenlinktechnologie und ihren Kernausslegungsparametern unter Einbeziehung eines möglichst realitätsnahem Kommunikationsverhalten zwischen den Luftverkehrsteilnehmern. Die Untersuchungen zeigen einen hohen potentiellen Nutzwert eines durch die Beispieltechnologie ermöglichten ad-hoc-Netzwerkes für die Luftfahrt Datenkommunikation im untersuchten ozeanischen Luftraum und zeigen Bereiche für die Wahl der Kernausslegungsparameter auf, welche hierfür erforderlich sind.

air traffic, air transport system, data link, utility analysis

(Published in German)

Alexander HILLEBRECHT
German Aerospace Center (DLR), Institute of Air Transport, Hamburg

A utility analysis of novel aeronautical data link technology

Doctoral Thesis Hamburg University of Technology

The exchange of information via the aviation data link is a fundamental pillar of a modern, efficient air traffic management system. As this is subject to continuously increasing requirements and constant pressure to modernize, the modernization of aviation data link technology is also of central interest. This applies in particular to the provision of new functionalities, such as the networking of air traffic participants with each other in order to enable alternatives for the exchange of information in oceanic or remote regions by forming so-called ad-hoc networks.

A particular challenge in this context is the early estimation of the aggregated utility value of this technology for the air transport system from a technical and operational point of view, while at the same time identifying key technical design parameters that significantly determine the utility value and feasibility of the technology in question.

The present work describes this interrelation between the utility value of the data link technology and its core design parameters, considering operationally relevant communication behavior between air traffic participants. The investigations show a high potential utility value of an ad-hoc network enabled by the datalink technology for aeronautical data communication in the oceanic airspace and highlight areas for the choice of the key design parameters required to enable the high utility value.

Nutzwertanalyse neuartiger Datenlinktechnologie im Lufttransportsystem

**Vom Promotionsausschuss der Technischen
Universität Hamburg**

**zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

genehmigte Dissertation (Monographie)

von

Alexander Hillebrecht

aus

Stadthagen

2025

Übersicht der Gutachter

1. Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Volker Gollnick
2. Gutachter:	PD Dr. rer. nat. habil. Corinna Schmitt
Vorsitzender des Prüfungsausschusses:	Prof. Dr. rer. pol. Christian Lüthje
Tag der mündlichen Prüfung:	20.06.2025

Doctrina est fructus dulcis radicis amarae.

Catonis Monosticha 40

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Luftverkehr des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt (DLR) in Hamburg. Mein Dank gilt all jenen, die zum Gelingen dieser Arbeit maßgeblich beigetragen haben.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. Volker Gollnick von der Technischen Universität Hamburg, welcher mich in den zurückliegenden Jahren im stetigen wissenschaftlichen Austausch wesentlich unterstützt hat. Seine sehr gute wissenschaftliche Betreuung meines Promotionsvorhabens in vielen konstruktiven und ideengebenden Gesprächen war ein elementarer Baustein für dessen erfolgreichen Abschluss. Ebenso möchte ich PD Dr. Corinna Schmitt von der Universität der Bundeswehr München für die Übernahme des Zweitgutachtens danken und für den sehr hilfreichen Austausch insbesondere während der Finalisierung der Dissertationsschrift. Herrn Prof. Dr. Christian Lühje danke ich für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses

Danken möchte ich auch meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Luftverkehr – die kollegiale Atmosphäre und die Kombination aus Expertisen verschiedener Bereiche des Lufttransportsystems waren ein weiteres wichtiges Element für den Erfolg meines Promotionsvorhabens. Besonders hervorheben möchte ich hierbei meinen Kollegen Dr. Tobias Marks. Die zahlreichen fachlichen und kritischen Diskussionen haben wichtige Impulse für meine Arbeit gesetzt. Insbesondere seine komplementären Forschungstätigkeiten im Projektkontext des zugrunde liegenden Projektes Inter-Aircraft Network, haben mir eine geeignete thematische Fokussierung meiner Arbeit ermöglicht. Ebenso danken möchte ich Dr. Florian Linke und Dr. Alexander Lau für die fachlichen Freiräume während meiner Tätigkeit beim DLR, welche für das Erstellen dieser Arbeit notwendig waren.

Schließlich möchte ich auch meiner Familie einen großen Dank aussprechen. Meine Frau Leah und meine Kinder Anja und Jakob waren mir in den Jahren der Promotion stets eine wichtige Stütze, haben mir einen Ausgleich zu meiner beruflichen, wissenschaftlichen Tätigkeit verschafft und dafür gesorgt, dass ich das große Ganze nie aus den Augen verloren habe.

Ich widme diese Arbeit all jenen, die den Abschluss meiner Promotion nicht mehr erleben durften.

Hamburg im Juli 2025

Alexander Hillebrecht

Zusammenfassung

Moderne leistungsfähige Luftverkehrsmanagementsysteme sind eine elementare Säule für die Sicherstellung eines sicheren und effizienten Betriebs von Luftfahrzeugen der kommerziellen Luftfahrt. Neben geeigneten Verkehrsleitverfahren greifen Luftverkehrsmanagementsysteme dabei auf Technologien der Kommunikation, Navigation und Überwachung zurück. Unter dem Eindruck eines kontinuierlichen Wachstums des Luftverkehrsaufkommens und der damit einhergehenden Verdichtung des Luftverkehrs sowie gesteigerten Anforderungen an wirtschaftliche Effizienz und Umweltverträglichkeit des Luftfahrtsektors steht das Flugverkehrsmanagement und die damit verbundenen Flugführungstechnologien unter einem konstanten Modernisierungsdruck. Dies trifft in besonderem Maße auf Technologien zu, welche neue Funktionalitäten im Lufttransportsystem bereitstellen, wie zum Beispiel die Fähigkeit Luftverkehrsteilnehmer untereinander zu vernetzen und mittels sogenannter ad-hoc-Netzwerke Alternativen für den Informationsaustausch auch mit Einrichtungen am Boden zu ermöglichen.

Eine besondere Herausforderung besteht in diesem Zusammenhang in der frühzeitigen Abschätzung des unter technisch-operationellen Gesichtspunkten aggregierten Nutzwertes einer Flugverkehrsmanagementtechnologie für das Lufttransportsystem unter gleichzeitiger Identifikation erster technischer Auslegungsparameter, welche den Nutzwert und die Umsetzbarkeit der betreffenden Technologie wesentlich bestimmen.

Die vorliegende Arbeit setzt sich daher zum Ziel diese Wechselwirkung zwischen Nutzwert einer Flugführungstechnologie und ihren Kernauslegungsparametern zu beschreiben und am Beispiel eines Datenlinks für die Kommunikation zwischen den Luftverkehrsteilnehmern exemplarisch umzusetzen. Ein Schwerpunkt der Betrachtung ist dabei der zu erwartende Nutzwert eines durch die Beispieltechnologie ermöglichten, zwischen den Luftverkehrsteilnehmern aufgespannten ad-hoc-Netzwerkes für Anwendungsfälle, die für den sicheren und effizienten Betrieb im Lufttransportsystem relevant sind.

Hierzu werden Kernauslegungsparameter der Beispieltechnologie identifiziert, sicherheits- und betriebsrelevante Anwendungsfälle aus dem Bereich der Luftfahrt-datenkommunikation beschrieben und ein zugehöriger Nutzwert definiert. Weiterhin wird ein auf Beispieltechnologie und Anwendungsfälle zugeschnittenes, operationelles Konzept mit direktem Bezug zu realen Gegebenheiten im Lufttransportsystem beschrieben. Dieses beschreibt den Einsatz der Beispieltechnologie in einem ozeanischen Luftraum. Mittels eines geeigneten Modells wird anschließend der Einsatz der Beispieltechnologie im operationellen Szenario simuliert und der Nutzwert für die Anwendungsfälle sowie die Wechselwirkung mit den Kernauslegungsparametern der Beispieltechnologie ermittelt.

Die Untersuchungen zeigen einen hohen potentiellen Nutzwert eines durch die Beispieltechnologie ermöglichten ad-hoc-Netzwerkes für die Luftfahrt-datenkommunikation

im untersuchten ozeanischen Luftraum und zeigen Bereiche für die Wahl der Kernauslegungsparameter auf, welche hierfür erforderlich sind.

Neben einer Übertragung der abstrakten, übergeordneten Vorgehensweise auf andere Kategorien von Flugführungstechnologien im Zuge einer breiteren Verwendung der vorgestellten Methodik ist auch eine Vertiefung der entwickelten Modellkette von Interesse, um beispielsweise weitere Parameter und Charakteristika der Beispieltechnologie berücksichtigen zu können. Modell und Methodik können darüber hinaus verwendet werden für die Untersuchung von neuartigen Anwendungsfällen, welche durch die Beispieltechnologie und den direkten Informationsaustausch der Luftverkehrsteilnehmer erst ermöglicht werden.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungen	IV
Tabellen.....	VIII
Nomenklatur.....	IX
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	5
1.3 Vorgehen	5
2 Technisch-operationelles Umfeld.....	9
2.1 Flugführungsanwendungen und -technologien	10
2.1.1 Kommunikation.....	10
2.1.2 Navigation	14
2.1.3 Luftraumüberwachung.....	17
2.2 Beteiligte Parteien	18
2.2.1 Luftverkehrsteilnehmer.....	20
2.2.2 Luftverkehrskontrolle und Flugsicherung.....	24
2.2.3 Flugbetreiber / Luftfahrtgesellschaft.....	24
2.2.4 Luftfahrtkommunikations- und -navigationsdienstleister	25
2.3 Technologieeinführung	25
2.4 Flugphasen	27
2.5 Luftraumorganisation.....	28
3 Technologieübersicht LuftfahrtDatenlink.....	30
3.1 Referenztechnologie LDACS Luft-Luft-Datenlink.....	30
3.2 Mobile ad-hoc Netzwerke	33
3.3 Technologische Herausforderungen.....	35
4 Anwendungsfall Luftfahrt-Datenkommunikation	39
4.1 Anwendungsauswahl.....	39
4.2 Flugführungskommunikation.....	41
4.3 Operationelle Luftfahrtkommunikation	46

Inhaltsverzeichnis

4.4	Definition Nutzwerte.....	47
5	Operationelles Konzept.....	50
5.1	Räumliche Einordnung	50
5.2	Flugbewegungen	51
5.3	Bodeninfrastruktur	53
5.4	Rahmenbedingungen Konnektivität.....	54
5.5	Rahmenbedingungen Kommunikation.....	55
6	Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung	56
6.1	Modellübersicht	56
6.2	Flugbewegungssimulation	58
6.3	Konnektivität	61
6.3.1	Verbindungstypen.....	61
6.3.2	Vernetzung.....	65
6.4	Kommunikationsbedarf	70
6.4.1	Flugführungskommunikation.....	71
6.4.2	Operationelle Luftfahrtkommunikation	75
6.4.3	Nachrichtenintervalle.....	77
6.4.4	Definitionen.....	78
6.5	Kommunikationsbedarfsabdeckung	81
6.5.1	Zeitkontinuierliche Cluster.....	82
6.5.2	Abdeckung des Kommunikationsbedarfs	83
6.5.3	Konnektivitätsbedingte Datenraten.....	83
6.6	Modellverifikation	84
6.7	Modellvalidierung	86
7	Untersuchungsergebnisse	89
7.1	Konnektivität	89
7.1.1	Luft-Luft-Konnektivität	90
7.1.2	Luft-Boden-Konnektivität	90
7.1.3	Verbindungsanzahl	91
7.1.4	Länge der Übertragungskette	92
7.1.5	Verbindungsdauer	93

7.1.6	Clustereigenschaften	93
7.2	Kommunikationsbedarf	95
7.2.1	Zusammensetzung der Luftfahrt Datenkommunikation	96
7.2.2	Häufigkeitsverteilung Datenvolumen und Nachrichtenzahl	98
7.2.3	Zeitliche Verteilung	100
7.2.4	Räumliche Verteilung der Flugführungskommunikation	101
7.2.5	Räumliche Verteilung der operationellen Luftfahrtkommunikation	105
7.3	Abdeckung des Kommunikationsbedarfs	108
7.3.1	Cluster-Datenrate	109
7.3.2	Gateway-Datenrate	111
7.3.3	Abdeckung Kommunikationsbedarf	113
8	Ergebnisdiskussion	114
8.1	Ergebnisübersicht	114
8.2	Empfehlung für die Wahl der Kernparameter	116
8.3	Methodenbewertung	119
8.4	Ergebniseinordnung	120
8.5	Einordnung Nutzwert	122
9	Zusammenfassung und Ausblick	125
10	Literaturverzeichnis	132
A.	Anhang	147

Abbildungen

Abbildung 1-1: Datenlink Entscheidungsrahmen nach [18]	6
Abbildung 1-2: Gesamtdarstellung Vorgehen	8
Abbildung 2-1: Einordnung der CNS-Technologien in Kontext Lufttransportsystem.....	9
Abbildung 2-2: Topologie der Kommunikation in der Flugführung	12
Abbildung 2-3: Topologie der funkgestützten Navigation in der Flugführung	16
Abbildung 2-4: Topologie der Luftraumüberwachung in der Flugführung.....	18
Abbildung 2-5: Flugführungsanwendungen und beteiligte Parteien nach [2, 3]	19
Abbildung 2-6: Beteiligte Parteien in der Flugführungsavionik und -infrastruktur	20
Abbildung 2-7: Einordnung Luftraumnutzer nach ICAO [48, 49]	21
Abbildung 2-8: Mittlere Flugstundenzahl je Luftfahrzeug nach Betriebsart (USA, 2019) [52–55]	23
Abbildung 2-9: Repräsentatives Einführungsszenario für neue Flugführungstechnologie [61–64]	27
Abbildung 2-10: Flugphasen im kommerziellen Transportflug basierend auf [10, 67] ...	28
Abbildung 2-11: Schematische Luftraumstruktur am Beispiel Deutschlands basierend auf [71]	29
Abbildung 3-1: Luft-Luft (direkt)	34
Abbildung 3-2: Luft-Boden (direkt).....	34
Abbildung 3-3: Luft-Luft (indirekt).....	34
Abbildung 3-4: Luft-Boden (indirekt).....	34
Abbildung 4-1: CNS-Anwendungsauswahl für die Nutzwertuntersuchung	41
Abbildung 5-1: Nordatlantische ozeanische Kontrollzonen [106].....	51
Abbildung 5-2: VHF-Funkabdeckung im NAT bei Flugfläche 300 [73]	54
Abbildung 5-3: Funkreichweite in Abhängigkeit von der Flughöhe nach [30]	55
Abbildung 6-1: Strukturelle Darstellung des Simulationsmodells [106, 150–152]	57
Abbildung 6-2: Detailansicht Flugbewegungssimulation	58
Abbildung 6-3: Westgerichteter Flugverkehr im Simulationsbereich mit Randzone [152]	59
Abbildung 6-4: Flugspurenverteilung für das Szenario mit westgerichtetem Flugverkehr [152].....	60
Abbildung 6-5: Abbildung der Flugtrajektorien [152]	60

Abbildung 6-6: Detailansicht Konnektivitätssimulation	61
Abbildung 6-7: Flugspuren mit Bodenstationen und Abdeckungsbereichen [152]	62
Abbildung 6-8: Detailansicht Cluster-Analyse	66
Abbildung 6-9: Arten von Konnektivität und Vernetzung im AANET [151]	67
Abbildung 6-10: Detailansicht Datenkommunikationsbedarf	70
Abbildung 6-11: Zeitabstände zwischen Einzelnachrichten am Beispiel CRD [150]	78
Abbildung 6-12: Detail Datenübertragungsanalyse	81
Abbildung 6-13: Schematische Kommunikationsbedarfsabdeckung durch das AANET ..	81
Abbildung 6-14: Übersicht aggregierte Datenraten im AANET	82
Abbildung 6-15: Prüfung Datenkommunikationsverlauf Einzelflug	86
Abbildung 7-1: Luft-Luft-Konnektivität ($1 - \overline{\alpha_0}$) in Abhängigkeit von e_f und r_a [152] ..	90
Abbildung 7-2: Luft-Boden-Konnektivität ($1 - \overline{\gamma_0}$) in Abhängigkeit von e_f und r_a [152]	91
Abbildung 7-3: Zahl an Luft-Luft-Verbindungen ($\overline{N_C}$) in Abhängigkeit von e_f und r_a [152]	92
Abbildung 7-4: Länge der Übertragungskette ($\overline{N_h}$) in Abhängigkeit von e_f und r_a [152]	92
Abbildung 7-5: Zahl der Gateways pro Cluster (GPC) in Abhängigkeit von e_f und r_a [151]	94
Abbildung 7-6: Gateways pro Netzwerkknoten (GPN) in Abhängigkeit von e_f und r_a [151]	94
Abbildung 7-7: Gateways pro Netzwerkknoten mit Bodenkonnektivität (GPN') [151] ...	95
Abbildung 7-8: Absolutes und kumuliertes Datenvolumen für AOC-Anwendungen [106]	98
Abbildung 7-9: Absolute und kumulierte Nachrichtenhäufigkeit für AOC-Anwendungen [106]	99
Abbildung 7-10: Absolutes und kumuliertes Datenvolumen für ATS-Anwendungen [106]	99
Abbildung 7-11: Absolute und kumulierte Nachrichtenhäufigkeit für ATS-Anwendungen [106]	100
Abbildung 7-12: Nachrichtenzahl (blau) und Datenvolumen (rot) im Simulationszeitraum	100
Abbildung 7-13: Geographische Verteilung der CRD-Anwendung [106]	101
Abbildung 7-14: Geographische Verteilung der ADS-C Anwendung (Start, Ende, Ereignis) [106]	102

Abbildungen

Abbildung 7-15: Geographische Verteilung der ADS-C Anwendung (periodisch) [106]	102
Abbildung 7-16: Geographische Verteilung der Einzelanwendung ACM [106]	103
Abbildung 7-17: Geographische Verteilung des ATS-Nachrichtenaufkommens	104
Abbildung 7-18: Geographische Verteilung des ATS-Datenvolumens [106]	104
Abbildung 7-19: Geographische Verteilung der FLTSTAT-Aktivierungen	105
Abbildung 7-20: Geographische Verteilung der MAINTPR-Aktivierungen	106
Abbildung 7-21: Geographische Verteilung der POSRPT-Aktivierungen	106
Abbildung 7-22: Geographische Verteilung der WXGRAPH-Aktivierungen	107
Abbildung 7-23: Geographische Verteilung des AOC-Nachrichtenaufkommens	108
Abbildung 7-24: Geographische Verteilung des AOC-Datenvolumens [106]	108
Abbildung 7-25: Cluster-Datenrate (δ_{CL}) im Zeitverlauf, Konfiguration A [150]	109
Abbildung 7-26: δ_{CL} im Zeitverlauf, Konfiguration B [150]	110
Abbildung 7-27: δ_{CL} im Zeitverlauf, Konfiguration C [150]	110
Abbildung 7-28: δ_{CL} im Zeitverlauf, Konfiguration D	111
Abbildung 7-29: Mittlere Gateway-Datenrate ($\bar{\delta}_{GW}$) [<i>bit/s</i>] über e_f und r_a [150]	112
Abbildung 7-30: 99-Perzentil Gateway-Datenrate [<i>bit/s</i>] ($\delta_{0.99,GW}$) über e_f und r_a [150]	112
Abbildung 7-31: Mittlerer Anteil an übertragenem ATS und AOC Datenvolumen [-] ($\bar{F}$) [150]	113
Abbildung A-1: Definition der OCA im Simulationsbereich	148
Abbildung A-2: Geographische Verteilung der FLTPLAN-Anwendung	150
Abbildung A-3: Geographische Verteilung der FREETEXT-Anwendung	150
Abbildung A-4: Geographische Verteilung der FUEL-Anwendung	150
Abbildung A-5: Geographische Verteilung der NOTAM-Anwendung	151
Abbildung A-6: Geographische Verteilung der WXRT-Anwendung	151
Abbildung A-7: Geographische Verteilung der ENGINE-Anwendung	151
Abbildung A-8: Geographische Verteilung der MAINTRT-Anwendung	152
Abbildung A-9: Anzahl Datenpunkte für δ_{GW} und Standardabweichung	153
Abbildung A-10: Anzahl der Datenpunkte für F mit Extremwerten und Standardabweichung	154
Abbildung A-11: Mittelwert und Konfidenzintervall der Kommunikationsbedarfsabdeckung F	155

Abbildung A-12: Mittelwert und Konfidenzintervall der Gateway-Datenrate δ_{GW} 156

Tabellen

Tabelle 2-1: Technologien der Luftfahrtkommunikation nach [2, 3, 6].....	13
Tabelle 2-2: Technologien der funkbasierten Luftfahrtnavigation nach [2, 6, 37]	15
Tabelle 2-3: Technologien und Verfahren der Flugüberwachung nach [2, 37].....	17
Tabelle 2-4: Flugstunden und Betriebsarten für Luftfahrzeuge (USA, 2019) [52–55]...	22
Tabelle 3-1: Vergleich der Eckdaten von VDL M2 und LDACS Luft-Boden-Datenlink ..	31
Tabelle 3-2: Multilink-Umgebung nach [3, 32]	31
Tabelle 3-3: Anwendungsmöglichkeiten des LDACS Luft-Luft-Datenlinks	33
Tabelle 3-4: Kategorisierung von ad-hoc Netzwerken nach [76]	35
Tabelle 3-5: Auslegungsaspekte des LDACS Luft-Luft-Datenlinks nach OSI-Schichten.	37
Tabelle 4-1: Leistungsanforderungen an die Luftraumüberwachung nach [120].....	43
Tabelle 4-2: Allgemeine Übersicht der Datenlink-Einzelanwendungen	44
Tabelle 4-3: Leistungsanforderungen an die Kommunikation nach [120].....	45
Tabelle 5-1: Flugbewegungen je NAT-OCA 2014 bis 2023 [137–145, 65] mit Referenzjahr 2019	53
Tabelle 6-1: Übersicht Mobilitätsdatensätze	59
Tabelle 6-2: Parametervariation Konnektivität	62
Tabelle 6-3: Modellübersicht Luftfahrt Datenkommunikation [106]	71
Tabelle 6-4: Kommunikationsprofil ATS [106].....	72
Tabelle 6-5: Kommunikationsprofil AOC [106]	77
Tabelle 6-6: Validierung der ADS-C Nachrichtenhäufigkeit [106].....	87
Tabelle 6-7: Validierung der CPDLC/CRD Nachrichtenhäufigkeit [106].....	88
Tabelle 7-1: Beispielkonfigurationen für Kernparameter.....	89
Tabelle 7-2: Anteile Nachrichtenzahl und Datenvolumen von ATS und AOC	96
Tabelle 7-3: Aufteilung des Kommunikationsbedarfs auf Kommunikationsrichtung ...	97
Tabelle 7-4: Nachrichten- und Datenvolumensanteile der ATS- und AOC Einzelanwendungen	97
Tabelle 8-1: Auslegungsparameter und Nutzwert	117
Tabelle 8-2: Empfohlener Auslegungsbereich und Konnektivität	118
Tabelle A-10-1: Flugphasendefinition nach CICTT, ICAO [67].....	147
Tabelle A-10-2: Koordinaten der OCA-Eckpunkte.....	148
Tabelle A-10-3: Übersicht der verwendeten VHF-Bodenstationen	149

Nomenklatur

Abkürzungen und Kurzwörter

0...9

4DTRAD *4D trajectory datalink*

A

A2A *air-to-air, Luft-Luft-Verbindung*

A2G *air-to-ground, Luft-Boden-Verbindung*

AAC *airline administrative communication,*
administrative Luftfahrtkommunikation

AANET *aeronautical ad-hoc network,*
Luftfahrt ad-hoc Netzwerk

ACAS *airborne collision avoidance system*

ACL *ATC clearance*

ACM *ATC context management*

ADS-B *automatic dependent surveillance – broadcast*

ADS-C *automatic dependent surveillance - contract*

AeroMACS *aeronautical mobile airport communication system*

AMC *ATC microphone check*

AOC *aeronautical operational communication*

APC *aeronautical passenger communication*

APT *airport, Flughafen*

ARINC *Aeronautical Radio Incorporated*

ATM *air traffic management, Flugverkehrsmanagement*

ATN *aeronautical telecommunication network,*
Luftfahrt-Kommunikationsnetzwerk

ATS *air traffic services, Flugführungsdienste*

ATSC *air traffic services Communication,*
Flugführungskommunikation

B

BIRD Luftkontrollzone Reykjavík

C

CNS *communication, navigation and surveillance*

CPDLC *controller-pilot data link communications*

CRD *clearance request and delivery*

Nomenklatur

CS	<i>certification specification</i>
CSP	<i>communication service provider</i>
CZQX	Luftkontrollzone Gander
D	
D-ATIS	<i>datalink automatic terminal information service</i>
DCL	<i>departure clearance</i>
DLIC	<i>datalink initiation capability</i>
DRNP	<i>dynamic required navigation performance</i>
DSC	<i>downstream clearance</i>
DT	<i>delivery time</i>
D-TAXI	<i>datalink-taxi</i>
E	
EASA	<i>European Union Aviation Safety Agency,</i> Europäische Agentur für Flugsicherheit
ECEF	<i>earth-centered, earth-fixed coordinate system,</i> Geozentrisches Koordinatensystem
EGGX	Luftkontrollzone Shanwick
ENOB	Luftkontrollzone Bodø
ENR	<i>en-route, Streckenflug</i>
ET	<i>expiration time</i>
EUROCONTROL	<i>European Organisation for the Safety of Air Navigation,</i> Europäische Organisation zur Sicherung der Luftfahrt
EVT	<i>event, Ereignis</i>
F	
F	<i>forward, Vorwärts-(kommunikation)</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FANET	Fliegendes ad-hoc Netzwerk
FIS	<i>flight information service, Fluginformationsdienst</i>
FL	<i>forward link</i>
FLIPCY	<i>flight plan consistency</i>
FLTSTAT	<i>flight status</i>
FRS-COCR	<i>future radio system – communications operating concept and re-</i> <i>quirements</i>

G

GANP	<i>global air navigation plan</i>
GBAS	<i>ground-based augmentation system</i>
GPC	<i>Gateways pro Cluster</i>
GPN	<i>Gatways pro Netzwerkknoten</i>

H

HF	<i>high frequency, Kurzwelle</i>
----	----------------------------------

I

ICAO	<i>International Civil Aviation Organization, Internationale Zivilluftfahrtorganisation</i>
IER	<i>information exchange and reporting</i>
IM	<i>Interval management</i>
ITP	<i>in-trail procedure</i>

K

KoSMO	Kommunikations-Simulation Multipler Objekte
KZWY	Luftkontrollzone New York (ozeanisch, östlicher Teil)

L

LDACS	<i>L-band Digital Aeronautical Communications System</i>
LPPO	Luftkontrollzone Santa Maria

M

MANET	Mobiles ad-hoc-Netzwerk
-------	-------------------------

O

OCA	<i>oceanic control area, ozeanische Kontrollzone</i>
OCA_E / OCA_L	<i>OCA entering / leaving, Einflug / Verlassen einer OCA</i>
ORP	<i>oceanic, remote, polar, abgelegene Lufträume</i>
OSI	<i>open systems interconnection (model)</i>
OT	<i>overdue delivery time</i>
OTS	<i>organized track system</i>

P

PER	Periodisch
PR	<i>position reporting</i>
PRO	<i>probability, Wahrscheinlichkeit</i>

Nomenklatur

R

R	<i>reverse</i> , rückwärtige Kommunikationsrichtung
RCP	<i>required communication performance</i>
RCTP	<i>required communication technical performance</i>
RNAV	<i>random navigation / area navigation</i> , Flächennavigation
RSP	<i>required surveillance performance</i>

S

S_FL	<i>size forward link</i> , Nachrichtengröße in Vorwärtsrichtung
S_RL	<i>size reverse link</i> , Nachrichtengröße in Rückwärtsrichtung
SBAS	<i>satellite-based augmentation system</i>
SEQ	<i>sequence</i> , Nachrichtensequenz
SESAR	<i>Single European Sky ATM Research Programme</i>
SITA	<i>Société Internationale de Télécommunication Aéronautique S.C.</i>
STC	<i>step climb</i>

T

TMA	<i>terminal (flight phase)</i>
TOC	<i>top of climb</i> , Endpunkt des Steigfluges
TOD	<i>top of descent</i> , Anfangspunkt des Sinkfluges
TT	<i>transaction time</i> , Transaktionszeit

U

UTC	<i>universal time coordinated</i> , Koordinierte Weltzeit
-----	---

V

VANET	<i>vehicular ad-hoc network</i> , Fahrzeug-Ad-hoc-Netzwerk
VDL (M2)	VHF Datenlink (Mode 2)
VHF	<i>very high frequency</i> , Ultrakurzwelle

W

WP	Wegpunkt
----	----------

Formeln und Symbole

Lateinische Symbole

N_h	Anzahl der durchschnittlich benötigten Netzwerkknoten
R_e	Erdradius
d_t	Zeitabstand, Übertragungslatenz
e_f	Anteil ausgestatteter Luftverkehrsteilnehmer
n_h	Anzahl
A	Gesamtflugzeit mit Luftkonnektivität
C	Konnektivität
D	Verbindungsdauer aller Luft-Luft-Verbindungen
E	Datenvolumen aller Kommunikationsereignisse
F	Kommunikationsbedarfsabdeckung
G	Datenvolumen eines Kommunikationsereignisses
GPN'	<i>Gateways</i> pro Netzwerkknoten in <i>Cluster</i> mit Bodenverbindung
GPC	<i>Gateways</i> pro <i>Cluster</i>
GPN	<i>Gateways</i> pro Netzwerkknoten
H	Häufigkeit an Kommunikationsereignissen
K	Koordinate
L	Menge aller Luft-Luft-Verbindungen
P	Flächenbezogenes Kommunikationsvolumen
R	Durch zwei Koordinaten aufgespannte Fläche
S	Menge an Luftfahrzeugen
T	Übertragenes Kommunikationsdatenvolumen
a	Flughöhe eines Kommunikationspartners
d	Dauer einer Luft-Luft-Verbindung
r	Abstand, Reichweite
t	Zeitpunkt
x	Nachrichtengröße

Griechische Symbole

Γ	Gesamtflugzeit mit Bodenkonnektivität
Ξ	Flächenbezogene Kommunikationshäufigkeit
Ψ	Verhältnis Luftfahrzeuganzahl zu relevanten Luftfahrzeugen
α	relativer Anteil der Luftkonnektivität
γ	relativer Anteil der Flugzeit mit Bodenkonnektivität
δ	Datenrate
ε	Kommunikationsereignis
κ	Kumuliertes Kommunikationsdatenvolumen
ρ	Absolutes Kommunikationsdatenvolumen
τ	Gesamtflugzeit
χ	Absolute Nachrichtenhäufigkeit
ψ	Kumulierte Nachrichtenhäufigkeit
ϕ	Anzahl der Luftfahrzeuge im Simulationsbereich

Nomenklatur

Allgemeine Indizes

<i>,</i>	Bezug auf Luftfahrzeuge in Simulationsbereich und <i>Gateway</i> -Luftfahrzeuge
<i>h</i>	Länge der Übertragungskette / Anzahl Netzwirknoten
<i>A2A</i>	Luft-Luft
<i>A2G</i>	Luft-Boden
<i>AC</i>	Luftfahrzeug
<i>AOC</i>	Operationelle Luftfahrtkommunikation
<i>ATS</i>	Flugführungskommunikation
<i>CL</i>	<i>Cluster</i>
<i>GW</i>	<i>Gateway</i>
<i>LOS</i>	Sichtbereich
<i>UC</i>	Anwendungsfall (allgemeiner Platzhalter)
<i>a</i>	Luftkonnektivität
<i>b</i>	Randzone
<i>c</i>	Verbindungen
<i>g</i>	Bodenkonnektivität
<i>i</i>	Laufende Nummer Luftfahrzeug
<i>j</i>	<i>Cluster</i> -Index
<i>k</i>	<i>Gateway</i> -Index
<i>t</i>	Zeitpunkt

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Sicherheit und Effizienz des Betriebs von Luftfahrzeugen der kommerziellen Luftfahrt wird neben der Sicherstellung von initialer und kontinuierlicher technischer Lufttüchtigkeit sowie der Entwicklung, Produktion, Wartung und Bedienung durch entsprechend geschultes Personal durch moderne, leistungsfähige Flugverkehrsmanagementsysteme gewährleistet. Diese stellen eine sichere und effiziente Verkehrsführung sicher und schaffen eine geeignete operative Umgebung für den Flugverkehr. Die Flugverkehrsmanagementsysteme greifen für die Erfüllung ihrer Aufgabe neben der Anwendung von geeigneten Verkehrsleitverfahren auf Technologien der Kommunikation, Navigation und Überwachung (engl. *Communication, Navigation, Surveillance; CNS*) zurück. Das Wachstum in der kommerziellen Luftfahrt und die damit einhergehende Verdichtung des Verkehrsflusses in vielen Lufträumen und das daraus resultierende gesteigerte Kommunikationserfordernis, sowie gesteigerte Anforderungen an wirtschaftliche Effizienz und Umweltverträglichkeit erfordern regelmäßig eine Erneuerung der historisch gewachsenen Strukturen und Technologien in diesem Bereich. Dem gegenüber stehen jedoch die lange Lebensdauer von Flugzeugen von 20 bis 40 Jahren [1], die große Anzahl und Inhomogenität der beteiligten Interessensparteien, sowie die äußerst hohen Eintrittsschwellen für neue Technologien hinsichtlich Kosten und Sicherheitsanforderungen [2]. Dies hat dazu geführt, dass sich ein Nebeneinander verschiedenster Anwendungen und CNS-Technologien herausgebildet hat. In diesem Umfeld werden neue Technologien gestuft zunächst im Parallelbetrieb zu ihrer Vorgängertechnologie eingeführt und lösen diese erst mit der stetigen, kompletten Erneuerung der Luftfahrzeugflotten ab. Dies führt zu hohen Eintrittsschwellen für die Einführung neuer Technologien: „*One of the big paradoxes of aviation, a highly technological domain, is its difficulty in moving toward new technologies.*“ [3]. So besteht etwa für Operationen über Ozeanen oder in abgelegenen Regionen neben moderner Datenkommunikation über Satellitenverbindung weiterhin der Kommunikationsweg über Radiofrequenzen im Kurzwellenbereich (*high frequency; HF*), welcher bereits seit den Anfängen der kommerziellen Luftfahrt für die Luftfahrtkommunikation existiert.

Dem Luftfahrtteilnehmer bietet sich daher derzeit ein Portfolio aus CNS-Technologien, welche teils verpflichtend einzurüsten sind, um eine Teilnahme am Luftverkehr in bestimmten Regionen der Welt zu ermöglichen, teils aber als optionale Ausstattung Betriebsabläufe verbessern oder die Nutzung effizienterer Verkehrsführungsverfahren regionaler Flugverkehrsmanagementsysteme ermöglichen.

Unter dem Begriff *Kommunikation* sind dabei alle Technologien und Methoden zusammengefasst, welche einen Austausch von Informationen zwischen dem Luftfahrzeug und einer Partei am Boden ermöglichen. Kommunikation zwischen zwei Luftfahrzeugen oder zwischen zwei Parteien am Boden spielt dabei im bisherigen Verständnis dieser Definition in der zivilen Luftfahrt keine, bzw. eine nachgeordnete Rolle. Es gibt dabei derzeit ein Nebeneinander von analogen Kommunikationsmitteln wie Sprechfunk und digitalen

1 Einleitung

Kommunikationsmitteln wie dem Austausch von Textnachrichten aus einem vordefinierten Nachrichtensatz. Außerdem besteht abhängig von der Region eine Redundanz durch parallel gegebene Möglichkeiten bodengestützter und satellitengestützter Kommunikationswege.

Der Begriff *Navigation* adressiert entsprechend der Definition in [4] alle Technologien und Methoden, welche dem Luftfahrzeug die Bestimmung seiner Position und seiner Bewegung ermöglichen. Die Möglichkeiten der Positionsabschätzung der in [5] beschriebenen Positionsinformationen über Trägheitsmesssysteme sind aufgrund ihrer unzureichenden Genauigkeit über längere Laufzeiten für viele Lufträume mit hohem Verkehrsaufkommen kein hinreichendes Mittel der Flugnavigation (vgl. [6, 7]). Die Möglichkeit der visuellen Navigation anhand von Oberflächengegebenheiten oder astronomischen Orientierungspunkten hat im kommerziellen Lufttransport unter Instrumentenflugbedingungen keine Relevanz [7]. Daher sind an dieser Stelle besonders solche Navigationsmethoden gemeint, welche auf das Vorhandensein externer Orientierungspunkte angewiesen sind und eine über die Betriebsdauer konstante Messgenauigkeit liefern. Diese funktechnischen Navigationssysteme lassen sich grob einteilen in boden- und satellitengestützte Systeme mit weiterer Unterteilungsmöglichkeit nach dem angewandten Verfahren. Weiterhin lässt sich hinsichtlich Charakteristik der Leistungsanforderungen unterscheiden zwischen Wegpunktnavigation, Flächennavigation (*random navigation / area navigation*; RNAV) und leistungsbasierter Navigation (engl. *performance based navigation*; PBN; vgl. [7]). Während bei ersterer die Navigation entlang vordefinierter und durch Bodeninfrastruktur gestützter Wegpunkte erfolgt, ist bei RNAV die Navigation entlang von frei wählbaren Wegpunkten möglich. Leistungsbasierte Navigation auf Basis von Navigationsleistungsstandards (*required navigation performance*; RNP [7]) ermöglicht schließlich durch eine hohe Systemintegrität und kontinuierliche Berechnung des möglichen Navigationsfehlers das Abfliegen spezifischer, auch gekrümmter Flugpfade zwischen zwei Punkten [7].

Überwachung (engl. *surveillance*) umfasst alle Funktionen und zugehörigen Technologien, welche dazu dienen, das eigene Luftfahrzeug für andere Parteien sichtbar und identifizierbar zu machen (vgl. [6]). Dieses sind vorrangig die Luftverkehrskontrolle, welche anhand der empfangenen Informationen Luftverkehrsteilnehmer in ihrem Luftraum erkennt und identifiziert sowie andere Luftverkehrsteilnehmer im Umkreis des eigenen Luftfahrzeuges, welche auf diese Weise ein Situationsbewusstsein über den umgebenden Luftverkehr erlangen und Konflikte in Form von Kollisionsrisiken erkennen und vermeiden können. Zu den betreffenden Systemen gehört üblicherweise Ausstattung an Bord des eigenen Luftfahrzeuges, sowie Empfangseinrichtungen bei der empfangenden Partei. Im weiteren Sinne umfasst der Begriff Überwachung auch Systeme, welche etwa den Sicherheitsabstand zu anderen Luftverkehrsteilnehmern oder die Höhe über Grund überwachen.

Bestehende CNS-Technologien werden in Teilen mit dem weiteren Wachstum des Luftverkehrs absehbar an ihre Grenzen stoßen [8]. Zudem sind regelmäßig neue technische Lösungen verfügbar, welche Kapazitätsengpässe adressieren und effizientere Methoden in der Organisation des Luftverkehrs bei Sicherstellung der Sicherheit des Luftverkehrs ermöglichen [9]. Daher wurden innerhalb der letzten beiden Dekaden eine Vielzahl regionaler und

globaler Initiativen aufgelegt, um das System Lufttransport auf zukünftige Anforderungen vorzubereiten [2, 3, 10, 11].

Auf globaler Ebene werden diese Bestrebungen von der internationalen Zivilluftfahrtorganisation (*International Civil Aviation Organization*; ICAO) initiiert und koordiniert, im globalen Flug navigationsplan (*Global Air Navigation Plan*; GANP) [12] formuliert und in sogenannten *Aviation System Block Upgrades* (ASBU) konkretisiert und zusammengefasst. In der bei Anfertigung dieser Arbeit aktuellsten Version des GANP ist etwa für den Bereich der Kommunikation eine Multilink-Umgebung aus

- ❖ kommerziellen Breitbanddatenlinks über Boden,
- ❖ luftfahrtspezifischen Breitbanddatenlinks über Satelliten,
- ❖ luftfahrtspezifischen L-Band basierten Datenlinks
- ❖ und Flughafen-Datenlinks

vorgesehen. Eine Nutzung der ansonsten für die Ablösung vorgesehenen Technologie Kurzwellen-Datenlink (*high-frequency datalink*; HF-Datenlink) für die Luftfahrtkommunikation ist zunächst lediglich als Grundabdeckung über Polarregionen geplant [12]. Die Pläne der ICAO stehen als globaler Minimalkonsens in Wechselwirkung mit regionalen Vorhaben zur Effizienzsteigerung des Luftraums und des Flugverkehrsmanagements, welche abhängig von den regionalen Voraussetzungen teilweise ambitioniertere Ziele formulieren.

Hervorzuheben sind hierbei einerseits das Vorhaben NextGen der US-amerikanischen Luftaufsichtsbehörde (*Federal Aviation Administration*; FAA) [13, 14]. Eine weitere hervorgehobene Rolle spielen die Anstrengungen zur Modernisierung und Neustrukturierung der fragmentierten europäischen Flugverkehrsmanagementstrukturen im Rahmen des Verbundprogrammes zur Forschung und Weiterentwicklung im Flugverkehrsmanagement (*Single European Sky Air Traffic Management (ATM) Research Programme*; SESAR) [10, 15, 16] der Europäischen Kommission und der Europäischen Organisation zur Sicherung der Luftfahrt (EUROCONTROL). Diese haben im Wesentlichen zur Entwicklung des ICAO GANP beigetragen [10]. Beide Vorhaben beabsichtigen eine Effizienzsteigerung des Flugverkehrsmanagements in der jeweiligen Region durch Optimierung von Luftraumstrukturen und Prozessen sowie durch Modernisierung der Technologien und Systeme im Bereich von *Kommunikation, Navigation und Überwachung*. Eine Übersicht über die Modernisierungen und Anpassungen, welche für die von der EUROCONTROL abgedeckte Region geplant sind, finden sich im europäischen Gesamtkonzept für das Flugverkehrsmanagement (*European ATM Masterplan*) [10]. Dieser fordert für den Bereich *Kommunikation, Navigation und Überwachung* eine Netzwerkstruktur mit erhöhter Bandbreite und reduzierten Latenzzeiten, um die innerhalb von SESAR anvisierten Ziele zu erreichen. Hierbei soll ein service- und leistungsbasierter Ansatz verfolgt werden, sowie Synergien zwischen den Kategorien Kommunikation, Navigation und Überwachung geschaffen werden. In Übereinstimmung mit den Planungen im GANP der ICAO soll dies geschehen über die Schaffung einer integrierten, kategorieübergreifenden Technologieinfrastruktur, welche auf globalen Satellitensystemen und europäischen Multilink Netzwerkdiensten beruht. Der Aufbau dieser Strukturen entspricht dabei der zuvor beschriebenen Multilink-Umgebung des ICAO GANP mit zeitgleicher Einführung ab 2030.

1 Einleitung

Eine grundsätzliche Herausforderung besteht in dem bisher dargestellten Zusammenhang in der Evaluierung und Skalierung des Bedarfs an neuen Technologien. Einerseits sind etwa die Planungen zur Modernisierung der Flugverkehrsinfrastruktur bereits sehr spezifisch ausformuliert und weit fortgeschritten. Hierbei werden mit integralen und dezentralisierenden Ansätzen weitreichende Veränderungen in der Flugverkehrsinfrastruktur hervorrufen. Andererseits werden Bewertungsmethoden benötigt, welche die Auswirkungen auf primäre Nutzwerte der Flugverkehrsinfrastruktur für das Lufttransportsystem unter Berücksichtigung der veränderten Rahmenbedingungen evaluieren. Solche Bewertungsmethoden würden weiterhin die Identifikation von Skalierungseffekten einer neuen Technologie und die initiale Auslegung ermöglichen und den Mehrwert der Einführung einzelner Technologien herausstellen können.

Ein Beispiel für eine solche neue Technologie ist der LDACS-Datenlink (*L-band Digital Aeronautical Communications System*) [17], welcher grundsätzlich einerseits für den Informationsaustausch zwischen Luftfahrzeug und Bodeninfrastruktur und andererseits für den Informationsaustausch zwischen zwei Luftfahrzeugen geeignet ist. Der Anteil der Luft-Boden-Kommunikation ist bereits in den Planungen, etwa von ICAO und SESAR, berücksichtigt und die Technologie befindet sich derzeit in der weiteren Standardisierung und Technologiereifmachung. Dieser Anwendungsbereich deckt sich im Wesentlichen mit bestehenden CNS-Anwendungen und ist für die Ablösung bestehender Technologien vorgesehen. Der Aufwuchs der Technologie für den Bereich der Luft-Luft-Kommunikation hingegen bedient eine Fähigkeit, welche in der bisherigen CNS-Architektur nicht enthalten ist und daher nicht direkt mit Verfahren der Flugführung und Flugsicherung in Verbindung gebracht werden kann. Dennoch ist das Potential einer Luft-Luft-Kommunikation hoch, da einerseits über mobile ad-hoc Netzwerke der Wirkungsradius von Bodeninfrastruktur erhöht werden kann und andererseits der direkte Informationsaustausch zwischen Flugzeugen neue Verfahren ermöglichen kann. Unter einem mobilen ad-hoc Netzwerk versteht man die dezentrale, reichweitenabhängige Vernetzung von beweglichen Kommunikationsknoten zu einem Netzverbund. Weiterhin bietet die Möglichkeit der Einführung eines Luft-Luft-Datenlinks als Ergänzung zum bereits in Planung befindlichen Luft-Boden-Datenlinks Synergieeffekte, welche die Schwelle für die Anwendung im Lufttransportsystem herabsetzen kann.

Um diese Effekte quantifizieren zu können und den Mehrwert eines derartigen Luft-Luft-Datenlinks im Lufttransportsystems bewerten zu können, bedarf es einer operationellen Analyse, in welcher zunächst geeignete Anwendungsfälle identifiziert werden und anschließend ein Nutzwert für diese identifiziert wird. Eine initiale Untersuchung der technischen Umsetzbarkeit und des potentiellen operationellen Nutzens des LDACS Luft-Luft-Datenlink für den kommerziellen Lufttransport und die allgemeine Luftfahrt ist im Projekt Inter-Aircraft Network (IntAirNet¹) erfolgt, in dessen Kontext auch die vorliegende Arbeit entstanden ist. Der LDACS-Datenlink ist hierbei ein interessanter Kandidat für eine Nutzwertuntersuchung,

¹ Das Projekt *Inter-Aircraft Network – Vernetztes Fliegen ohne Infrastruktur* (IntAirNet) wurde über das nationale Luftfahrtforschungsprogramm V-3 im Zeitraum vom 01.01.2019 bis 31.08.2022 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 20V1708A gefördert.

da er als Ablösung bestehender Datenlinktechnologie auf die luftfahrtspezifischen Anforderungen etwa hinsichtlich Einrüstung im Luftfahrzeug, Zuverlässigkeit der Übertragung, Sicherheit und Größenordnung des Datendurchsatzes ausgelegt ist. Der ergänzend zum Luft-Boden-Datenlink zu entwickelnde Luft-Luft-Datenlink lässt sich gemeinsam mit dem Luft-Boden-Datenlink in das Luftfahrzeug einrüsten und lässt einen geringen Mehraufwand für den Nutzer erwarten. Die Nutzwertanalyse kann sich daher auf den Mehrwert der direkten Luft-Luft-Datenkommunikation und den Informationsaustausch zwischen den im ad-hoc Netzwerk vernetzten Luftfahrzeugen konzentrieren.

1.2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer wissenschaftlich basierten Methodik zur Identifikation und Bewertung des Nutzwertes von CNS-Technologien. Entwickelt werden soll diese Methodik am Beispiel der Anwendung einer neuen Datenlinktechnologie, namentlich des LDACS Luft-Luft-Datenlinks, welcher die Einrichtung von ad-hoc Netzwerken zwischen Flugzeugen und den gesicherten Austausch größerer Datenmengen ermöglicht. Die Identifikation und Bestimmung des durch LDACS realisierbaren Nutzwertes für das Lufttransportsystem ist somit Teil der Zielsetzung. Durch die Vernetzung der Flugzeuge ist ebenfalls die Weiterleitung von Luftfahrt-Datenkommunikation über mehrere Luftfahrzeuge bis hin zu Bodenstationen möglich. Dadurch kann der Wirkungsbereich von Bodeninfrastuktur erweitert werden und ein alternativer oder ergänzender Kommunikationsweg zu bereits bestehenden Kommunikationstechnologien etabliert werden. Ebenfalls können einzelne Anwendungen für die Überwachung von Flugoperationen abgedeckt werden.

Die Methodik soll es ermöglichen, über geeignete Anwendungsfälle und operationelle Szenarien in einem zuvor festgelegten Variationsraum relevanter Technologieparameter relevante Nutzwertmetriken zu quantifizieren. Die Identifikation von Anwendungsfällen und die Ableitung eines operationellen Szenarios sollen dabei systematisch unter Berücksichtigung des gesamten CNS-Anwendungsspektrums erfolgen und auf andere CNS-Technologien übertragbar sein. Die Parametrisierung der betrachteten Datenlinktechnologie und die Nutzwertmetrik sollen innerhalb der CNS-Kategorie *Kommunikation* auf andere Technologien übertragbar sein. Weiterhin sollen relevante Randbedingungen, welche sich aus etablierten Flugführungsverfahren, operationellem Flugbetrieb und technischer Standardisierung ergeben, berücksichtigt werden.

1.3 Vorgehen

Angelehnt an das Ziel einer Verknüpfung von operationellen Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der zu untersuchenden Datenlinktechnologie findet eine Abstützung des Vorgehens unter anderem auf bestehenden Verfahren statt. Eine Orientierung liefert hierbei u.a. Morris et al. [18], wie in Abbildung 1-1 dargestellt.

Das Vorgehen zur in dieser Arbeit beabsichtigten Nutzwertanalyse eines neuartigen Datenlinks lässt sich vorwiegend einordnen in Level 0 bis Level 1 gemäß Abbildung 1-1 und behandelt vorwiegend den Pfad, welcher die Anforderungen von den operationellen Anforderungen kommend weiter detailliert. Auf der rechten Seite des Entscheidungsrahmens

1 Einleitung

in Abbildung 1-1 wird anhand technologischer Detailbetrachtungen zur Leistungsfähigkeit der Datenlinktechnologie auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems geschlossen. Da die vorliegende Arbeit den Nutzwert auf operationeller Seite zum Schwerpunkt hat, wird dieser Teil des von Morris et al. vorgeschlagenen Rahmenwerks nicht detailliert und integriert in die Nutzwertanalyse einbezogen. Stattdessen findet die initiale Abschätzung der technologischen Leistungsfähigkeit der zu untersuchenden Datenlinktechnologie unter Abstützung auf bestehende Arbeiten statt. Insbesondere für eine Analyse von Anforderungen an spezifische Technologieeigenschaften wie in Level 3 in Abbildung 1-1 aufgeführt, ist eine umfassende fachtechnische Betrachtung der zu untersuchenden Technologie notwendig, was entsprechend Kapitel 1.2 nicht Teil der operationellen Nutzwertanalyse ist.

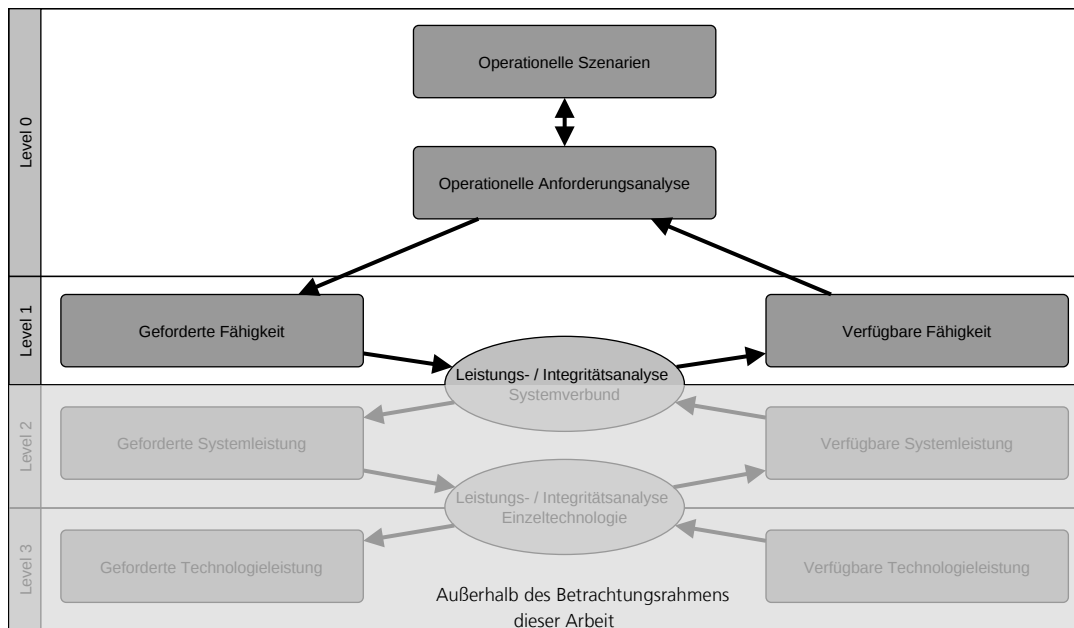


Abbildung 1-1: Datenlink Entscheidungsrahmen nach [18]

Ziel der Arbeit von Morris et al. ist im Schwerpunkt die Systemauslegung und Auswahl einer Systemarchitektur unter Nutzung verschiedener zumeist bestehender Datenlinktechnologien. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich hingegen auf die Untersuchung des Nutzwertes für ein operationelles Szenario und eine konkrete Parametrisierungsmethodik mit Datengenerierung für Level 0 und Level 1. Teilaspekte sind die Anwendung und Verfeinerung der Methodik sowie die Reduzierung der Unsicherheiten in Level 0 und Level 1. Weiterhin betrachtet wird die Übertragbarkeit auf alle drei Kategorien (*Kommunikation, Navigation, Überwachung*) im Rahmen der untersuchten Anwendungen. Hierzu erfolgt eine teilweise Neuinterpretation von Level 0 gemäß Morris et al. bei der die Ermittlung von operationellen Anforderungen durch die Sammlung der Einzelfunktionen in aggregierten Parametern im Vordergrund steht. Anschließend erfolgt eine Bewertung der Referenztechnologie anhand dieser Parameter.

Das Vorgehen zur Erschließung der Methodik gemäß obiger Zielsetzung und Bewertung der Datenlinktechnologie als exemplarischen Untersuchungsgegenstand ist zusammenfassend in Abbildung 1-2 dargestellt. Die einzelnen Schritte werden dabei wie folgt erarbeitet:

- ❖ Ausgehend von Problemstellung und Zielsetzung aus Kapitel 1 werden in Kapitel 2 Grundlagen und Definitionen bezüglich des technisch-operationellen Umfeldes etabliert und die Problematik in einen Gesamtkontext eingeordnet. Hierbei wird eine Übersicht über die beteiligten Parteien gegeben, relevante Definitionen zu Flugablauf und Lufträumen eingeführt sowie Funktionen und Dienste der Flugverkehrsführung und des operationellen Flugbetriebs vorgestellt. Weiterhin werden bestehende und geplante Flugführungstechnologien vorgestellt und kategorisiert.
- ❖ In Kapitel 3 wird anschließend der zu untersuchende Luftfahrt-Datenlink vorgestellt und eine Einordnung in das technologische Umfeld vorgenommen. Zudem wird auf das durch den Luft-Luft-Datenlink ermöglichte ad-hoc Netzwerk eingegangen und Kernausslegungsparameter identifiziert.
- ❖ Kapitel 4 identifiziert auf Basis der zuvor eingeführten Klassifizierung relevante Anwendungsfälle für den Untersuchungsgegenstand und nimmt eine weitere Detaillierung dieser Anwendungsfälle vor. Für die weitere Verwendung wird eine Metrik zur Charakterisierung der Anwendungsfälle festgelegt. Basierend auf dieser werden Nutzwertmetriken identifiziert, welche für die Anwendungsfälle ausschlaggebend sind.
- ❖ Die Identifikation eines operationellen Konzepts, inklusive räumlicher und zeitlicher Definition eines Szenarios sowie des Luftverkehrs und der Bodeninfrastruktur erfolgt in Kapitel 5. Weiterhin wird in diesem Kapitel die aus technischen Aspekten heraus erfolgte Parametrisierung aus Kapitel 3 um Parameter aus dem operationellen Kontext ergänzt.
- ❖ In Kapitel 6 wird anschließend ein Modell zur Ermittlung der Nutzwertmetriken und erforderlicher Zwischenergebnisse auf Basis des operationellen Konzepts vorgestellt und in Struktur und Umfang beschrieben. Abschließend erfolgen eine Modellvalidierung und eine Teilvalidierung einzelner Funktionen.
- ❖ Anschließend werden in Kapitel 7 die Untersuchungsergebnisse bezüglich der Anwendungsfallcharakteristika, bzw. Kernausslegungsparameter und der Nutzwertmetriken vorgestellt.
- ❖ In Kapitel 8 erfolgt schließlich eine Ergebnisdiskussion bevor in Kapitel 9 eine Bewertung der Methodik mit Herausstellung der Stärken und Schwächen sowie einer Einordnung der Ergebnisse stattfindet.

Eine abschließende Zusammenfassung mit Ausblick auf mögliche Fortsetzungsthemen wird in Kapitel 9 gegeben.

1 Einleitung

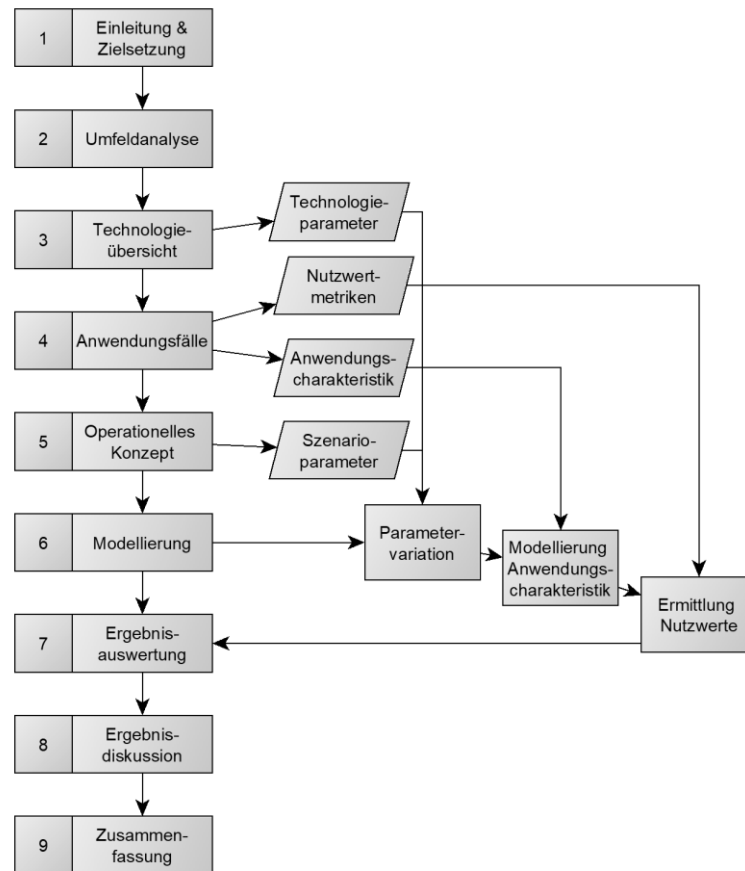


Abbildung 1-2: Gesamtdarstellung Vorgehen

2 Technisch-operationelles Umfeld

Bevor eine zu untersuchende Technologie hinsichtlich ihres Nutzwertes für das Lufttransportsystem bewertet werden kann, ist eine Einordnung in das relevante technisch-operationelle Umfeld notwendig. Dieses beschreibt, welche Umgebungseigenschaften, Interessensparteien und technologischen Rahmenbedingungen einen Einfluss auf den Untersuchungsgegenstand haben. Zugleich dient die Erfassung des technisch-operationellen Umfeldes der Identifikation der Systemgrenzen und der Einordnung und Strukturierung der zu untersuchenden Technologie selbst.

Bestehende Beschreibungen des Lufttransportsystems [19, 20] identifizieren Luftfahrzeuge, Luftfahrtgesellschaften, Flughäfen und Flugsicherungsdienste als wesentliche Interessensparteien und beschreiben verschiedene Umgebungskategorien, welche das operationelle Umfeld des Lufttransportsystems prägen. Diese sind nach [20] eingeteilt in natürliche Umgebung (Umwelt) sowie in politisches, ökonomisches und gesellschaftliches Umfeld. Hirst [19] benennt die natürliche Umgebung, ein regulatorisches Umfeld und ein operationelles Umfeld. Letzteres ist durch technische Einrichtungen geprägt, die bestimmte operationelle Verfahren ermöglichen. Janic [21] und Wittmer et al. [22] nehmen jeweils eine Unterteilung in ein Nachfrage- und ein Angebotssystem vor, welche ihrerseits jeweils aus mehreren Unterkategorien bestehen. Als wiederkehrende Elemente werden hier auf der Angebotsseite Luftfahrzeuge (bzw. deren Hersteller), Fluglinien, Flughäfen und Flugsicherungsdienste benannt. Auf der Nachfrageseite werden insbesondere Passagiere und Fracht als die ausschlaggebenden Interessensparteien aufgeführt.

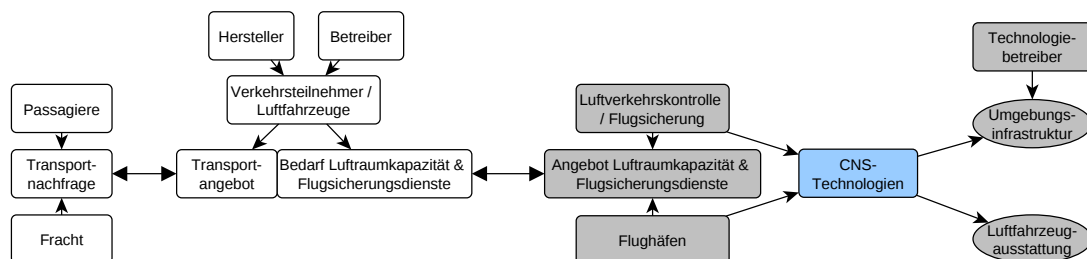


Abbildung 2-1: Einordnung der CNS-Technologien in Kontext Lufttransportsystem

Hinsichtlich der Zielsetzung dieser Arbeit, eine Bewertung von CNS-Technologien mit dem Anwendungsbeispiel eines neuartigen Datenlinks vorzunehmen, ist eine Verschiebung von Nachfrage- und Angebotssystem z.B. in Anlehnung an [23] wie in Abbildung 2-1 dargestellt sinnvoll. Dies berücksichtigt, dass die Nachfrage an CNS-Technologie und den Verfahren, welche durch diese ermöglicht werden, nur mittelbar durch die Nachfrage an Transport von Passagieren und Fracht bedingt wird. Unmittelbar wird der Bedarf an CNS-Technologie generiert durch das Luftverkehrsaufkommen, welches die Transportnachfrage bedient. Im Rahmen der hier vorgestellten Methodik wird daher nicht die Wechselwirkung zwischen Lufttransportnachfrage und Lufttransportangebot betrachtet, sondern der durch das Lufttransportangebot bedingte Bedarf an technologischen Lösungen, welche dieses Angebot ermöglichen. Weiterhin sind die Beziehungen zwischen CNS-Technologie und den

2 Technisch-operationelles Umfeld

übrigen Elementen des Lufttransportsystems zu betrachten, um eine Modellierung des Bedarfs an Fähigkeiten zu ermöglichen, welche durch CNS-Technologie abgedeckt werden können.

2.1 Flugführungsanwendungen und -technologien

In diesem Kapitel wird ein Überblick über bestehende Flugführungstechnologien und -anwendungen gegeben sowie jeweils eine Topologie der zugrunde liegenden Infrastruktur zum Informationsaustausch entwickelt. Die Flugführungsanwendungen werden im Allgemeinen in die Kategorien der *Kommunikation*, *Navigation* und *Überwachung* unterteilt [2, 10, 12]. Vereinzelt findet eine weitere Unterteilung, z.B. der Kommunikation in Dienste der Informationsbereitstellung und Dienste zum flugführungsbezogenen Informationsaustausch statt [18, 24]. Im weiteren Verlauf wird die erstgenannte Einteilung verwendet. Diese Topologien dienen in den folgenden Schritten dazu, einen Anwendungsfall für die zu untersuchende Technologie zu identifizieren und ein operationelles Konzept für die Nutzwertanalyse zu entwickeln. Die hier aufgeführten Darstellungen orientieren sich dabei an der gegenwärtigen Struktur an Flugführungstechnologien mit Berücksichtigung von in Planung befindlichen Erweiterungen und Anpassungen. Anwendungen, welche zwar die Übertragung von Informationen betreffen aber lediglich operationellen und ökonomischen Anforderungen der Luftfahrzeugbetreiber dienen, werden den bestehenden Kategorien zugeordnet.

2.1.1 Kommunikation

Die Kommunikationstechnik in der Luftfahrt dient der Übertragung der für den Betrieb erforderlichen Luftfahrtkommunikation. In der Luftfahrtkommunikation werden generell vier Kommunikationsklassen unterschieden [3, 25, 26]:

- ❖ **Flugführungskommunikation** (*Air Traffic Services Communication; ATSC*): *Communication related to air traffic services including air traffic control, aeronautical and meteorological information, position reporting, and services related to safety and regularity of flight. This communication involves one or more air traffic service administrations. [25]*
- ❖ **Operationelle Luftfahrtkommunikation** (*Aeronautical Operational Communication; AOC*): *Communication required for the exercise of authority over the initiation, continuation, diversion or termination of flight for safety, regularity and efficiency reasons. [25]*
- ❖ **Administrative Luftfahrtkommunikation** (*Aeronautical Administrative Communication; AAC*): *Communication used by aeronautical operating agencies in relation to the business aspects of operating their flights and transport services. This communication is used for a variety of purposes, such as flight and ground transportation, bookings, deployment of crew and aircraft or any other logistical purposes that maintain or enhance the efficiency of overall flight operation. [25]*
- ❖ **Luftfahrtpassagierkommunikation** (*Aeronautical Passenger Communication; APC*): *This class regroups communication related to the non-safety voice and data services to passengers and crew members for personal communication. [3, 26]*

Diese Kommunikationsklassen sind untereinander anhand ihrer Kritikalität für den Luftfahrtbetrieb zu unterscheiden. ATSC und AOC werden dabei als kritische und (potentiell) sicherheitsrelevante Kommunikation eingeordnet [3]. Während ATSC essentiell für die Organisation und Leitung des Flugverkehrs unter Aufrechterhaltung der Sicherheit für jeden einzelnen Luftverkehrsteilnehmer durch die Luftverkehrskontrolle ist, ist AOC notwendig für den effizienten und wirtschaftlichen Betrieb von Luftfahrzeugen, welche im kommerziellen Lufttransport eingesetzt werden. Für Luftverkehrsteilnehmer der allgemeinen Luftfahrt ist diese Kommunikationsklasse aufgrund des Fehlens von kommerziellen Randbedingungen und nutzbaren Skalierungseffekten aufgrund des gleichartigen Betriebs mehrerer Luftfahrzeuge durch einen gemeinsamen Betreiber mit entsprechendem operationellem Kommunikationszentrum nicht relevant. Als nicht kritisch eingeordnet wird AAC, welche kommerziellen und verwaltungsspezifischen Aspekten des kommerziellen Lufttransports dient. Alle drei Kommunikationsklassen sind jedoch Teil des von der ICAO definierten Luftfahrtkommunikationsnetzwerkes (*Aeronautical Telecommunication Network; ATM*), welches den Kommunikationsfluss zu und zwischen den Kommunikationsparteien am Boden sicherstellt [25]. Nicht Teil dieses Kommunikationsnetzwerkes ist die Flugpassagierkommunikation (APC), welche als nicht-kritische Kommunikationsklasse in der Regel der Unterhaltung des Flugpassagiers dient und starken Änderungen in Bedarf und Ausprägung der Kommunikation unterliegt. Ersichtlich wird dies z.B. aus dem Vergleich früher Untersuchungen zur Bereitstellung von Kommunikationsdiensten für Flugpassagiere (z.B. [27]) mit aktuelleren Bedarfsabschätzungen [28, 29].

Als Kommunikationsparteien am Boden sind nach [3] dabei die Luftverkehrskontrolle, bzw. deren Operationszentralen sowie die Operationszentralen und administrativen Einrichtungen der Fluggesellschaften zu nennen. Im Fall der Flugpassagierkommunikation ist kein spezifischer Kommunikationspartner zu benennen. In der Regel findet hier ein Kommunikationsinformationsaustausch mit dem Internet statt.

In Abbildung 2-2 ist die abstrahierte Topologie der Informationsübertragung für die Luftfahrtkommunikation dargestellt. Grundsätzlich ist dabei eine technische Einrichtung zum Empfang oder Versenden von Kommunikationsinformationen an Bord des Luftfahrzeuges vorhanden, welcher in Funkübertragungsreichweite eine entsprechende technische Einrichtung gegenübersteht, welche diese Kommunikationsinformationen in ein Kommunikationsnetz einspeist oder aus diesem bezieht, an welches die Kommunikationsparteien am Boden angeschlossen sind. Grundsätzlich ist dabei zu unterscheiden zwischen technischen Kommunikationseinrichtungen am Boden, wie etwa Funk- oder Satellitenantennen und Satelliten als weltraumgestützten Einrichtungen. Funkantennen liefern eine regionale Funkabdeckung um die Stationierungsorte der einzelnen Funkantennen. Betreiber sind regionale oder globale Luftfahrtkommunikationsdienstleister. Satelliten werden in Satellitenkonstellationen organisiert, welche in Abhängigkeit der einzelnen Satellitenumlaufbahnen eine definierte globale Abdeckung liefern und über eine geringe Anzahl global verteilter Satellitenantennen und Netzwerkknotten an das Luftfahrtkommunikationsnetz am Boden angeschlossen sind. Satellitenkommunikation, zugehörige Antennen und Netzwerkknotten werden ihrerseits durch einen öffentlichen oder kommerziellen Satellitenbetreiber betrieben,

2 Technisch-operationelles Umfeld

welcher üblicherweise auch Kommunikationsdienste für andere Kundengruppen und Anwendungsfelder anbietet.

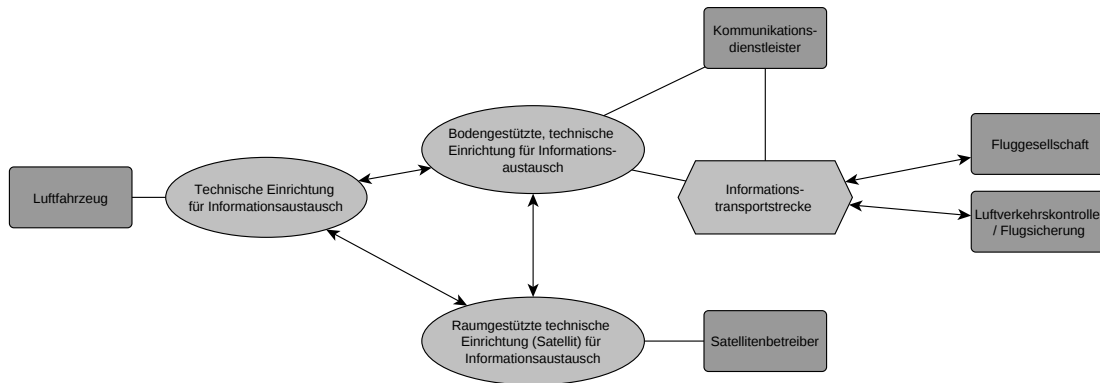


Abbildung 2-2: Topologie der Kommunikation in der Flugführung

Als Technologie für die Kommunikationsstrecke zwischen Luftfahrzeug und boden- oder weltraumgestützter Kommunikationseinrichtung stehen entsprechende Verfahren der Satellitenkommunikation oder bodengestützten Funkübertragung zur Verfügung. Während die Satellitenkommunikation vor dem Hintergrund der aktuellen Relevanz für die Luftfahrtkommunikation nicht weiter unterteilt wird, kann die Funkkommunikation unterteilt werden in analoge und datenbasierte Funkverfahren sowie Funkkommunikation über Sichtverbindung (Ultrakurzwelle / VHF, L-Band) und Nicht-Sichtverbindung (Kurzwelle / HF). Eine Übersicht hierzu bietet Tabelle 2-1. Hier werden derzeit in Nutzung und Einführung befindliche Übertragungstechnologien aufgelistet und neben der Sichtverbindungseigenschaft hinsichtlich der relevanten Flugphase und der Art der Funkabdeckung kategorisiert. Hierbei ist unter lokaler Funkabdeckung die Abdeckung eines Bereiches zu verstehen, welcher in der Regel nur eine Flugphase und in keinem Fall den ganzen Flug abdecken kann, wie es z.B. bei der lokalen Funkabdeckung eines Flughafens der Fall ist. Unter regionaler Funkabdeckung ist die Abdeckung ganzer Länder oder Kontinente zu verstehen, welche somit regionale Flüge über alle Flugphasen abdecken können. Eine globale Funkabdeckung erstreckt sich über mehrere regionale Abdeckungsbereiche hinweg. Weite vergleichende Auflistungen der in der Luftfahrt verwendeten Übertragungstechnologien mit weiterer Kategorisierung nach technischen Parametern finden sich z.B. in [2, 3, 30].

Satellitenkommunikation kann prinzipiell über verschiedene Frequenzbänder erfolgen und bietet abhängig von der jeweiligen Satellitenkonstellation eine globale Abdeckung (z.B. Iridium) oder eine definierte regionale Abdeckung (z.B. Inmarsat). Die Nutzung von Satellitenkommunikation für Luftfahrtkommunikation ist unter den aktuellen Rahmenbedingungen und aufgrund der hohen Leistungs- und Verfügbarkeitsanforderungen an die Übertragung mit höheren Kosten gegenüber den allgemeinen Kommunikationstechnologien verbunden, welche nicht ausschließlich der Luftfahrtkommunikation dienen [31]. Um die jeweils beste Übertragungsleistung sicherzustellen, wird bei mehreren parallel verfügbaren Datenlinktechnologien in sog. Multilink-Umgebungen die Nutzung von bodengestützter Kommunikationstechnologie ggf. mit Ausnahme von HF-Datenlink gegenüber

Satellitenkommunikation bevorzugt [31–33]. Relevante Anbieter von Satellitenkommunikation für sicherheitskritische Luftfahrtanwendungen sind derzeit z.B. Iridium und Inmarsat, bzw. die jeweiligen Betreibergesellschaften [34, 35]. Zu diesen besteht zudem eine ICAO-Standardisierung [9]. Zukünftig kann sich die Marktsituation aufgrund des Eintritts neuer Anbieter jedoch verändern und die Kosten für Satellitenkommunikation für sicherheitskritische Luftfahrtanwendungen können weiter sinken [36].

Tabelle 2-1: Technologien der Luftfahrtkommunikation nach [2, 3, 6]

Kommunikationsweg	Technologie		Abdeckung	Flugphase
1) Bodengestützt				
a) Sichtverbindung				
i) L-Band	Digital	LDACS	Lokal	An- und Abflug Reiseflug (kontinental)
ii) Ultrakurzwelle (VHF)	Analog	VHF Sprechfunk	Lokal	An- und Abflug Reiseflug (kontinental)
	Digital	VDL-M2	Lokal	An- und Abflug Reiseflug (kontinental)
iii) Kurzwelle (HF)	Digital	AeroMACS	Lokal	Bodenbetrieb
b) Nicht-Sichtverbindung				
i) Kurzwelle (HF)	Analog	HF Sprechfunk	Global	Reiseflug (ozeanisch)
	Digital	HF-Datenlink	Global	Reiseflug (ozeanisch)
2) Weltraumgestützt				
a) Satelliten-Sichtverbindung	Digital	Satelliten-Kommunikation (SatCom)	Global, Regional	Reiseflug (ozeanisch)

Bodengebundene Funkkommunikation bietet für Technologien auf Basis von Sichtverbindungen (L-Band, VHF) durch die Installation von Funkmasten lokale Abdeckungen, welche eine prinzipiell hohe Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Leistungsfähigkeit für die Anwendungen der Luftfahrtkommunikation bieten [9]. Eine globale Abdeckung für

2 Technisch-operationelles Umfeld

bodengebundene Funkkommunikation lässt sich durch die Nutzung von Kurzwellenfunk erreichen, da die Funkwellen in der Atmosphäre an der Ionosphäre reflektiert werden [2, 3]. Durch natürliche Variation der Atmosphärenbeschaffung unterliegt die Abdeckung und die Qualität der Kommunikation über Kurzwelle jedoch starken Schwankungen [30]. Weiterhin ist die Anzahl der verfügbaren Kanäle stark begrenzt, was den Einsatz grundsätzlich auf Regionen mit wenigen Luftverkehrsteilnehmern begrenzt, in denen keine Funkkommunikation über Sichtverbindung möglich ist [29]. Für beide Arten der bodengebundenen Funkkommunikation gibt es analoge als auch digitale Übertragungstechnologien, wobei letztere eine höhere Übertragungskapazität innerhalb der gegebenen Frequenzbänder aufweisen [30].

Vor dem Hintergrund der Nutzwertanalyse mit Schwerpunkt auf dem Luftverkehrsteilnehmer, bzw. dem Luftfahrzeug, ist besonders die Informationsübertragungsstrecke zwischen Luftfahrzeug und dem nächsten Netzknoten, wie einem Satelliten oder einem Funkmast am Boden von Interesse. Die weitere Kommunikationsinfrastruktur, welche für die Weiterleitung bis hin zum Kommunikationspartner, wie dem Flugsicherungsoperator oder dem Disponenten im Operationszentrum der Fluggesellschaft, zuständig ist, wird hierbei als gegeben und äquivalent der aktuell vorhandenen Infrastruktur angesehen. Dies ist insbesondere dadurch begründet, dass die Adaption oder Einführung neuer Technologie im Bereich der Luftfahrtkommunikation regelmäßig vor allem die vom Luftfahrzeug ausgehende Übertragungsstrecke betrifft und hierbei ein hohes Maß an übergreifender Abstimmung und Regulierung zwischen den Interessensparteien erforderlich ist, um einen Technologieübergang im breit gefächerten, inhomogenen Feld der Luftverkehrsteilnehmer zu bewerkstelligen. Für die restliche Übertragungsstrecke ist überwiegend der Luftfahrtkommunikationsdienstleister verantwortlich, welcher sich mit einem überschaubaren Feld an Interessensparteien abstimmen muss und ggf. auf Infrastruktur zurückgreift, welche nicht ausschließlich der Luftfahrtkommunikation dient.

2.1.2 Navigation

Die Luftfahrtnavigation stellt einen wesentlichen Grundpfeiler des Lufttransportsystems dar und ermöglicht das möglichst genaue Abfliegen einer zuvor geplanten Flugroute. Grundsätzlich sind hierbei terrestrische, siderische, inertielle und funktechnische Verfahren sowie hybride Navigationsverfahren zu unterscheiden. Für den Flug nach Instrumentenflugregeln, wie er für den kommerziellen Lufttransport relevant ist (vgl. Kapitel 2.2.1), sind vorwiegend funktechnische Verfahren von Bedeutung [2, 37]. Zudem besteht hier ebenfalls das Potential durch die Nutzung einer Datenlinktechnologie einen Mehrwert zu generieren. Eine Übersicht über verschiedene funkbasierte Technologien der Luftfahrtnavigation ist in Tabelle 2-2 gegeben. Hierbei wird zwischen bodengestützten und satellitengestützten Methoden unterschieden. Innerhalb der bodengestützten Methoden ist weiterhin eine Unterteilung in Methoden für den Nahbereich und für den Fernbereich möglich, wobei letztere überwiegend durch Satellitennavigation abgelöst wurden und für Luftfahrtanwendungen allenfalls als Rückfalloption zu sehen sind [37]. Innerhalb der Nahbereichsfunknavigation wird zwischen ungerichteten Funkfeuern (NDB), Einrichtungen zur Entfernungsmessung (DME), Drehfunkfeuern (VOR) sowie Navigationsunterstützungen für den Landeanflug (ILS,

MLS) unterschieden. Bei der Satellitennavigation besteht eine Grundfunktionalität für die Positionsbestimmung aufgrund der Multilateration der von verschiedenen Satelliten einer Konstellation (z.B. GPS, GALILEO, GLONASS, Beidou) erhaltenen Signalen. Darauf aufbauend kann die Genauigkeit der durch Satellitennavigation erhaltenen Positionsinformation mit verschiedenen Korrekturinformationen weiter verbessert werden. Diese sind entweder lokal beschränkt verfügbar (*ground-based augmentation system*; GBAS) oder werden für größere Regionen (z.B. Europa, Nordamerika) ermittelt und dem Luftverkehrsteilnehmer über Satellitenkommunikation mitgeteilt (*satellite-based augmentation system*; SBAS).

Tabelle 2-2: Technologien der funkbasierten Luftfahrtnavigation nach [2, 6, 37]

Navigationsmethode		Technologie
Bodengestützte Funknavigation	Nahbereich	Entfernungsmessung (<i>distance measuring equipment</i> ; DME)
		Drehfunkfeuer (<i>VHF omnidirectional beacon</i> ; VOR)
		Ungerichtete Funkfeuer (<i>non directional beacon</i> ; NDB)
		Instrumentenlandesystem (ILS)
		Mikrowellenlandessystem (MLS)
	Fernbereich	Hyperbelverfahren (LORAN, OMEGA)
Satellitennavigation		Satellitengestützte Multilateration (<i>global navigation satellite system</i> ; GNSS): Satellitenkonstellationen: GPS, GALILEO, GLONASS, Beidou
		Regionale Korrektur (<i>satellite based augmentation system</i> ; SBAS)
		Lokale Korrektur (<i>ground based augmentation system</i> ; GBAS)

In der funktechnischen Luftfahrtnavigation hat mit zunehmenden Anforderungen und dem Fortschreiten der technologischen Möglichkeiten ein Wechsel von an bodenfesten Funkfeuern gestützter Wegpunktnavigation über Flächennavigation zwischen frei definierbaren Orientierungspunkten bis hin zum Abfliegen komplexer Flugpfade vollzogen [7]. Letzteres kann z.B. bei optimierten An- und Abflügen im Flughafenbereich erforderlich sein (vgl. [2]). Allen Navigationsarten ist gemein, dass ein Informationsaustausch zwischen einer im Luftfahrzeug verbauten technischen Einrichtung und einer entsprechenden Einrichtung am Boden oder im Weltraum stattfindet. Dies ist in Abbildung 2-3 schematisch dargestellt.

2 Technisch-operationelles Umfeld

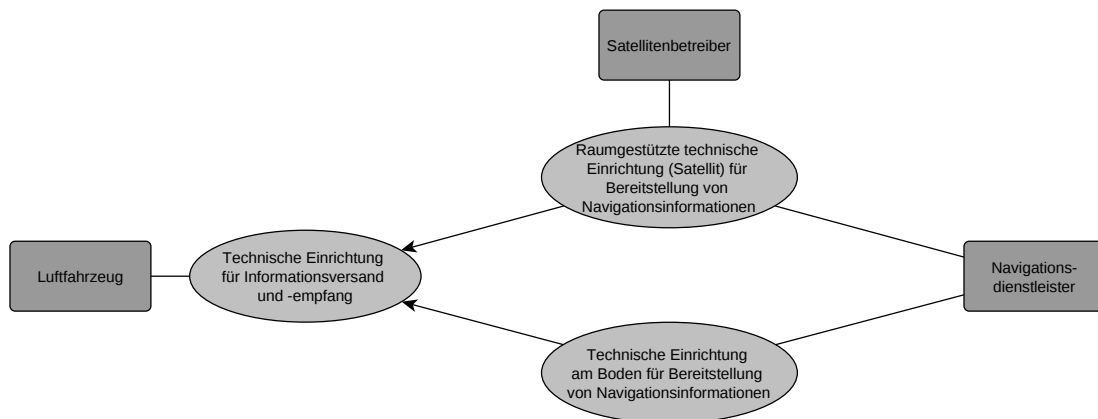


Abbildung 2-3: Topologie der funkgestützten Navigation in der Flugführung

Hinsichtlich der Nutzwertbetrachtung für das Lufttransportsystem sind besonders die im Luftfahrzeug eingerüstete technische Ausrüstung sowie die am Boden vorhandene Infrastruktur von Interesse, welche ausschließlich für Zwecke der Luftfahrtnavigation verwendet wird. Satellitengestützte Navigationsverfahren stellen zwar die wesentliche Säule für die moderne Luftfahrtnavigation dar [7, 6], bei einer Nutzwertbetrachtung ist jedoch zu beachten, dass diese Navigationsinfrastruktur auch von einer Vielzahl anderer Nutzer außerhalb des Lufttransportsystems verwendet wird. Gleiches gilt für Verbesserungs- und Korrekturmethode der satellitengestützten Luftfahrtnavigation, bei welchen bodengestützte Verfahren (GBAS) für spezifische Luftfahrtzwecke in der Regel im Flughafenbereich eingesetzt werden, während satellitenbasierte Verfahren (SBAS) auch anderen Benutzergruppen offenstehen. Schnittstellen der Navigation bestehen mit der nachfolgend beschriebenen Luftraumüberwachung, welche sich wesentlich auf die von den Luftverkehrsteilnehmern ermittelten Positionsdaten stützt, sowie mit der vorhergehend beschriebenen Kommunikation, welche teilweise die Übermittlung von Navigationskorrekturdaten ermöglicht [38] oder wie im Falle des geplanten LDACS Datenlinks ebenfalls Navigationsfunktionen abdecken kann [39, 40].

Neben den beschriebenen Methoden der Luftfahrtnavigation, welche sich auf externe Infrastruktur stützen, verwenden Luftfahrzeuge weiterhin Sensoren an Bord, wie Trägheitsnavigationssysteme oder barometrische Höhenmesser [6]. Die Summe aus allen Sensoren und extern abgestützten Navigationstechnologien liefert die erreichbare Navigationsgenauigkeit eines Luftverkehrsteilnehmers [7]. Die Definition der Navigationsgenauigkeit und ihre Berechnung ist ein durch internationale Interessensparteien standardisierter Begriff, der für die Verwendung bestimmter Flugführungsverfahren und Flugpfade vorausgesetzt werden kann. Bei Nichterfüllung durch einen Luftverkehrsteilnehmer sind bestimmte moderne Flugführungsverfahren für diesen nicht verfügbar und es muss auf in der Regel weniger effiziente Verfahren zurückgegriffen werden.

2.1.3 Luftraumüberwachung

Die dritte Kategorie an Flugführungsfunktionen und zugehöriger -technologie ist die Überwachung im Luftraum, welche die Identifikation und Überwachung von Luftverkehrsteilnehmern beschreibt. Hierbei wird sichergestellt, dass jeder Luftverkehrsteilnehmer gegenüber der Flugsicherung und gegenüber den umgebenden Luftverkehrsteilnehmern sichtbar ist. Wie in Tabelle 2-3 dargestellt, ist eine Unterscheidung in drei Verfahrenskategorien möglich. Die erste Verfahrenskategorie stellen nicht-kooperative Verfahren dar, welche keine gesonderte Ausstattung oder Kooperation des zu erkennenden Luftverkehrsteilnehmers erfordern. Die Erfassung erfolgt hier mittels (bodengestütztem) Primärradar. Die zweite Verfahrenskategorie stellen kooperative Verfahren dar. Bei diesen ist eine Ausstattung des Luftverkehrsteilnehmers mit einem Transponder erforderlich, welcher z.B. auf Anfragen eines Sekundärradars oder anderweitig übermittelte Anfragen (z.B. ADS-B) antwortet. Ebenso gibt es Verfahren, bei denen die Informationen zur Identifikation automatisch selbst versendet werden (ADS-B). Als koordinierte Verfahren nach Tabelle 2-3 werden solche Verfahren verstanden, bei denen zwei Luftverkehrsteilnehmer sich zur Konfliktvermeidung koordinieren. Dies trifft auf Kollisionsvermeidungssysteme (*airborne collision avoidance system*; ACAS) zu.

Tabelle 2-3: Technologien und Verfahren der Flugüberwachung nach [2, 37]

Verfahren	Luftraum / Flugphase
Nicht-kooperativ (Primärradar)	An- und Abflug Reiseflug (kontinental)
Kooperativ	
abfragebasiert (Sekundärradar)	Reiseflug (kontinental), An- und Abflug
kontinuierlich (ADS-B, ADS-C)	Reiseflug (kontinental), Reiseflug (ozeanisch)
Koordiniert (ACAS)	An- und Abflug, Reiseflug (kontinental), Reiseflug (ozeanisch)

Die Genauigkeit der durch das Primärradar ermittelten Positionsinformationen und die Detektionswahrscheinlichkeit eines Verkehrsteilnehmers sind von der Radarrückstrahlfläche des zu erfassenden Luftfahrzeuges sowie den Umweltbedingungen abhängig [2]. Verfahren mit Primärradar spielen in der Flugsicherung im Wesentlichen noch eine Rolle als Rückfalloption zur Erkennung von Luftverkehrsteilnehmern mit defektem oder ausgeschaltetem Transponder sowie in der militärischen Luftraumsicherung [2]. Grundsätzlich ist ein Wechsel zur verstärkten Nutzung von kooperativen Luftraumüberwachungstechnologien vorgesehen [12]. Moderne Flugführungsverfahren für die kommerzielle Luftfahrt basieren daher vorwiegend auf kooperativen Identifikationsverfahren [41]. Bei diesen ist der

2 Technisch-operationelles Umfeld

Luftverkehrsteilnehmer mit einer technischen Einrichtung (Transponder) ausgestattet ist, welche auf Identifikationsanfragen antwortet oder alle für die Identifikation benötigten Informationen in vordefinierten Zeitabständen aussendet [2, 6]. Hierbei wird auf Positionsinformationen der genutzten Navigationsverfahren (siehe Kapitel 2.1.2) zurückgegriffen und teilweise die gleiche Übertragungsstruktur wie für die Kommunikation (siehe Kapitel 2.1.1) genutzt. Herauszustellen ist, dass der Bereich der Identifikation und Überwachung derzeit der einzige Anwendungsbereich ist, bei welchem ein Informationsaustausch zwischen Luftverkehrsteilnehmern stattfindet, um ein von Bodeninfrastruktur unabhängiges Situationsbewusstsein über umgebenden Luftverkehr zu ermöglichen. Eine besondere Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang Kollisionsvermeidungssystemen (*airborne collision avoidance system*; ACAS) zu. Bei diesen Systemen erfolgt eine Koordinierung von Ausweichmanövern zwischen den Luftverkehrsteilnehmern [42, 43]. Es ergibt sich daher die in Abbildung 2-4 dargestellte Topologie für die Informationsübertragung für diesen Bereich. In Bereichen mit Bodeninfrastruktur werden die Informationen von technischen Einrichtungen an Bord der Luftverkehrsteilnehmer von bodengestützten Einrichtungen (Sekundärradare) angefragt und erfasst. In Bereichen ohne Bodeninfrastruktur, wie abgelegenen und ozeanischen Regionen, wird bei einigen Anwendungen auf Übertragungsmethoden aus dem Bereich Kommunikation (siehe Kapitel 2.1.1) zurückgegriffen. Dies betrifft z.B. *automatic dependent surveillance – contract* (ADS-C) [44] und *space-based automatic dependent surveillance – broadcast* (ADS-B) [45].

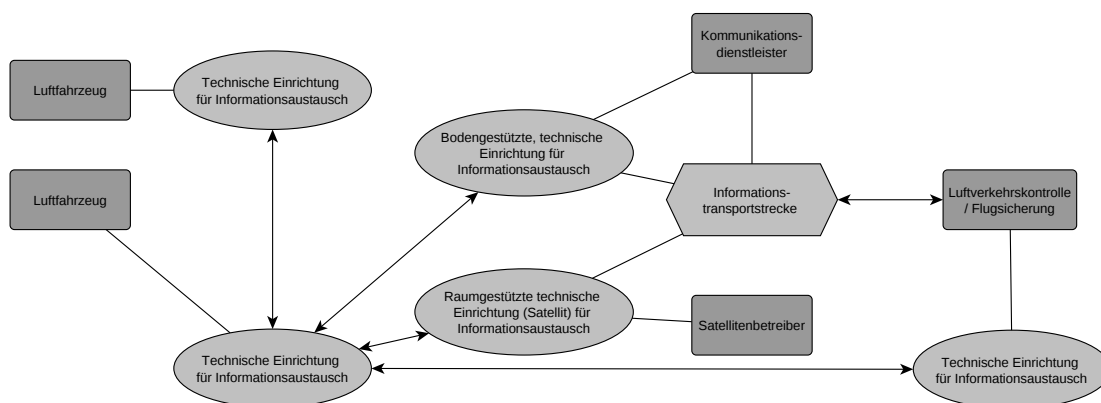


Abbildung 2-4: Topologie der Luftraumüberwachung in der Flugführung

2.2 Beteiligte Parteien

Für eine Identifikation der beteiligten Parteien der Nutzwertbetrachtung bietet sich eine Kombination aus anwendungsbezogener Betrachtung z.B. nach [3] und luftfahrzeugzentrischer Betrachtung nach [46] an. Die anwendungsbezogene Betrachtung setzt den Schwerpunkt auf die jeweiligen Interessensparteien der einzelnen Anwendungen der bereits in Kapitel 2.3 identifizierten Flugführungstechnologien. Diese sind in Abbildung 2-5 zusammenfassend dargestellt (vgl. [47]). Hierbei ist zu beachten, dass der Fokus auf den beteiligten Parteien der jeweiligen Anwendungskategorie liegt und nicht auf dem Übertragungsweg

der jeweiligen Information. Hierbei steht der ins Zentrum gerückte Luftverkehrsteilnehmer im Kommunikationsaustausch mit den jeweilig zuständigen Kontrollzentren von Luftverkehrssicherung und Fluggesellschaft, übermittelt Informationen zur Luftraumüberwachung an die Flugsicherung und an andere Luftverkehrsteilnehmer und navigiert unter Nutzung von bodengestützter Infrastruktur sowie Satellitennavigationssystemen.

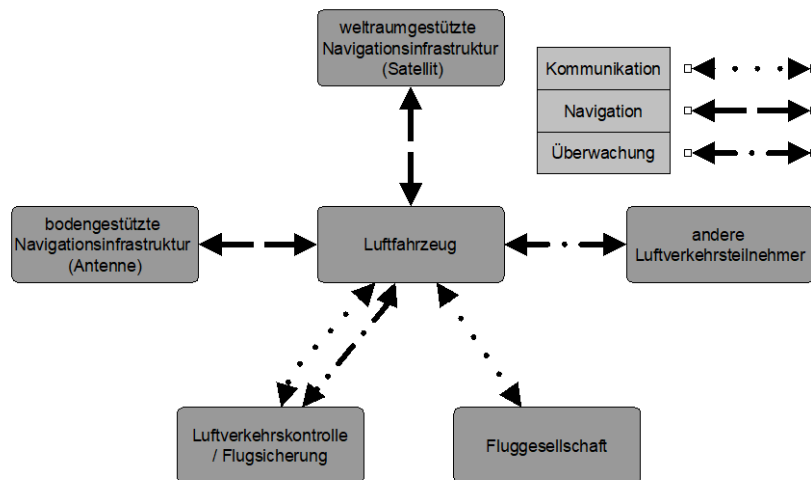


Abbildung 2-5: Flugführungsanwendungen und beteiligte Parteien nach [2, 3]

In den Kontext der luftfahrzeugzentrischen Betrachtung nach [46] gesetzt, ist eine Einordnung in den Gesamtkontext des Lufttransportsystems möglich, bei der Flughäfen und Flugzeughersteller als Interessensparteien in den Hintergrund treten und das Hauptaugenmerk auf Flugsicherungsdiensten und den Fluggesellschaften liegt. Entsprechend sind dies die primären Beteiligten, welche in der Nutzwertanalyse zu berücksichtigen sind. Weiterhin ist der Weg des Informationsaustausches bzw. die Infrastruktur zu betrachten, welche den Informationsaustausch ermöglicht. Hierbei ist einerseits eine Einteilung vorzunehmen in Ausrüstung, welche insbesondere an Bord des Luftfahrzeuges installiert ist, sowie den Dienstleistern, welche die technische Infrastruktur zwischen Sender und Empfänger bereitstellen und betreiben. Diese Infrastruktur umfasst Satellitenkonstellationen, Sendestationen am Boden und bodengestützte Kommunikationsnetze und Verteilungszentren. Dieser Zusammenhang ist in Anlehnung an [3] in Abbildung 2-6 ersichtlich. Das Luftfahrzeug, bzw. der Luftverkehrsteilnehmer benötigt für die Nutzung einer Flugführungstechnologie und der zugehörigen Anwendung eine technische Einrichtung, welche je nach Anwendungsart Informationen versendet oder empfängt. Im Wesentlichen ist hier zu unterscheiden zwischen Navigationsanwendungen einerseits und Kommunikations- und Überwachungsanwendungen andererseits. Bei den Navigationsanwendungen werden die relevanten Informationen durch eine boden- oder weltraumgestützte Infrastruktur generiert und lediglich in eine Richtung zum Luftfahrzeug hin übertragen. Bei den Kommunikations- und Überwachungsanwendungen werden Informationen zwischen Luftfahrzeug und einer beteiligten Partei am Boden nach Abbildung 2-5 in beide Richtungen ausgetauscht. Die Transportstrecke kann hierbei weitere Infrastruktur und beteiligte Parteien umfassen.

2 Technisch-operationelles Umfeld

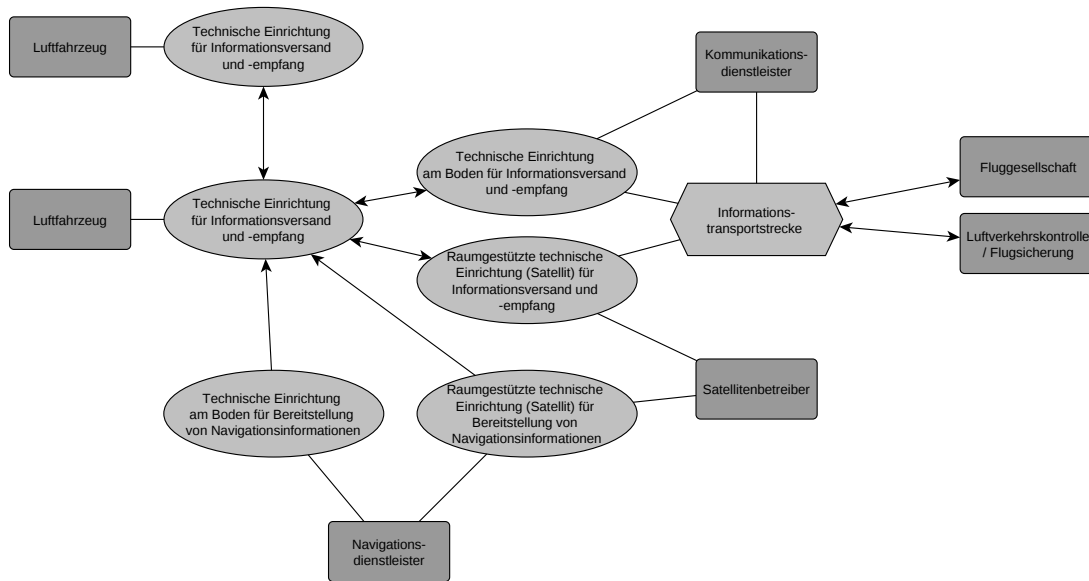


Abbildung 2-6: Beteiligte Parteien in der Flugführungsavionik und -infrastruktur

2.2.1 Luftverkehrsteilnehmer

Die Luftverkehrsteilnehmer als Nutznießer der durch Flugführungsavionik und unterstützende Umgebungsinfrastruktur geschaffenen, operationellen Umgebung, spielen eine wesentliche Rolle bei der Identifikation repräsentativer Anwendungsfälle im Rahmen der Nutzwertanalyse. Eine Klassifizierung und Identifizierung relevanter Gruppen von Luftraumnutzern, welche das operationelle Umfeld und die Anforderungen an Flugführungsavionik wesentlich prägen, kann einerseits auf der Basis der Betriebsart und andererseits aufgrund der Art und Auslegung des Luftfahrzeuges erfolgen. Für erstere Einteilung bietet sich der Definitionsrahmen der internationalen Zivilluftfahrtorganisation ICAO [48, 49] an, für letztere Einteilung kann die Zulassungsklassifikation der europäischen Agentur für Flugsicherheit (*European Union Aviation Safety Agency*; EASA) oder der FAA als Referenz verwendet werden (vgl. z.B. [50]). Aus beiden Ordnungssystemen werden die jeweils für den Einsatz und die Anwendung von Flugführungsavionik im Allgemeinen und für den zu untersuchenden neuartigen Datenlink im speziellen relevanten Nutzergruppen identifiziert. Anhand der Schnittmenge der relevanten Nutzergruppen aus beiden Ordnungssystemen ergibt sich die Zielgruppe für den in dieser Arbeit untersuchten Anwendungsfall.

Bezüglich der Betriebsart besteht eine grundsätzliche Unterscheidung zwischen ziviler Luftfahrt auf der einen Seite und der staatlichen Luftfahrt auf der anderen Seite. Erstere unterliegt den Regeln und Anforderungen der ICAO, sowie den jeweiligen regionalen und nationalen Flugsicherheitsorganisationen. Letztere umfasst den Betrieb im Umfeld von Militär, Zoll, Polizei und anderen staatlichen Einrichtungen und unterliegt lediglich einer individuellen nationalen Regulierung. Die staatliche Luftfahrt ist daher vom Abkommen über die internationale Zivilluftfahrt vom 7. Dezember 1944 (Chicagoer Abkommen) explizit

ausgenommen [48]. Nur dort, wo es für den Betrieb von Vorteil ist, werden durch die staatliche Luftfahrt auch zivile Standards und Verfahren übernommen. Für den Einsatz von Flugführungsavionik mit dem Ziel der Verbesserung von Kernmetriken, wie Effizienz, Sicherheit oder Klimawirkung ist somit die zivile Luftfahrt ausschlaggebend. Die zivilen Luftraumnutzer lassen sich auf der Basis ihres Operationsmodus entsprechend der Definition der ICAO für Operation und Betrieb von Luftfahrzeugen in Annex 6 weiter in kommerzielle und allgemeine Luftfahrt sowie Arbeitsluftfahrt (engl. *aerial work*) unterscheiden [49]. Die jeweilige Definition nach ICAO [49] lautet wie folgt:

- ❖ **Kommerzieller Lufttransport (*Commercial air transport operation*):** *An aircraft operation involving the transport of passengers, cargo or mail for remuneration or hire*
- ❖ **Arbeitsluftfahrt (*Aerial work*):** *An aircraft operation in which an aircraft is used for specialized services such as agriculture, construction, photography, surveying, observation and patrol, search and rescue, aerial advertisement, etc.*
- ❖ **Allgemeine Luftfahrt (*General aviation operation*):** *An aircraft operation other than a commercial air transport operation or an aerial work operation.*

Entsprechend des Klassifizierungsvorschlags in [51] wird die Arbeitsluftfahrt im Rahmen dieser Arbeit als Unterkategorie der allgemeinen Luftfahrt verstanden. Auf Basis der vorstehend beschriebenen Klassifizierungen und Definitionen ergibt sich das in Abbildung 2-7 dargestellte Ordnungssystem. Wie zuvor beschrieben ist für die in dieser Arbeit unternommene Analyse nur die zivile Luftfahrt relevant.

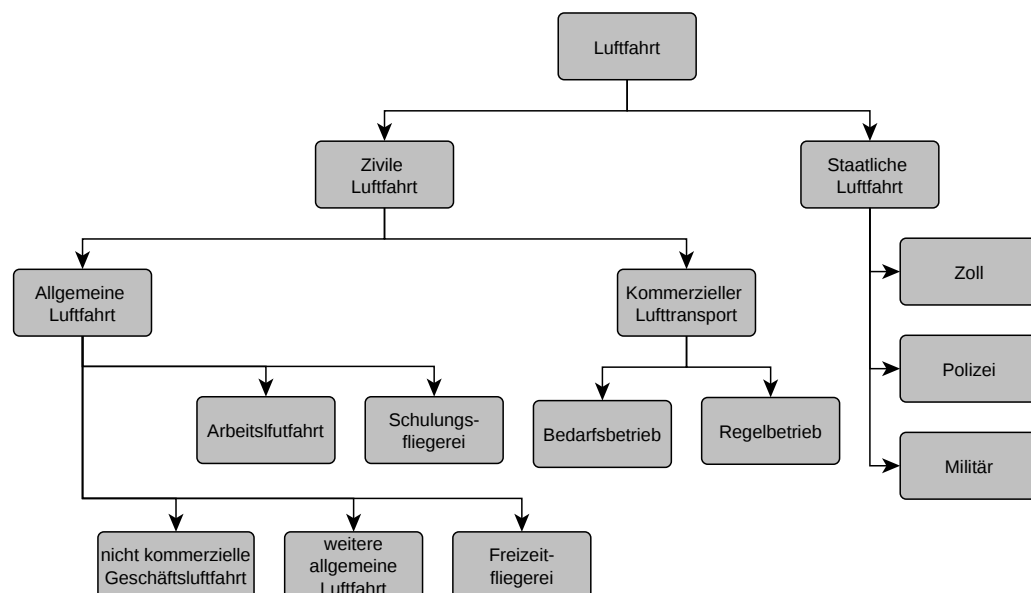


Abbildung 2-7: Einordnung Luftraumnutzer nach ICAO [48, 49]

Innerhalb der zivilen Luftfahrt können weitere Fokussierungen vorgenommen werden anhand der Anzahl der für die jeweilige Betriebsart genutzten Luftfahrzeuge und der Anzahl der Flugstunden, die für diese Betriebsart aufgewendet werden. Als Datenbezugsraum bieten sich hier als großer Flächenstaat mit ausgeprägten Flugaktivitäten und etablierter

2 Technisch-operationelles Umfeld

Erfassung relevanter Daten für den Flugbetrieb der Vereinigten Staaten von Amerika an. Dort wurden für das Bezugsjahr 2019 die Flugstunden für Regelbetrieb und Bedarfsbetrieb des kommerziellen Lufttransport sowie für die allgemeine Luftfahrt erfasst [52, 53]. Weiterhin ist die Anzahl der Luftfahrzeuge auf Grundlage ihrer vorrangigen Betriebsart für jede der drei Kategorien ausgewiesen. Dabei ist zu beachten, dass für die kommerzielle Luftfahrt nur inländische Fluggesellschaften hinsichtlich der geflogenen Flugstunden und der Flottengröße berücksichtigt wurden. Die betreffenden Daten sind in Tabelle 2-4 dargestellt. Es fällt auf, dass die unter kommerziellem Lufttransport zusammengefassten Betriebsarten in Summe im betrachteten Luftraum und Zeitfenster eine ähnliche Gesamtzahl an Flugstunden aufweist, wie die allgemeine Luftfahrt. Ein deutlicher Unterschied ist jedoch in der Anzahl registrierter Luftfahrzeuge ersichtlich. Diese liegt für die allgemeine Luftfahrt bei mehr als dem zwölfwachen Wert der Luftfahrzeuge, welche für den kommerziellen Lufttransport eingesetzt werden. Innerhalb des kommerziellen Lufttransports besteht weiterhin ein großer Unterschied zwischen Luftfahrzeugen im Regel- und im Bedarfsbetrieb. Auf erstere entfällt ein Großteil (>98%) der erbrachten Flugstunden, während die Anzahl der Luftfahrzeuge sich nur leicht unterscheidet und etwa 55% der Luftfahrzeuge im kommerziellen Lufttransport dem Bedarfsbetrieb zugeordnet werden.

Tabelle 2-4: Flugstunden und Betriebsarten für Luftfahrzeuge (USA, 2019) [52–55]

Betriebsart	Flugstunden [h] [53]	Anzahl Luftfahrzeuge [52, 54, 55]
<u>Allgemeine Luftfahrt</u>	<u>21.800.689</u>	<u>201.900</u>
<u>Kommerzieller Lufttransport</u>	<u>20.580.843</u>	<u>16.545</u>
Bedarfsbetrieb	375.635	9.100
Starrflügler	258.978	
Drehflügler	115.567	
Regelbetrieb	20.205.208	7.445
Große Transportflugzeuge (FAA Part 121 / EASA CS-25)	19.788.411	
Leichte Motorflugzeuge (FAA Part 135 / EASA CS-23)	416.797	

In Abbildung 2-8 ist unter Nutzung der in Tabelle 2-4 aufgeführten Daten die durchschnittliche Anzahl an Flugstunden dargestellt, die ein Luftfahrzeug der betreffenden Betriebsart im Luftraum der Vereinigten Staaten von Amerika im Referenzzeitraum 2019 abgeleistet hat. Es ist ersichtlich, dass im Regelbetrieb des kommerziellen Lufttransports eingesetzte Luftfahrzeuge eine deutlich höhere Anzahl an Flugstunden geleistet haben als Luftfahrzeuge, welche im Bedarfsbetrieb oder der allgemeinen Luftfahrt eingesetzt werden.

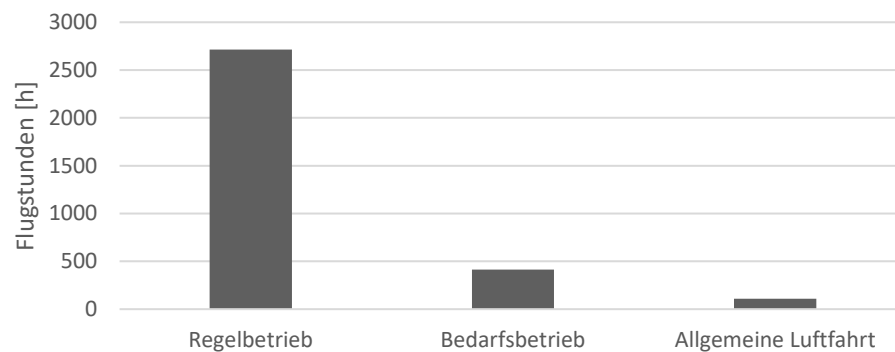


Abbildung 2-8: Mittlere Flugstundenzahl je Luftfahrzeug nach Betriebsart (USA, 2019) [52–55]

Ein durchschnittliches Luftfahrzeug im Regelbetrieb des kommerziellen Lufttransports befand sich im gesamten Jahr 2019 zu fast einem Drittel der Zeit in der Luft, ein durchschnittliches Luftfahrzeug im Bedarfsbetrieb zu etwas mehr als zwei Wochen und ein Luftfahrzeug der allgemeinen Luftfahrt befand sich im Durchschnitt 5,5 Tage (132 Stunden) in der Luft. Daraus resultiert ein deutlich erhöhtes Nutzwertpotential des Einsatzes von Flugführungsavionik für Luftfahrzeuge, welche im Regelbetrieb des kommerziellen Lufttransports eingesetzt werden, da hier eine vergleichsweise geringe Anzahl an Luftfahrzeugen umgerüstet werden muss, um Verbesserungspotentiale in einer hohen Anzahl an Flugstunden freizusetzen.

Ergänzend zu der Klassifizierung nach Betriebsart kann eine Klassifizierung nach physikalischer Ausprägung der Luftraumnutzer vorgenommen werden, wie z.B. Auftriebsart, Antriebsart, Größe oder Nutzlast. Ein mögliches Klassifizierungsschema hierzu ergibt sich aus den Zulassungsklassen für Luftfahrzeuge der EASA und FAA [50]. Entsprechend der in Tabelle 2-4 dargestellten Anteile einzelner Gruppen von Luftverkehrsteilnehmern am Flugstunden gesamt aufkommen werden Drehflügler entsprechend der EASA-Zulassungsklassen (*certification specification*, CS) CS-27 und CS-29 aufgrund ihres geringen Anteils am Flugstunden gesamt aufkommen in den nachfolgenden Untersuchungen nicht berücksichtigt. Weiterhin kann bei der Auswahl eines operationellen Szenarios der Betrachtungsschwerpunkt auf den operationellen Bedarf großer Transportflugzeuge nach CS-25 gelegt werden, während leichte Motorflugzeuge nach CS-23 zunächst nachrangig betrachtet werden können. Diese beiden Einschränkungen ermöglichen in der späteren Modellierung die Betrachtung möglichst homogener Flugabläufe mit einheitlichen Flugphasen, operationellen Verfahren und Wertebereichen für Fluggeschwindigkeiten und Flughöhen. Ebenfalls kann bei der Auswahl eine Fokussierung auf den kommerziellen Regelbetrieb erfolgen, was die Nutzung von Flugplandaten anstelle von aufgezeichneten Flugbewegungen ermöglicht. In dem Datenbeispiel nach Tabelle 2-4 werden bei dieser Auswahl weiterhin über 96% des Flugstunden aufkommens der kommerziellen Luftfahrt abgedeckt. Für andere Lufträume, wie etwa ozeanische oder abgelegene Lufträume ist aufgrund der dort vorherrschenden operationellen Einschränkungen für Drehflügler oder leichte Motorflugzeuge ein noch höherer Abdeckungsgrad zu erwarten.

2 Technisch-operationelles Umfeld

2.2.2 Luftverkehrskontrolle und Flugsicherung

Die Luftverkehrskontrolle (*air navigation service provider*) im Allgemeinen und die Flugsicherung (*air traffic control*; ATC) im Speziellen sind elementare Interessensparteien im Kontext der Flugführungsavionik und der Nutzung von Datenlinktechnologie für die Luftfahrtkommunikation. Für alle Überwachungsanwendungen und für die Kommunikation der Flugführungsdienste (*air traffic services*; ATS) ist sie zusammen mit den Luftverkehrsteilnehmern ausschließlicher Nutzer dieser Anwendungen, Kommunikationspartner für die Luftverkehrsteilnehmer und setzt wesentlich den operationellen Regelrahmen, in welchem die Flugführungsanwendungen zum Einsatz kommen. Abhängig von der Organisation der Flugsicherung bilden sich hierbei regionale oder überregionale Regelräume, die sich durch ähnliche, abgestimmte Verfahren und einen hohen Koordinierungsgrad auszeichnen. Ein solcher Regelraum wird etwa für Europa aufgespannt durch die EUROCONTROL und die in ihr organisierten nationalen Flugsicherungen. Im nordatlantischen Luftraum hingegen besteht unter ICAO-Rahmen eine Abstimmung und Koordinierung der Flugsicherung der Anrainerstaaten Island, Norwegen, Irland, Vereinigtes Königreich, Portugal, Vereinigte Staaten von Amerika, Kanada. Je nach den Rahmenbedingungen des jeweiligen Luftraums werden etwa Flugrouten, Staffellungen und die dafür erforderlichen Fähigkeiten und Notwendigkeiten der Ausstattung mit Avionik für Kommunikation, Navigation und Überwachung festgelegt. Für den nordatlantischen Luftraum ist dies z.B. in [56] festgelegt. Generell unterliegt die ATS-Kommunikation einer weitgehenden Koordinierung und Standardisierung zwischen den verschiedenen nationalen und regionalen Flugsicherungen. Der Bedarf für Flugführungsanwendungen und notwendige Ausstattung ist aus Sicht der Flugsicherung vor allem durch Sicherheitserfordernisse getrieben. Alle Flugsicherungsanwendungen, welche die Flugsicherung einbeziehen, sind somit als sicherheitskritisch anzusehen.

2.2.3 Flugbetreiber / Luftfahrtgesellschaft

Die Luftfahrtgesellschaften stellen eine weitere Interessenspartei für die Nutzung von Flugsicherungsavionik im Allgemeinen und den Luftfahrtdatenlink im Speziellen dar. Die zwischen Luftverkehrsteilnehmer und Luftfahrtgesellschaft genutzten Anwendungen werden unter operativer Luftfahrtkommunikation zusammengefasst (AOC). Hierunter fallen unter anderem Einzelanwendungen für Wetterdienste, Textnachrichten, verschiedene Wartungsdienste und Flugstatusberichte (vgl. [57, 58]). Ob und wann Anwendungen der operativen Luftfahrtkommunikation zum Einsatz kommen unterliegt vorwiegend ökonomischen Gesichtspunkten. So kann die Informationsübertragung zeitlich verschoben werden, um in einem Bereich mit günstigerer Konnektivitätsabdeckung zu erfolgen. Dies kann zum Beispiel bodengestützter, direkter Datenlink (z.B. VHF Datenlink Mode 2, VDL M2) oder Flughafendatenlink (z.B. *aeronautical mobile airport communication system*; AeroMACS) anstelle von satellitengestützten Kommunikationsverbindungen sein [31]. Auch ist zu erwarten, dass bei geringeren Übertragungskosten mehr Übertragungsvolumen anfällt, da die Schwelle der Wirtschaftlichkeit für die direkte Übertragung der Informationen einzelner Anwendungen erreicht wird, z.B. bei der Beobachtung des technischen Zustands des Luftfahrzeugs. Im Vergleich mit den Anwendungen der Flugsicherung (Kapitel 2.2.2) sind die Anwendungen der operationellen Luftfahrtkommunikation generell von geringerer

Kritikalität, haben jedoch direkte Auswirkungen auf Betrieb und Operation der Luftfahrzeuge. Weiterhin können sich die genutzten Anwendungen zwischen verschiedenen Luftfahrtgesellschaften unterscheiden und auch abhängig vom jeweiligen Luftfahrzeugmuster sein [59].

2.2.4 Luftfahrtkommunikations- und -navigationsdienstleister

Die Betreiber der für die Nutzung von CNS-Diensten notwendigen technischen Infrastruktur (insb. *communication service provider* und GNSS-Betreiber) stellen, wenngleich sie keine direkten Nutzer der entsprechenden Anwendungen sind, eine relevante Interessenspartei bei deren Umsetzung im operationellen Betrieb dar. Sie sind das Bindeglied für Kommunikation und Informationsaustausch zwischen Luftverkehrsteilnehmern sowie Flugsicherung und Luftfahrtgesellschaften und stellen wesentliche Navigationsdienste bereit. Hierbei müssen die Anbieter ökonomische Anforderungen auf der einen und technische Anforderungen u.a. an Integrität und Zuverlässigkeit auf der anderen Seite in Einklang bringen. Dies drückt sich aus operationeller Sicht unter anderem in verschiedenen Abdeckungsbereichen für Kommunikations- und Navigationsdienste aus sowie in unterschiedlichen Kostenmodellen für bodengestützte und satellitengestützte Informationsübertragung.

Während der Navigationsbereich abgedeckt wird durch staatliche Anbieter für Satellitennavigationssysteme (*global navigation satellite systems*; GNSS) und Unterstützungssysteme zur Erhöhung der regionalen Navigationsgenauigkeit [38], haben sich im Kommunikationsbereich je zwei global tätige Kommunikationsdienstleister (*communication service provider*; CSP; namentlich *Société Internationale de Télécommunication Aéronautique S.C.*; SITA und *Collins Aerospace / Aeronautical Radio Incorporated*; ARINC) und zwei Satellitenkommunikationsdienstleister (INMARSAT, Iridium) etabliert, welche vorwiegend privatwirtschaftlich operieren [35]. Die Kommunikationsdienstleister stellen die Bodeninfrastruktur bereit und verantworten die gesamte Kommunikationsstrecke zwischen der Bodenstation und dem Kommunikationspartner am Boden, unabhängig davon, ob zwischen Bodenstation und Luftfahrzeug eine direkte Verbindung oder eine indirekte Verbindung mit zwischengeschaltetem Kommunikationssatelliten besteht. Die Bodeninfrastruktur wird zu einem Teil von den Kommunikationsdienstleistern direkt betrieben und zum Teil von dritten, lokalen Anbietern, welche in das Netzwerk der Kommunikationsdienstleister eingebunden werden [60].

2.3 Technologieeinführung

Ein kritischer Aspekt bei der Betrachtung von Luftfahrttechnologie im Allgemeinen und von Flugführungstechnologie im Speziellen ist die Zeitskala für die technologische Entwicklung unter Standardisierungsaspekten und die Einführung der neuen Technologie im Lufttransportsystem. Die Entwicklung und Standardisierung einer Flugführungstechnologie wird im Rahmen dieser Arbeit angesichts des Schwerpunkts auf der technisch-operationellen Nutzwertanalyse nicht näher betrachtet. Es wird von einer einsatzreifen, für die Anwendung im Luftfahrtbereich standardisierten Technologie ausgegangen und nur die graduelle Technologieeinführung mit zunehmender Anzahl an ausgestatteten Luftverkehrsteilnehmern betrachtet.

2 Technisch-operationelles Umfeld

Bei der Einführung neuer Luftfahrttechnologie wird regelmäßig eine S-Kurve [61, 62] für die Geschwindigkeit der Technologieeinführung angenommen [63, 64]. Hierbei wird davon ausgegangen, dass eine neue Technologie zunächst nur sehr langsam von wenigen frühesten Nutzern adaptiert wird und anschließend schrittweise zunächst von einer frühen und späten Nutzermehrheit eingeführt wird. Bei der Einführung durch die Nutzermehrheit fällt die Zuwachsrate wieder stark ab bis eine Sättigung des Marktes erreicht ist. Dieses Modell führt zur Identifikation der beiden Eckpunkte für den Anteil der frühesten Nutzer und dem Anteil der späten Mehrheit.

Die Einführung neuer Flugführungsavionik unterliegt hierbei jedoch der Besonderheit, dass der Zeitrahmen und der Mehrwert der Technologie überwiegend von regulatorischen Rahmenbedingungen vorgegeben werden. Festzumachen ist dies z.B. an der Luftraumüberwachungstechnologie ADS-B in der Umsetzung als 1090 MHz *Extended Squitter Datalink*. Diese teilt gegenüber der Luftverkehrssicherung und umgebendem Luftverkehr die eigene Position, aktuellen Kurs und Geschwindigkeit sowie weitere Informationen mit. Eine Aufwertung gegenüber der Vorgängertechnologie der Flugfunktransponder, welche durch ADS-B im Wesentlichen ergänzt wird, ist unter anderem der größere Informationsumfang der enthaltenen Daten. Da die Einrüstung von ADS-B abseits von der Nutzung durch die Luftverkehrssicherung keine direkten wirtschaftlichen Vorteile für Luftfahrtgesellschaften bietet, orientiert sich die Zeitdynamik der Einführung an dem Zeitrahmen für die verpflichtende Einführung, wie er von den zuständigen Luftfahrtbehörden festgeschrieben wurde. Hierbei wird üblicherweise ein Datum gesetzt, zu welchem neue Luftfahrzeuge mit der Technologie ausgestattet sein müssen und ein weiteres Datum bis zu welchem alte Luftfahrzeuge nachgerüstet sein müssen. Weitere Abstufungen sind z.B. möglich über die Größe des Luftfahrzeuges. In der Regel erfolgt dies angelehnt an die Zulassungsklasse, Flugzeugmasse oder zulässige Passagierzahl. Eine Nichterfüllung kann zu Einschränkungen im Betrieb führen, welche Einschränkungen bis hin zum Ausschluss aus einzelnen Luftraumklassen haben kann. Bezogen auf die Nutzergruppe der Flugzeuge im kommerziellen Lufttransport im NAT werden dabei Ausstattungsquoten von annähernd 100% erreicht [65].

Der zeitliche Rahmen der Einführung für die Technologie ADS-B liegt bei 13 bis 14 Jahren zwischen 2010 und 2025 für die Verantwortungsbereiche für FAA und EASA [66] in Nordamerika und Europa. Dies beschreibt den Zeitraum zwischen dem ersten verbindlichen Benennen der Ausstattungspflichten und -fristen für neue und Bestandsluftfahrzeuge in den jeweiligen Regularien bis zum tatsächlichen Inkrafttreten der Ausstattungspflicht für nachzurüstende Luftfahrzeuge. Die Vorlaufzeiten für die Ausstattung liegen bei der FAA bei zehn Jahren und bei der EASA bei neun Jahren, wobei über 8% der US-Lufttransportflotte bereits vier Jahre vor der Ausstattungsfrist die neue Technologie eingerüstet hatten [66]. Wie in [66] beschrieben, wurden neue Luftfahrzeuge bereits ab 3 Jahre vor der Fristsetzung für die verbindliche Ausstattung regelmäßig mit ADS-B ausgestattet, während Fluggesellschaften 2,5 Jahre vor Fristsetzung mit der Umrüstung ihrer Flotten auf die neue Technologie begannen. Eine Verschiebung der ursprünglich gesetzten Frist wurde vor allem von der in [66] betrachteten Fluggesellschaft mit Schwerpunkt im unteren Preissegment genutzt.

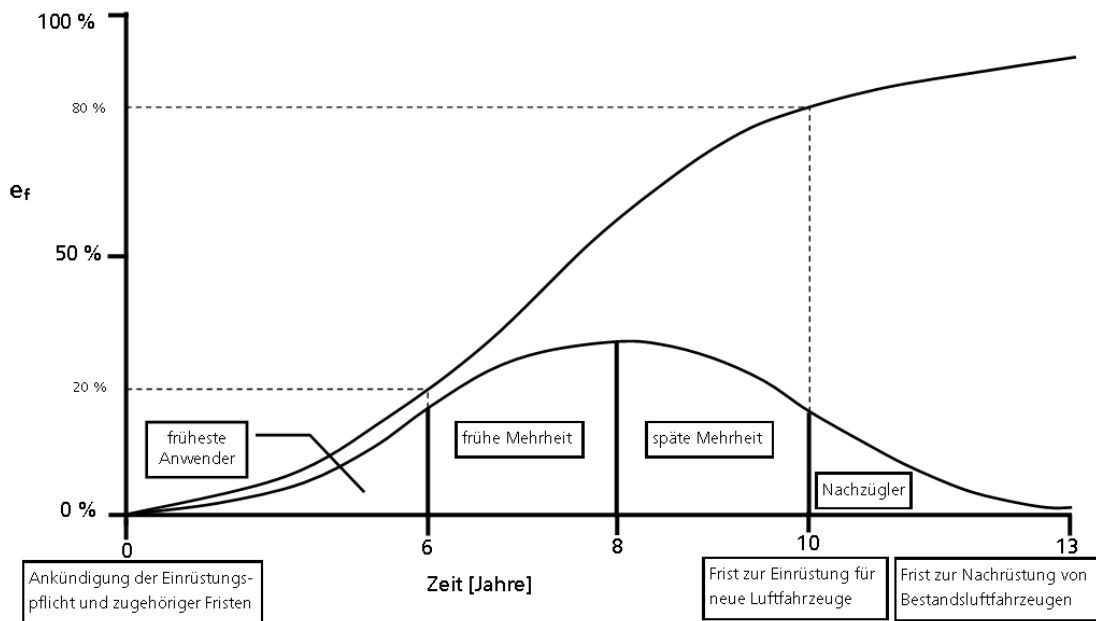


Abbildung 2-9: Repräsentatives Einführungszenario für neue Flugführungstechnologie [61–64]

Auf Basis des Beispiels für ADS-B wird für den in dieser Arbeit als Anwendungsbeispiel herangezogenen LDACS Luft-Luft-Datenlink wird daher das in Abbildung 2-9 dargestellte Einführungszenario angenommen. Zum Zeitpunkt der Ankündigung der Einrüstungspflicht und der zugehörigen Fristen ist die Technologie bereits vollständig entwickelt und standardisiert. In diesem Einführungszenario haben die frühesten Anwender bis zu vier Jahre vor der Ausstattungspflicht für neue Luftfahrzeuge im kommerziellen Lufttransport die Technologie bereits eingerüstet, während die Mehrheit der Luftfahrzeuge ab diesem Zeitpunkt bis zur Einrüstungsfrist umgerüstet werden oder durch neue, bereits ausgestattete Luftfahrzeuge ersetzt werden. Im Zeitraum bis zur Frist für die Nachrüstung finden nur noch vereinzelte Nachrüstungen oder das Ersetzen älterer Luftfahrzeuge statt. Mit Erreichen der finalen Frist des Ausstattungsmandats, mit der alle Luftfahrzeuge ausgestattet sein müssen, wird mit einem Einführungsgrad von bis zu 100% für alle Luftfahrzeuge gerechnet.

2.4 Flugphasen

Da die von den in Kapitel 2.1 beschriebenen beteiligten Parteien benötigten Funktionen und die zu berücksichtigenden Rahmenbedingungen weiterhin wesentlich von der Flugphase beeinflusst werden, in der sich ein Luftverkehrsteilnehmer befindet, werden an dieser Stelle die Flugphasen hinsichtlich ihres Bedarfs an Flugführungsfunktionen und Relevanz für die Nutzwertanalyse beschrieben. Die typischen Flugphasen im kommerziellen Transportflug sind dabei in Anlehnung an [10] in Abbildung 2-10 inklusive der im weiteren Kontext verwendeten Kurzbezeichnung dargestellt. Blau hervorgehoben sind die Streckenfluganteile (*en-route*), welche in den nachfolgenden Betrachtungen priorisiert untersucht werden. Eine detaillierte Übersicht nach zugrunde liegender ICAO-Taxonomie [67] findet sich im Anhang dieses Dokumentes (Tabelle A-1).

2 Technisch-operationelles Umfeld

Flugphase							
	Boden- betrieb APT	An- und Abflug TMA	Streckenflug (kontinental) ENR	Streckenflug (ozeanisch) ORP	Streckenflug (kontinental) ENR	An- und Abflug TMA	Boden- betrieb APT
	III	III, II	I	I	I	II, III	III
Luftraum							

Abbildung 2-10: Flugphasen im kommerziellen Transportflug basierend auf [10, 67]

Die in Abbildung 2-10 dargestellten Flugphasen lassen sich für den in Kapitel 2.2.1 beschriebenen kommerziellen Lufttransport in einen chronologischen Standardablauf aus Bodenoperation (*airport*; APT), Abflug (*terminal*; TMA), kontinentaler Streckenflug (*en-route*; ENR), ggf. ozeanischer Streckenflug (*oceanic, remote, polar*; ORP), Anflug (TMA) und abschließende Bodenoperation (APT) einordnen. Dieser Flugphasenablauf bestimmt den Bedarf an Informationsaustausch zwischen den in Kapitel 2.1 aufgeführten beteiligten Parteien und bestimmt ebenso wesentliche Rahmenbedingungen für die Einsetzbarkeit und Verfügbarkeit von entsprechenden Technologien. Weiterhin sind bestimmte Flugphasen neben der beschriebenen zeitlichen Einordnung räumlich an bestimmte Lufträume gekoppelt, welche hier vereinfachend mit I-III nummeriert werden. Diese werden im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

2.5 Luftraumorganisation

Die hier gegebene Darstellung zur Luftraumorganisation orientiert sich vorrangig an den Gegebenheiten der europäischen Lufträume, welche der Koordination durch die EUROCONTROL und der Wahrnehmung von Flugsicherungsdiensten durch die nationalen Flugsicherungsorganisationen unterliegen [68, 69], und dem nordamerikanischen Luftraum [70]. Der Schwerpunkt der Beschreibung liegt auf querschnittlichen Gemeinsamkeiten, während nationale Besonderheiten zurückgestellt werden. Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen der Luftraumorganisation in horizontaler und in vertikaler Richtung.

Während die Organisation in horizontaler Richtung entlang von Hoheitsgrenzen zwischen Staaten oder mit Berücksichtigung der jeweiligen Verkehrsflüsse erfolgt, ist der Luftraum in vertikaler Richtung anhand des Abstandes vom Boden oder der Druckhöhe unterteilt. In horizontaler Richtung dient die Unterteilung vor allem der Zuweisung von Zuständigkeitsbereichen zu einzelnen Flugverkehrskontrollzentren und kann die Anwendung unterschiedlicher Flugführungsverfahren bedingen. Eine wesentliche Unterscheidung kann z.B. zwischen kontinentalen Lufträumen mit hohem Grad an Organisation der Verkehrsteilnehmer durch die Flugführung und ozeanischen, abgelegenen und polaren Lufträumen, in welchen die Luftverkehrsteilnehmer weitestgehend sich selbst überlassen sind und nur sehr elementare Organisationsdienste durch die Flugführung wahrgenommen werden.

Die Unterteilung in vertikaler Richtung hingegen erwirkt durch Definition von Mindestanforderungen für die Nutzung vor allem eine Separation von Verkehrsteilnehmern mit unterschiedlichem Flugverhalten und unterschiedlicher Ausstattung mit Avionik für Kommunikation, Navigation und Überwachung. Wesentlich sind hierbei die Pflicht zur Nutzung von Systemen zur Eigenidentifikation, welche eine Überwachung durch die Flugführung ermöglichen (z.B. in Deutschland oberhalb von Flugebene 50 oder 3500 ft über Boden) und die Bedingung einer Höchstgeschwindigkeit von 250 Knoten für Flugverkehr unterhalb von Flugfläche 100 (10.000 ft) und des teilweisen Ausschlusses von Flügen nach Sichtflugregeln in den oberen Lufträumen. Weiterhin unterscheiden sich die durch die Flugsicherung bereitgestellten Dienste in den einzelnen Lufträumen. In den oberen Lufträumen findet eine Staffelnung des Flugverkehrs statt, in den unteren Lufträumen findet diese dann nur noch zwischen Verkehrsteilnehmern, welche nach Instrumentenflugmethoden operieren statt, während andere Verkehrsteilnehmer nur Verkehrsinformationen erhalten. Im bodennahen Luftraum außerhalb des Flughafenumfeldes findet keine Staffelnung mehr statt und Verkehrsinformationen werden nur nach Möglichkeit erteilt. Im Bereich von Flughäfen werden je nach Größe und Bedarf die Luftraumgrenzen trichterförmig herabgesetzt oder lokal die Ausstattung mit Funkausrüstung oder Transpondern zur Eigenidentifikation vorausgesetzt. Die Luftraumorganisation in vertikaler Richtung am Beispiel Deutschlands ist in Abbildung 2-11 gegeben.

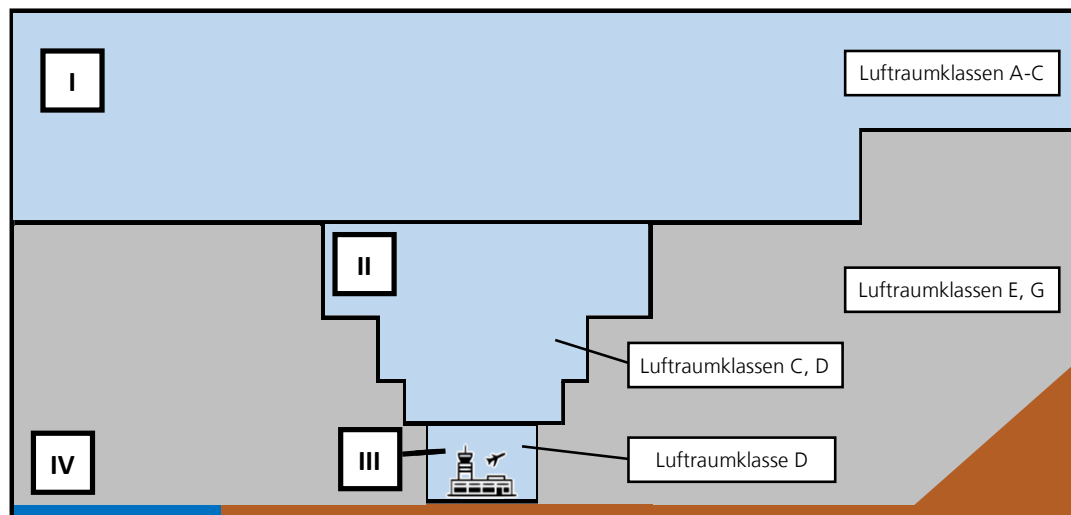


Abbildung 2-11: Schematische Luftraumstruktur am Beispiel Deutschlands basierend auf [71]

Der mit (I) markierte Luftraum beschreibt den für den kontinentalen und ozeanischen Streckenflug relevanten Luftraum, welcher je nach nationaler Ausprägung der Luftraumstruktur den ICAO-Luftraumklassen A bis C entspricht. Mit (II) markiert ist der Luftraum, welcher im Wesentlichen für die Flugphase von An- und Abflug relevant ist. Dieser entspricht in Deutschland den Luftraumklassen C und D. (III) beschreibt den Flughafennahbereich, in welchem alle Bodenoperationen sowie die finalen Anteile von An- und Abflug stattfinden. Dieser wird in Deutschland als Luftraumklasse D realisiert. (IV) stellt den nicht kontrollierten Luftraum dar, welcher in Deutschland den Luftraumklassen E und G entspricht. Dieser spielt für den kommerziellen Lufttransport im Normalbetrieb keine Rolle.

3 Technologieübersicht LuftfahrtDatenlink

Die Übertragung von Informationen mittels Datenlink in der Luftfahrt hat seine erste Anwendung in der operativen Luftfahrtkommunikation gesehen, als 1978 das sog. *Aircraft Communications Addressing and Reporting System* (ACARS) auf Bestreben der Fluggesellschaften hin eingeführt wurde und teilweise noch im Einsatz ist [2, 3]. Erste Anwendungen adressierten die operationelle Kommunikation zwischen Luftfahrzeug und Operationszentrale der Fluggesellschaft und beschränkten sich auf kurze Mitteilungen zum Flugstatus (*Out Off On In*; OOOI). Das System nutzt ebenfalls für den Sprechfunk verwendete Frequenzen und hat eine Bandbreite von 2,4 kbit/s. In der weiteren Entwicklung wurden Satellitenkommunikation und Kurzwellenfunk als Kommunikationsmittel ergänzt, wodurch eine Nutzung in ozeanischen und abgelegenen Lufträumen möglich wurde. In der Folge wurde die Datenlinkkommunikation auch von der Luftverkehrskontrolle für den Austausch von Informationen zwischen Pilot und Fluglotsen erschlossen [3]. Mit VDL M2 ist in Reichweite entsprechender Bodenstationen inzwischen eine effektivere Nutzung des Frequenzbereiches für Ultrakurzwellen mit Übertragungsraten von bis zu 31,5 kbit/s [72] möglich, während der ozeanische und abgelegene Luftraum weiterhin von Satellitenkommunikation oder Kurzwellenfunk abgedeckt wird. Aufgrund von zunehmender Verkehrsdichte und einem damit einhergehenden zunehmenden Informationsaustausch zum Zweck von Kommunikation, Navigation und Überwachung ist die Nutzung von Datenlinkkommunikation zu einer elementaren Stütze der Luftverkehrskontrolle etwa im europäischen oder nordatlantischen Luftraum geworden [8, 60, 73]. Neben der sicherheitskritischen und betriebsrelevanten Kommunikation zwischen Luftfahrzeug und Luftverkehrskontrolle bzw. Operationszentrale der Fluggesellschaft spielt die Bereitstellung von Datenkommunikationsdiensten für die Passagiere eine immer wichtigere Rolle [74], welche zusätzlich zur Kommunikationsstrecke zwischen Luftfahrzeug und Boden, die Kommunikationsstrecke zwischen Passagier und Luftfahrzeug bereitstellen muss. Beispiele für Passagierkommunikation sind z.B. Telefonie, Internetzugang und die kontinuierliche Übertragung von Videodaten (*Streaming*) [75]. Eine Übersicht zu bestehenden und geplanten, möglichen zukünftigen Datenlinktechnologien wird beispielsweise in [2, 3, 76] gegeben.

3.1 Referenztechnologie LDACS Luft-Luft-Datenlink

Da die bestehenden Technologien absehbar an ihre Kapazitätsgrenzen stoßen werden [8, 17] und bereits Einschränkungen in der Leistungsfähigkeit z.B. von VDL M2 beobachtet werden [60], besteht der Plan eine neue leistungsfähigere Datenlinktechnologie einzuführen. Als geeigneter Kandidat für die weitere Validierung hat sich hierbei das sogenannte L-Band digitale Luftfahrtkommunikationssystem (*L-band Digital Aeronautical Communications System*) als Nachfolge für den bisherigen Luft-Boden-Datenlink VDL M2 hervorgetan. LDACS befindet sich in der weiteren technischen und operationellen Standardisierung und ist in die Entwicklungspläne etwa von ICAO und EUROCONTROL/EASA eingebunden [10, 12]. Hierzu gibt es zwei Kandidatentechnologien, LDACS1 und LDACS2, von denen LDACS1 jedoch bessere Leistungswerte erzielt und bereits eine höhere Technologiereife erreicht hat und sich daher für eine mögliche Umsetzung und mandatierte Einführung durchgesetzt hat [17]. Aufgrund der Nutzung eines effektiveren Modulationsverfahrens

(Orthogonales Frequenzmultiplexverfahren, OFDM) in Kombination mit der Nutzung eines Breitbandkanals bei LDACS1 werden deutlich höhere Datenübertragungsraten (siehe Tabelle 3-1) erreicht als bei LDACS2. Dieses basiert auf der Nutzung eines Schmalbandkanal in Kombination mit einem Zeitduplexverfahren und erreicht lediglich Datenübertragungsraten von 70 kbit/s bis 115 kbit/s. Im Nachfolgenden wird daher LDACS1 als repräsentative Datenlinktechnologie LDCAS betrachtet. Im Vergleich mit dem derzeit in Verwendung befindlichen VDL M2 und seinen Datenübertragungsraten von wenigen Kilobit pro Sekunde soll der auf die Anforderungen der LuftfahrtDatenkommunikation optimierte LDACS Luft-Boden-Datenlink Datenübertragungsraten von 561 kbit/s bis 2,6 Mbit/s mit einer Reichweite von bis zu 370 km erreichen [17]. Ein Vergleich ausgewählter Eckdaten von LDACS Luft-Boden-Datenlink und VDL M2 findet sich in Tabelle 3-1.

Tabelle 3-1: Vergleich der Eckdaten von VDL M2 und LDACS Luft-Boden-Datenlink

	VDL M2[77]	LDACS [17]
Frequenzbereich	118 MHz – 136,975 MHz	960 MHz – 1164 MHz
Reichweite	150 km – 250 km ²	370 km
Datenübertragungsrate	31,5 kbit/s	561 kbit/s – 2,6 Mbit/s

Tabelle 3-2: Multilink-Umgebung nach [3, 32]

Flugphase						
	Bodenbetrieb	An- und Abflug	Streckenflug (kontinental)	Streckenflug (ozeanisch)	An- und Abflug	Bodenbetrieb
	TMA	TMA	ENR	ENR	TMA	TMA
Verfügbare Datenlinks	AeroMACS LDACS Satellit	LDACS Satellit	LDACS Satellit	Satellit	LDACS Satellit	AeroMACS LDACS Satellit
Multilink-Verfügbarkeit	++	+	+	-	+	++

Es ist vorgesehen, den LDACS Datenlink innerhalb einer Multi-Datenlinkumgebung einzusetzen [3, 10, 12, 32], bei welcher jeder Flugabschnitt durch mehrere verschiedene Datenlinktechnologien abgedeckt wird. Das Konzept ist in Tabelle 3-2 dargestellt. Für den

² Ab einer Reichweite von 150 km treten lt. [60] stationsabhängig Verbindungsprobleme auf, bei 250 km liegt die Wahrscheinlichkeit für einen Nachrichtenverlust bei 10 %.

3 Technologieübersicht LuftfahrtDatenlink

Bodenbetrieb am Flughafen stehen dabei bis zu drei verschiedene Datenlinks zur Verfügung, An- und Abflug sowie der kontinentale Streckenflug sollen von LDACS und Satelliten-Datenlink abgedeckt werden. Lediglich der Flug in ozeanischem oder abgelegenen Luftraum, in dem keine bodengestützte Infrastruktur vorhanden ist, kann nach diesem Modell lediglich durch satellitengestützte Datenlinktechnologie abgedeckt werden.

Das Schließen dieser Lücke in der Multilink-Umgebung ist neben der möglichen Adressierung von Funktionen der Luftraumüberwachung durch LDACS [17], die Motivation für die Entwicklung einer LDACS Variante, die den direkten Informationsaustausch zwischen zwei Luftfahrzeugen ermöglicht. Dieser würde es ermöglichen, sowohl die Luftraumüberwachungsfunktionen von ADS-B und Mode-S Transpondern zu erfüllen, als auch durch die Vernetzung mit anderen Luftverkehrsteilnehmern eine alternative Kommunikationsinfrastruktur in ozeanischen und abgelegenen Lufträumen aufzubauen [78]. Dies könnte Ausfälle und Störungen bei der Satellitenkommunikation abfangen. Ursachen für diese Ausfälle können z.B. Umwelteinflüsse [79, 80], technische Störungen und systembedingte Zuverlässigkeiten [81] oder Manipulation durch Dritte [82, 83] sein. Zudem besteht die Möglichkeit durch den direkten Informationsaustausch zwischen Luftverkehrsteilnehmern die Bereitstellung von Funktionen zur Navigation und Zeitsynchronisation zu unterstützen [39]. Daher wird neben dem in der Standardisierung und Einführung befindlichen Luft-Boden-Datenlink LDACS eine Variante für die Luft-Luft-Kommunikation untersucht [17, 78]. Dieser LDACS Luft-Luft-Datenlink kann zwar in Teilen auf dem Technologiestand des LDACS Luft-Boden-Datenlinks aufbauen, erfordert jedoch z.B. aufgrund des neu hinzukommenden Vernetzungskonzepts technologische Weiterentwicklungen und Adaptionen. Die Einführung eines Luft-Luft-Datenlinks stellt dabei aus Sicht der technisch-operationellen Nutzwertanalyse eine besondere Herausforderung dar, da es kein direktes in Verwendung befindliches Vorgängersystem gibt, mit welchem die neue Technologie verglichen werden kann. Die Identifikation von geeigneten aus dem Betriebsablauf des Lufttransportsystems abgeleiteten Anwendungsfällen und Ableitung von technisch-operationellen Nutzwerten in Verbindung mit grundlegenden Auslegungsentscheidungen ist daher von besonderer Relevanz, weshalb der LDACS Luft-Luft-Datenlink als Referenztechnologie für die in dieser Arbeit präsentierte Nutzwertanalyse herangezogen wurde. Die Realisierbarkeit und operationelle Relevanz eines LDACS Luft-Luft-Datenlinks wurde wesentlich im Verbundprojekt *Inter Aircraft Network (IntAirNet)* untersucht, in dessen Rahmen auch die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen durchgeführt wurden [84–90]. Die projektierte Reichweite für den Luft-Luft-Datenlink liegt dabei bei 120 NM (ca. 220 km) bis 250 NM (ca. 460 km) [91] zur Erfüllung der in [57] postulierten Anforderungen. [84] gibt mit 100 NM (185 km) bis 200 NM (370 km) eine konservativere Schätzung für die in der Praxis nutzbare und realisierbare Reichweite an. Die in dieser Arbeit vorgenommene Nutzwertbetrachtung orientiert sich daher an den hier projektierten Reichweiten und betrachtet eine maximale Reichweite von bis zu 225 NM (420 km), welche zwischen den Maximalwerten für die projektierte Reichweite und der Abschätzung der nutzbaren Reichweite liegt. Die nutzbare Reichweite resultiert dabei wesentlich aus der Sendeleistung des Datenlinks, welche sich proportional zum Quadrat der Reichweite verhält. Die Möglichkeiten ein richtungsabhängiges Abstrahlverhalten mit ggf. höheren Reichweiten bei gleichbleibender Sendeleistung zu erreichen, wird durch die

beabsichtigte Nutzung von bestehenden Antenneninstallationen am Luftfahrzeug wesentlich beschränkt. Die möglichen Anwendungen des Luft-Luft-Datenlinks sind in Tabelle 3-3 mit Nennung der derzeit in Verwendung befindlichen technologischen Lösung aufgeführt.

Tabelle 3-3: Anwendungsmöglichkeiten des LDACS Luft-Luft-Datenlinks

Kategorie	Mögliche Anwendung	Bestehende Lösung
Kommunikation	Luft-Boden-Kommunikation in ORP-Lufträumen durch Vergrößerung des Abdeckungsbereichs der Bodenfunkinfrastruktur [78]	Satellitenkommunikation HF-Datenlink HF-Sprechfunk
Navigation	Alternative Positionsbestimmung und Zeitsynchronisation [39]	DME
Luftraumüberwachung	Positionsmitteilung an umgebenden Luftverkehr [17, 78]	ADS-B Satellitenbasiertes ADS-B

3.2 Mobile ad-hoc Netzwerke

Durch die Einführung eines LDACS Luft-Luft (*air-to-air*; A2A) Datenlinks ergeben sich verschiedene neue Möglichkeiten des Informationsaustausches zwischen Luftverkehrsteilnehmern und Einrichtungen am Boden auf direktem oder indirektem Weg unter Zuhilfenahme eines als Netzwerkknoten dienenden weiteren Luftverkehrsteilnehmers. Bereits durch LDACS Luft-Boden (*air-to-ground*; A2G) oder aktuell im Einsatz befindliche Datenlinktechnologie wird der direkte Informationsaustausch zwischen Luftfahrzeug und Bodenstation ermöglicht, wie in Abbildung 3-2 dargestellt. Durch den von LDACS A2A realisierten Informationsaustausch zwischen zwei Luftfahrzeugen, wie in Abbildung 3-1 dargestellt, eröffnen sich weiterhin Möglichkeiten des indirekten Informationsaustausches über ein als Netzwerkknoten dienendes weiteres Luftfahrzeug. Dies ist der indirekte Informationsaustausch zum einen zwischen zwei Luftfahrzeugen nach Abbildung 3-3 und zum anderen zwischen einem Luftfahrzeug und einer Bodenstation gemäß Abbildung 3-4.

Aktuell gibt es jedoch mangels vorhandener technischer Möglichkeiten keine Anwendungen, welche einen direkten, wechselseitigen Informationsaustausch zwischen Luftverkehrsteilnehmern erfordert. Eine neue Technologie, welche diese Funktionalität einführt, muss daher zunächst die bestehenden Anwendungen mit Informationsaustausch zwischen Luftfahrzeug und Kommunikationspartner am Boden adressieren. Die vielversprechendste Anwendungsmöglichkeit des LDACS A2A Datenlinks liegt daher in der Bildung von mobilen ad-hoc Netzwerken unter Nutzung der indirekten Verbindungstypen aus Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4. Dabei vernetzen sich mit LDACS A2A ausgestattete Luftverkehrsteilnehmer innerhalb ihrer jeweiligen Datenlinkreichweiten untereinander zu einem mobilen Netzwerk. Eine Gruppe an untereinander vernetzten Luftverkehrsteilnehmern wird dabei im weiteren Verlauf dieser Arbeit als *Cluster* bezeichnet. Luftverkehrsteilnehmer, welche sich zugleich in Reichweite zu einer Bodenstation befinden, stellen über LDACS A2G Datenlink eine Verbindung zu dieser her und ermöglichen somit den Informationsaustausch zwischen

3 Technologieübersicht Luftfahrt Datenlink

Flugsicherung und Fluggesellschaften am Boden mit allen Luftverkehrsteilnehmern innerhalb des ad-hoc Netzwerkes. Das Netzwerk zeichnet sich dabei durch eine hohe Varianz über die Zeit aus, da die Anzahl der vernetzten Luftverkehrsteilnehmer mit deren Bewegung und damit verbundenem möglichen Verlassen der Datenlinksreichweite variiert.

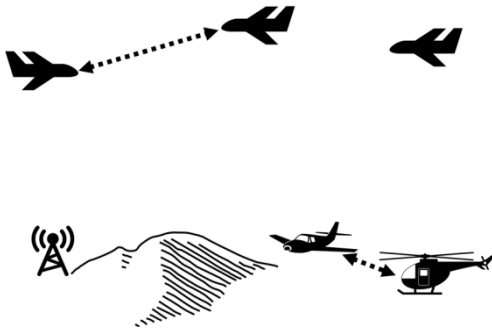


Abbildung 3-1: Luft-Luft (direkt)

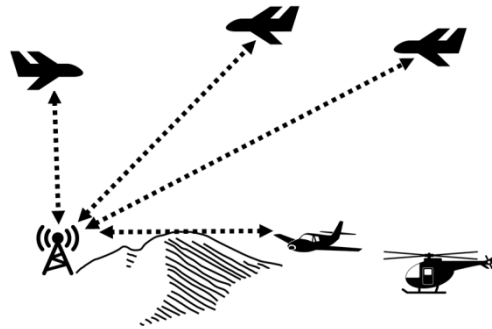


Abbildung 3-2: Luft-Boden (direkt)

Direkte Verbindung (Punkt-zu-Punkt)

Indirekte Verbindung (ad-hoc Netzwerk)

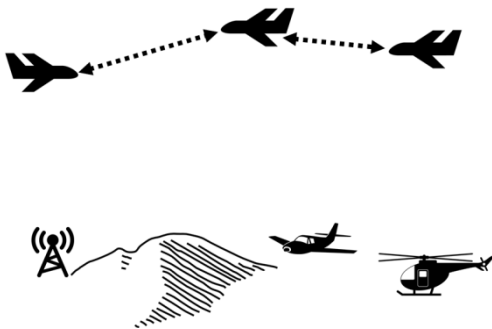


Abbildung 3-3: Luft-Luft (indirekt)

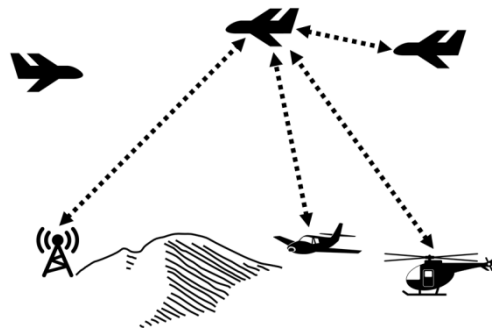


Abbildung 3-4: Luft-Boden (indirekt)

Als mobiles ad-hoc Netzwerk (*mobile ad-hoc network*; MANET) wird dabei ein dezentrales Netzwerk beschrieben, bei welchem die Netzwerkknoten nicht ortsfest sind, nicht auf eine bereits vorhandene Infrastruktur zurückgegriffen wird und sich die einzelnen Teilnehmer ad-hoc verbinden können [92]. Die mögliche Nutzung von ad-hoc Netzwerken in der Luftfahrt ist bereits mehrfach adressiert worden [76, 93–96]. Zhang et al. [76] beschreiben dabei den Unterschied zwischen MANETs, luftfahrtbezogenen ad-hoc Netzwerken (*aeronautical ad-hoc network*; AANET), fliegenden ad-hoc Netzwerken (*flying ad-hoc network*; FANET) und fahrzeuggestützten ad-hoc Netzwerken (*vehicular ad-hoc network*; VANET). Eine Übersicht nach Zhang et al. ist in Tabelle 3-4 ersichtlich. MANETs zeichnen sich dabei durch zufällige Bewegungsmuster mit Geschwindigkeiten im Bereich der menschlichen Schrittgeschwindigkeit aus, die Netzwerkknoten befinden sich am Boden und unterliegen Einschränkungen bei der Energieversorgung. AANETs haben demgegenüber weniger restriktive Einschränkungen bei der Versorgung der technischen Kommunikationseinrichtungen mit Energie, die Netzwerkknoten befinden sich dem Flugverhalten von Transportflugzeugen entsprechend in der Luft und bewegen sich mit hoher Geschwindigkeit entlang von

Flugrouten. VANETs nutzen Oberflächenfahrzeuge als Netzwerkknoten, welche sich mit deutlich geringeren Geschwindigkeiten in kleinerem Radius fortbewegen. Als FANETs werden solche Netzwerke beschrieben, welche unbemannte Luftfahrzeuge als Netzwerkknoten verwenden. Wesentliche Unterschiede zwischen FANETs und AANETs bestehen nach [76] in den unterschiedlichen Bewegungsmustern der Netzwerkknoten, welche bei FANETs regional eingegrenzt sind und eine größere Varietät bei den Flugpfaden aufweisen.

Tabelle 3-4: Kategorisierung von ad-hoc Netzwerken nach [76]

Netzwerktyp	Vernetzte Objekte	Geschwindigkeit [m/s]	Höhe [m]	Maßstab	Energiebedarf	Netzdichte	Zuverlässigkeits- / Sicherheitsanforderungen
MANET	Mobiltelefon	0 – 1,5	1 – 250	0,25	eingeschränkt	Hoch	Mittel
VANET	Fahrzeuge	4 – 36	0,5 – 5	1	Nicht eingeschränkt	Stadt: hoch Land: niedrig	Sehr hoch
FANET	RPAS / Flugdrohnen	8 – 128	< 122	80	Eingeschränkt	missionsabhängig	Mittel
AANET	Luftfahrzeuge	245 – 257	9100 – 13000	740	Nicht eingeschränkt	Skaliert mit Bevölkerungsdichte	Sehr hoch

3.3 Technologische Herausforderungen

Während der LDACS Luft-Luft-Datenlink prinzipiell auf der LDACS Variante für Luft-Boden-Kommunikation aufsetzt, bringt die Nutzung in einem dezentralen, selbstorganisiertem ad-hoc Netzwerk Anforderungen mit sich, welche in einigen Aspekten gesonderte Lösungen in der technischen Umsetzung erforderlich machen [78]. Eine Übersicht der LDACS Technologie für den Luft-Boden-Datenlink findet sich in [17] und eine detaillierte Spezifikation in [97]. Der LDACS Luft-Luft-Datenlink baut auf den gleichen technischen Grundprinzipien auf und ermöglicht einen direkten Informationsaustausch zwischen zwei Flugzeugen. Die technische Auslegung des Datenlinks ist dabei prinzipiell ein Kompromiss aus Reichweite und erreichbarer Datenübertragungsrate. Beide Parameter sind dabei getrennt von der Reichweite und den erreichbaren Datenübertragungsraten des LDACS Luft-Boden-Datenlinks zu betrachten. Um die verschiedenen Herausforderungen bei der Auslegung des Datenlinks einordnen zu können und Zielkonflikte strukturiert zu erfassen, bietet sich eine am *Open Systems Interconnection Model* [98], im Folgenden OSI-Modell genannt, angelehnte

3 Technologieübersicht LuftfahrtDatenlink

Darstellung an. Eine ähnliche Aufschlüsselung der einzelnen technischen Auslegungsaspekte und aktuellen Forschungsfragen für AANET-Technologien auf die Schichten des OSI-Modells findet sich in [99]. Das OSI-Schichtmodell unterscheidet dabei sieben Ebenen, denen jeweils eng begrenzte Funktionen zugewiesen werden und deren Abstraktionsgrad von der untersten bis zur obersten Schicht zunimmt. Die sieben Ebenen sind dabei:

- ❖ Physikalische Schicht, bzw. Bitübertragungsebene: Physikalische Übertragung der Bits als zum Übertragungsmedium passenden Signal
- ❖ Sicherungsschicht: Sicherstellen des Netzzugriffes (*media access control*) und Sicherstellen der Linkstabilität
- ❖ Vermittlungsschicht, bzw. Netzwerkschicht: Wegsuche zwischen den Netzwerkknoten und Weitervermittlung von Datenpaketen.
- ❖ Transportschicht: Segmentierung des Datenstroms, Stauvermeidung und Sicherstellung fehlerfreier Übertragung
- ❖ Sitzungsschicht: Steuerung von Verbindungen
- ❖ Darstellungsschicht: Umsetzung von Datenformatierungen
- ❖ Anwendungsschicht: Ein- und Ausgabe der Daten

Tabelle 3-5 gibt eine Übersicht über die mit den oben gelisteten OSI-Schichten verbundenen Forschungsfragen und untersuchten Aspekte in der Technologieauslegung bezüglich eines LDACS Luft-Luft-Datenlinks. Hierbei sind nur Arbeiten mit direktem Bezug zu dem LDACS Luft-Luft-Datenlink berücksichtigt. Eine weiterführende, generelle Übersicht zu Forschungsfragen und Auslegungsaspekten für AANETs findet sich etwa in [76] und [99], während die Auslegung des LDACS Luft-Boden-Datenlinks bereits Eingang in erste technische Standards gefunden hat [97]. Hierbei wurde auf die gesonderte Auflistung der Sitzungs- und Darstellungsschichten verzichtet und lediglich die Anwendungsschicht als übergeordnete Ebene aufgenommen, in welcher der Kommunikationsbedarf entsteht. Dieser Aspekt wird im Kapitel 4 in Zusammenhang mit der Definition des Anwendungsfalls adressiert. Die Herausforderungen für die Bitübertragungsschicht liegen in der Auswahl geeigneter Modulierungsverfahren zur Übertragung der Informationen über das Kommunikationsmedium. Hierbei soll im Wesentlichen auf die für den LDACS Luft-Boden-Datenlink entwickelten Methoden zurückgegriffen werden [78]. Eine größere Herausforderung und ein Bedarf für Anpassung der Technologie bestehen für die Sicherungs-, Vermittlungs- und Transportschichten. Aufgrund des Wegfalls der Bodenstationen und der Eigenschaft als dezentral organisiertes Netzwerk sind geeignete Verfahren für die Abstimmung der Netzwerkknoten untereinander zu definieren. Weitere Herausforderungen bestehen in der Sicherstellung der Linkstabilität oder Auswahl der bestmöglichen Übertragungsstrecke im AANET unter Berücksichtigung der hohen Geschwindigkeit der als Netzwerkknoten dienenden Luftfahrzeuge und der stark variierenden Konnektivität in Abhängigkeit des Verkehrsaufkommens. Eine Übersicht über die Anforderungen für AANETs aufgrund der physikalischen Randbedingungen für die Kommunikation während der verschiedenen Flugphasen, welche vor allem die Auslegung auf Bitübertragungsebene beeinflussen, wird in [100] beschrieben und in [76] zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 3-5: Auslegungsaspekte des LDACS Luft-Luft-Datenlinks nach OSI-Schichten

Schicht	Aufgabe	Referenz	Empfehlung
Bitübertragung (Physical Layer)	Physikalische Informationsübertragung	[101]	Untersuchung von alternativen Frequenzmodulationsverfahren
		[78]	Nutzung von Verfahren zur Vorwärtsfehlerkorrektur
		[17]	Nutzung orthogonales Frequenzmultiplexverfahren für LDACS1
Sicherung (Data Link Layer)	Linkstabilität	[90]	Erhöhte Zuverlässigkeit der Datenübertragung durch Sendewiederholungen
	Link Konnektivität	[78, 91, 101]	Zeitmultiplexverfahren gegenüber stochastischen Zugriffsverfahren von Vorteil
	Netzzugriff	[90, 102]	Kombination aus selbstorganisiertem Zeitmultiplex- und Frequenzmultiplexverfahren
Vermittlung (Network Layer)	Routing Management	[103, 104]	Flugpfadabhängiges Routing-Protokoll
		[90]	Vergleich von proaktiven, reaktiven und Geo-Routing-Verfahren, Empfehlung von Geo-Routing-Verfahren
		[105]	Auf Linkdauer basierendes reaktives Routing-Verfahren
Transport (Transport Layer)	End-to-End Management	[90]	Nutzung von Ansatz auf Basis von <i>User Datagram Protocol</i>
Anwendungsschicht	Datengenerierung	Kapitel 4 [106]	Definition von Referenzanwendungen

Über die oben aufgeführten Fragestellungen hinaus, gibt es weitere technologische Herausforderungen:

- ❖ Verschlüsselung der Kommunikationsdaten [107–110]
- ❖ Koexistenz mit bestehenden Systemen, insb. hinsichtlich der Nutzung des Frequenzbandes [111–113]
- ❖ Wechsel von Luft-Luft- auf Luft-Boden-Datenlink [90]
- ❖ Antenneninstallation [114]

Weiterhin bestehen Herausforderungen bei der Umsetzung des LDACS-Funkgeräts in eine integrierbare Avionikkomponente. Während dies für die in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Luftverkehrsteilnehmer kein wesentliches Erschwernis darstellt und z.B. auf bestehende Antenneninstallationen zurückgegriffen werden kann, stellt es eine entscheidende Einstiegschürde bei der Adaption der Technologie auf die in der Regel wesentlich kleineren und weniger standardisierten Luftfahrzeuge der allgemeinen Luftfahrt dar [87].

3 Technologieübersicht LuftfahrtDatenlink

In Hinblick auf die Identifikation geeigneter Kernauslegungsparameter, welche in der weiteren Nutzwertanalyse nach dem in Kapitel 1.3 dargestellten Vorgehen verwendet werden können, sind ausgehend von den in Tabelle 3-5 aufgeführten Untersuchungen folgende Eigenschaften des LDACS Luft-Luft-Datenlinks festzuhalten:

- ❖ Reichweite [78, 91, 101]
- ❖ Datenübertragungsrate [90, 101]
- ❖ Latenzzeiten [90, 105]
- ❖ Fehler- und Paketverlustrate [90, 91, 101, 105]
- ❖ Datenüberhang [101, 107]

Die Latenz und die aus Fehler- und Paketverlusten resultierende Zuverlässigkeit der Datenübertragung jeweils bezogen auf die Kommunikation zwischen den Endpunkten ist als Kommunikationsleistung (*Required Communication Performance*; RCP) als Anforderungssatz von der internationalen Zivilluftfahrtorganisation (ICAO) definiert [115–118] und in technischen Standards festgehalten [119–121]. Jedoch sind Latenzzeiten, Fehler- und Paketverlustrate sowie der Datenüberhang in starkem Maße abhängig von der Ausgestaltung vor allem der Sicherungs-, Vermittlungs- und Transportschicht in Verbindung mit der jeweiligen Netzwerktopologie im AANET und dem zugrunde liegenden Anwendungsfall. Für eine initiale Nutzwertbetrachtung erscheinen sie daher nicht geeignet. Die Reichweite des Datenlinks hingegen stellt eine wesentliche Auslegungsgröße dar, deren Annahme keine detaillierte Auslegung der Datenlinktechnologie erfordert. Jedoch hat sie unmittelbare Auswirkung auf die Auslegung des physikalischen Datenlinks in der Bitübertragungsebene. Hohe Reichweiten können sich zudem negativ auf die übrigen Parameter auswirken (siehe z.B. [78]). Initiale Anforderungen von 100 NM bis 200 NM für die Datenlinkreichweite im kontinentalen oder ozeanischen Streckenflug sind z.B. in [57] formuliert. Die hierfür zulässige Sendeleistung des LDACS-Datenlinks wird in dem Standardisierungsentwurf der ICAO [122] auf 42 dBm (15,849 W) festgelegt. Die nutzbare Datenübertragungsrate im Sinne des Durchsatzes von Anwendungsdaten ist die Zielauslegungsgröße, welche sich nach dem aus dem in der Anwendungsschicht angesiedelten und im folgenden Kapitel 4 beschriebenen Kommunikationsbedarf ableitet. Da für die Übertragung der Anwendungsdaten ein Datenüberhang an Steuerdaten, wie z.B. Informationen über Absender und Empfänger, Prüfsummen, Koordinierung des Netzzugriffs, Koordinierung des Übertragungspfades im ad-hoc Netzwerk, Authentifizierung und Verschlüsselung notwendig sind, ist effektiv nur ein Teil der sich aus der Signalmodulation ergebenden theoretischen Datenübertragungsrate für die in dieser Arbeit betrachteten Anwendungsdaten aus den oberen 1-3 Schichten des OSI-Modells nutzbar. Der zu erwartende erreichbare Durchsatz von Anwendungsdaten für den LDACS Luft-Luft-Datenlink wird somit unter der in Tabelle 3-1 für den LDACS Luft-Boden-Datenlink ausgewiesenen Datenrate von 2,6 mbit/s bei gleichzeitiger Nutzung von zwei Kommunikationskanälen (Boden-Luft und Luft-Boden) liegen.

Als Kernauslegungsparameter für die Untersuchung des Nutzwertes der hier beschriebenen Luft-Luft-Datenlinktechnologie im Sinne des in Kapitel 1.3 beschriebenen Vorgehens werden daher die Luft-Luft-Reichweite r_a und die für Anwendungsdaten nutzbare Datenübertragungsrate δ gewählt.

4 Anwendungsfall Luftfahrt-Datenkommunikation

Ein wesentliches Element der Nutzwertanalyse ist die Auswahl eines geeigneten, operationell relevanten Anwendungsfalls für den zu untersuchenden Luftfahrt Datenlink LDACS A2A. Der Anwendungsfall ist ausschlaggebend für die Auswahl und Definition des Nutzwertes und muss daher möglichst eine zu erwartende Hauptanwendung des Datenlinks adressieren, um möglichst allgemeingültige und auf andere Anwendungsfälle übertragbare Schlüsse zuzulassen. Die Herausforderung besteht hierbei darin, dass die durch die betrachtete Technologie neu eingeführte Möglichkeit des direkten Austauschs von Information zwischen zwei Luftfahrzeugen (gemäß Abbildung 3-1) von bestehenden Anwendungen entsprechend der bestehenden technischen Möglichkeiten mit Ausnahme im Bereich der Überwachung nicht genutzt wird. Um die neue Technologie dennoch anhand eines bestehenden operationell relevanten Anwendungsfalls bewerten zu können, soll daher eine bestehende Anwendung mit Luft-Boden-Informationsaustausch (gemäß Abbildung 3-4) unter Nutzung eines mobilen ad-hoc Netzwerkes entsprechend Kapitel 3.2 als Anwendungsfall gewählt werden. Weiterhin soll die operationelle Relevanz des Anwendungsfalls für den sicheren und effizienten Flugbetrieb berücksichtigt werden, welche eine luftfahrttechnische Standardisierung und geordnete, flächendeckende Einführung erfordern. Zudem soll eine Eingrenzung auf relevante Flugphasen erfolgen, in denen die Technologie den höchsten Mehrwert erbringen kann. Gemäß dem in Kapitel 1.3 beschriebenen Vorgehen werden daher zunächst in den drei folgenden Kapiteln geeignete Anwendungen aus dem Gesamtzusammenhang der Flugführungsfunktionen ausgewählt und qualitativ in ihrer Charakteristik beschrieben. Diese sind die Grundlage für die Modellierung der Anwendungscharakteristik in Kapitel 6.4. Anschließend wird in Kapitel 4.4 ein Nutzwert definiert, welcher die Erfüllung dieser Anwendungen beschreibt

4.1 Anwendungsauswahl

Die Eingrenzung der relevanten Kategorien von Flugführungsanwendungen orientiert sich an bestehenden Einsatzkonzepten und laufenden Planungen wichtiger Interessensparteien wie ICAO, EASA oder FAA. Eine Abweichung der hier vorgenommenen Einordnung wird dabei nicht prinzipiell ausgeschlossen, steht jedoch im Widerspruch zum gewählten Ansatz die neue Datenlinktechnologie anhand einer bestehenden Flugführungsanwendung zu bewerten. Vor diesem Hintergrund wird bei der Betrachtung von Datenlinktechnologie primär die Kategorie Kommunikation der Flugführungsanwendungen adressiert. In der Kategorie Navigation werden im aktuellen Technologieumfeld nur einzelne Anwendungen, wie etwa der Empfang von Korrektursignalen abgedeckt (vgl. [10, 12], Kapitel 2.1). Die Überwachung in der Flugführung kann wie bei der Anwendung ADS-C sowohl unter Nutzung von Datenlinks erfolgen, als auch bei Nutzung von ADS-B, Mode-S oder Radarüberwachung über auf diese Anwendungen zugeschnittene Sensoren und Transponder. Die Auswahl des Anwendungsfalles reduziert sich somit auf die Kategorie Kommunikation sowie einzelne Anwendungen der Kategorie Überwachung.

Die operationelle Relevanz sowie die Sicherheitskritikalität sind prinzipiell bei allen für die Flugführung und Flugsicherung relevanten Anwendungen gegeben. Dies trifft auf alle

4 Anwendungsfall Luftfahrt-Datenkommunikation

Überwachungsanwendungen zu. Bei der Kommunikation ist eine weitere Differenzierung nach Kommunikationsklassen, wie in Kapitel 2.1.1 dargestellt, möglich. Laut den dort aufgeführten Definitionen erfüllen Flugführungskommunikation und operative Luftfahrtkommunikation die genannten Kriterien.

Um eine geeignete Flugphase für den Anwendungsfall zu identifizieren, bietet sich ein Blick auf den bestehenden Einsatz von Luftfahrtdatenlinks im Lufttransportsystem an. Diese ist auf Basis von [3, 10] und [32] bereits in Tabelle 3-2 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass im Flughafenbereich eine Abdeckung durch drei verschiedene Datenlinktechnologien besteht und in den weiteren Flugphasen zumindest eine Abdeckung sowohl durch bodengebundenen Datenlink als auch durch Satellitendatenlink besteht. Lediglich im Streckenflug in ORP-Lufträumen, in denen keine Bodeninfrastruktur vorhanden ist, ist keine Multilinkumgebung vorhanden und lediglich der Informationsaustausch über Satellitendatenlink möglich. Diese Flugphase bietet somit ein hohes Potential für ein von der LDACS-Datenlinktechnologie bereitgestelltes mobiles ad-hoc Netzwerk, welches in dieser Flugphase ein alternatives Medium für den Informationsaustausch bereitstellen kann. Das Prinzip hierzu wurde u.a. in [76, 93, 99] beschrieben.

Die Auswahl relevanter Anwendungen aus den Kategorien der Kommunikation, Navigation und Identifikation / Luftraumüberwachung erfolgt vor dem Hintergrund der Relevanz von Informations- bzw. Datenaustausch für diese Anwendungen. Im ersten Schritt erfolgt eine Fokussierung auf die Bereiche Kommunikation und Identifikation / Luftraumüberwachung, da nur bei diesen ein beidseitiger Informationsaustausch erfolgt. Die Informationen, welche bei der Navigation übertragen werden, werden zudem teilweise in der Form von Signallaufzeiten bei der Übertragung selbst erzeugt und sind in dieser Form für die Positionsbestimmung erforderlich. Alternative Kommunikationsmedien sind somit höchstens für Korrekturinformationen von Bedeutung. Die derzeit vorhandenen Anwendungen aus den Kategorien Kommunikation und Identifikation / Luftraumüberwachung, welche in ORP-Lufträumen relevant sind, werden in Abbildung 4-1 aufgeführt und hinsichtlich der am Informationsaustausch beteiligten Parteien, der Eigenschaft auf Luft-Luft- oder Luft-Boden-Informationsaustausch und ihrer Kritikalität für die Flugsicherheit und den Erhalt des Flugbetriebs beschrieben. Sicherheitskritisch sind dabei alle Informationsaustausche zwischen Luftfahrzeugen untereinander und mit der Flugsicherung (ATS). Die Kommunikation zwischen Luftfahrzeug und Fluggesellschaft (AOC) ist für einen möglichst effizienten operationellen Betrieb erforderlich, während die Bereitstellung von Kommunikationsanwendungen für die Passagiere (APC) keine Kritikalität für Sicherheit und Betrieb aufweist. Lediglich der Informationsaustausch für die Selbstidentifikation gegenüber anderen Luftverkehrsteilnehmern, welcher bei der Anwendung ADS-B erfolgt, und die darauf basierende ACAS-Funktion zur koordinierten Kollisionsvermeidung zwischen zwei Luftverkehrsteilnehmern, stellen Anwendungen mit Informationsaustausch zwischen zwei in der Luft befindlichen Kommunikationspartnern dar, wofür ein direkter Luft-Luft-Datenlink ohne weitere Vernetzung genügt. Jeder Informationsaustausch zwischen Luftverkehrsteilnehmer, Flugsicherung und Fluggesellschaft, sowie die individuelle Kommunikation der einzelnen Flugpassagiere erfordert eine Verbindung zwischen Luftfahrzeug und einem Kommunikationspartner am Boden. Dies ist vor dem Hintergrund der zu untersuchenden, in Kapitel 3 beschriebenen

Datenlinktechnologie durch die Bildung von ad-hoc Netzwerken mit Verbindung zu bodengebundener Kommunikationsinfrastruktur zu erreichen. Vor dem Hintergrund der im vorigen Absatz aufgeführten Motivation der Bereitstellung eines ergänzenden, alternativen Kommunikationsmittels für den Streckenflug in ORP-Lufträumen, sind insbesondere Luft-Boden-Informationsaustausche mit Relevanz für Flugsicherheit oder operationellen Betrieb von Interesse. Als geeignet wurden hierbei die in Abbildung 4-1 blau eingefärbten Anwendungen ADS-C und *controller-pilot data link communications* (CPDLC) der Flugführungskommunikation und Flugsicherung, sowie die operationelle Luftfahrtkommunikation (AOC) identifiziert. Diese werden in den nachfolgenden Kapiteln 4.2 und 4.3 weiter beschrieben.

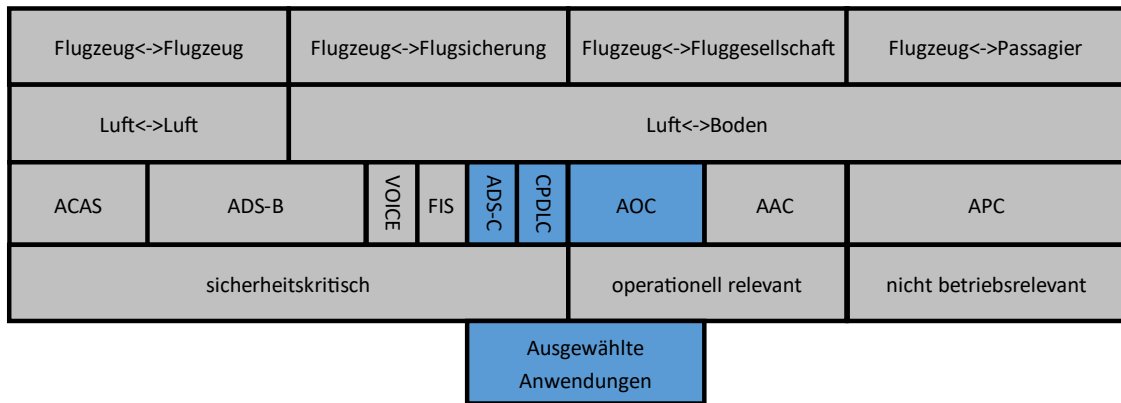


Abbildung 4-1: CNS-Anwendungsauswahl für die Nutzwertuntersuchung

4.2 Flugführungskommunikation

Unter Flugführungskommunikation (ATSC) wird in diesem Kontext jeglicher Informationsaustausch zwischen Flugsicherung und Luftverkehrsteilnehmer verstanden. Dies umfasst zum einen Kommunikationsanwendungen wie Sprechfunk, digitalen Nachrichtenaustausch (CPDLC) oder das Bereitstellen von Fluginformationen über den Fluginformationsdienst (*Flight Information Service*, FIS). Zum anderen sind auch die Luftraumüberwachungsanwendungen ADS-B und ADS-C eingeschlossen. ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance – Broadcast*) umfasst das automatische Aussenden von eigenen Fluginformationen zur Selbstidentifikation gegenüber der Flugsicherung und anderen Luftverkehrsteilnehmern innerhalb der Sendereichweite mit der Möglichkeit auf Anfrage spezielle Informationssätze zu versenden. Die Rahmenbedingungen für den Informationsversand sind dabei grundsätzlich festgelegt und bleiben konstant, wie in diesem Kapitel nachfolgend beschrieben. Weiterhin ist die Anwendung unabhängig von Lufträumen und Flugphasen durchgehend aktiv. ADS-C (*Automatic Dependent Surveillance – Contract*) beschreibt die Versendung von Information an ausgewählte Empfänger der Flugsicherung, welche zuvor die Bedingungen für den Informationsversand mit den einzelnen Luftverkehrsteilnehmern ausgehandelt haben. ADS-C wird in ORP-Lufträumen genutzt. Der Informationsversand kann periodisch oder ereignisbasiert erfolgen, etwa beim Erreichen von Wegpunkten oder dem Abweichen von der vorgegebenen Flughöhe. ADS-B nutzt dabei eine eigens für diese Anwendung ausgelegte Technologie, während ADS-C je nach Verfügbarkeit verschiedene der in Kapitel 2.1.1

4 Anwendungsfall Luftfahrt-Datenkommunikation

beschriebenen Datenlinktechnologien nutzen kann. Folgend wird auf die Anwendungen ADS-C und CPDLC näher eingegangen, für welche wie in Kapitel 4.1 beschrieben ein besonderer Mehrwert durch die Nutzung von AANETs in ORP-Lufträumen erwartet wird.

ADS-C dient der Erfüllung von Luftraumüberwachungsfunktionen in Lufträumen, in denen keine Abdeckung durch Sekundärradar besteht und die Wahrnehmung der Luftraumüberwachungsfunktionen durch Transponder-basierte Technologien wie Mode-S oder ADS-B (über *Extended Squitter*) nicht erfolgen kann.

Durch die Nutzung der bereits für AOC und andere ATS Anwendungen verwendeten Datenlinkverbindung, wie z.B. Satlink, VHF-Datenlink oder HF-Datenlink, ist für ADS-C keine eigene Übertragungstechnologie erforderlich, wie es etwa bei ADS-B der Fall ist. Der Dienst wird durch eine Anfrage des betreffenden Kontrollzentrums der Flugsicherung beim Luftverkehrsteilnehmer initiiert. In dieser Anfrage wird das Berichtsintervall für regelmäßige Statusberichte sowie die in jedem Bericht zu übermittelnden Informationen festgelegt. Weiterhin werden die Bedingungen für ereignisbasierte Statusmeldungen definiert. Auslösende Ereignisse sind u.a. das Überfliegen von zuvor festgelegten Wegmarken oder das Abweichen von vorgegebenen Werten für Kurs, Flughöhe oder Geschwindigkeit.

ADS-C ist ein etabliertes Mittel für die Wahrnehmung von Luftraumüberwachungsfunktionen. Die Aufgaben und Funktionen sind u.a. durch die ICAO festgeschrieben [12, 118, 123]. Die Verwendung von ADS-C im Zusammenhang mit Separationsabständen zwischen Luftverkehrsteilnehmern wird beispielsweise für den nordatlantischen Ozeanischen Luftraum in [56] festgelegt. Durch das Aufkommen von ADS-B über Satellit, welches die Weiterleitung von ADS-B Nachrichten über Satelliten der Iridium-Konstellation beschreibt [124], ist mittlerweile eine Alternative zu ADS-C gegeben. In der weiteren Entwicklung wird sich zeigen, ob es zu einer ergänzenden Koexistenz der beiden Luftraumüberwachungsfunktionen kommt oder ob ADS-C durch satellitenbasiertes ADS-B abgelöst werden kann.

Die enthaltenen Einzelanwendungen und Einzelnachrichten werden in [121] näher beschrieben. Im späteren Kapitel 6.4.1 wird im Zusammenhang mit der Kommunikationsmodellierung detailliert auf diese eingegangen.

Neben der prozeduralen und funktionalen Standardisierung für die operationelle Verwendung von ADS-C, wie sie in [56, 117–119, 121, 123] erfolgt, ist insbesondere die Definition der Leistungsanforderungen für Luftraumüberwachungsanwendungen (*Required Surveillance Performance*; RSP) relevant [119, 121]. Die betreffenden Leistungsstandards RSP 160, RSP 180 und RSP 400 sind in Tabelle 4-1 aufgeführt. So erfordert der Leistungsstandard RSP 180 beispielsweise eine Transaktionsdauer zwischen Nachrichtengenerierung (*Delivery Time*; DT) im Luftfahrzeug und Mitteilung an den Fluglotsen von 90 s für 95% aller Übertragungen. Eine Nachricht wird als verloren, bzw. nicht zugestellt angesehen, wenn sie die Zeitschwelle von 180 s überschreitet (*Overdue Delivery Time*; OT). 99% der Übertragungen haben innerhalb dieses Zeitfensters zu erfolgen um den RSP-Standard zu erfüllen. Die für die Übertragungstrecke zwischen Luftfahrzeug und Flugsicherungskontrollzentrum ausschlaggebende zulässige Übertragungszeit (*Required Communication Technical*

Performance; RCTP) für den Kommunikationsdienstleister (*Communication Service Provider; CSP*) liegt in diesem Fall bei 170 s für 99,9% und 84 s für 95% aller Übertragungen.

Tabelle 4-1: Leistungsanforderungen an die Luftraumüberwachung nach [120]

Parameter	RSP 160		RSP 180		RSP 400	
	OT	DT	OT	DT	OT	DT
Transaktionszeit [s]	160	90	180	90	400	300
Kontinuität	0,999	0,95	0,999	0,95	0,999	0,95
Verfügbarkeit	0,989		0,989 (Sicherheit) 0,9899 (Effizienz)		0,989	
Integrität [1/FH]	$1 \cdot 10^{-5}$		$1 \cdot 10^{-5}$		$1 \cdot 10^{-5}$	
RCTP_{CSP} [s]	12	5	170	84	340	270

Die Bereitstellung eines AANETs durch den in Kapitel 3 beschriebenen neuartigen Luftfahrt-datenlink würde für die Anwendung ADS-C vor allem Vorteile in der Übertragungssicherheit bieten und könnte Ausfälle der Satellitenkommunikationsinfrastruktur abfangen. Ausschlaggebend ist hierfür die erreichbare räumliche und temporale Kommunikationsabdeckung durch das AANET. Weiterhin sind Verbesserungen der Latenzzeiten bei der Übertragung möglich, jedoch ist hier eine Abhängigkeit von der konkreten technologischen Auslegung sowie der Netzwerktopologie zu erwarten (siehe Kapitel 3.3). Ein weiterer Mehrwert kann in einer Kostenreduktion für die Nutzung von ADS-C bestehen, wenn durch das AANET auf bodengebundene Kommunikationsinfrastruktur anstelle von Satellitenkommunikation zurückgegriffen werden kann.

Die zweite ATS-Kommunikationsanwendung, auf welche vor dem Hintergrund der Nutzwertanalyse des zu untersuchenden Datenlinks näher eingegangen werden soll, ist die textbasierte Kommunikation zwischen Fluglotsen und Pilot mittels Datenlink, CPDLC. Diese ist in kontinentalen Lufträumen eine elementare Säule, um die Kommunikation zwischen Luftverkehrsteilnehmern und Luftverkehrskontrolle effizienter zu gestalten und steigendem Verkehrsaufkommen Rechnung zu tragen. In ozeanischen Lufträumen bietet CPDLC zudem eine Alternative zu dem bisher verwendeten Sprechfunk über Kurzwellenfunk oder Satellit. Ersteres ist geprägt durch eine geringe Übertragungsqualität mit starkem Hintergrundrauschen [2], letzteres ist mit hohen Übertragungskosten verbunden [76, 93, 99].

CPDLC nutzt in gleicher Weise wie ADS-C bestehende Datenlinkverbindungen. Sofern eine bodengebundene Funkabdeckung vorhanden ist, ist dies bevorzugt der VHF-Datenlink, in ozeanischen und abgelegenen Lufträumen kann alternativ eine Satellitenverbindung und ggf. eine Datenlinkverbindung über Kurzwellenfunk (HF-Datenlink) genutzt werden. Die Nutzung von CPDLC stellt durch ein Einwahlverfahren sicher, dass die Kommunikation nur zwischen einem Luftverkehrsteilnehmer und einem Flugverkehrskontrollzentrum bzw. dem zuständigen Fluglotsen stattfinden kann.

Die Verbreitung und Verwendung von CPDLC ist unter anderem besonders ausgeprägt im europäischen kontinentalen Luftraum, findet aber auch in verdichteten Lufträumen in Nordamerika oder anderen Regionen Anwendung. Im nordatlantischen ozeanischen Luftraum findet CPDLC ebenfalls einen hohen Verwendungsgrad und wird für mehrere Separationsmethoden vorausgesetzt [56]. Eine Übersicht über die Regionen mit Verwendung von CPDLC findet sich in [118] und [123].

4 Anwendungsfall Luftfahrt-Datenkommunikation

Die Einzelanwendungen, welche von CPDLC mittels eines standardisierten Nachrichtensatzes (u.a. beschrieben in [118]) abgedeckt werden, sind in [125–128] für den kontinentalen europäischen Luftraum beschrieben. Die Einzelanwendungen für ozeanische und abgelegene Lufträume werden in [119, 121] aufgeführt. [120] fasst alle wesentlichen Anwendungen im *ATN Baseline 2* Kommunikationssatz zusammen. Eine Übersicht mit einem Vergleich der enthaltenen Einzelanwendungen ist in Tabelle 4-2. Diese werden zudem abgeglichen mit den im technischen Leitfaden für ein zukünftiges Radiokommunikationssystem (*Future Radio System – Communications Operating Concepts and Requirements*; FRS-COCR) [57, 129] erfassten Diensten. Die dort enthaltenen Informationen stellen eine wesentliche Grundlage für die später beschriebene Modellierung der Luftfahrtdatenkommunikation dar.

Tabelle 4-2: Allgemeine Übersicht der Datenlink-Einzelanwendungen

Anwendung	ED-120 Kontinental [125–128]	ED-122 Ozeanisch [119, 121]	ED-228 ATN B2 [120]	FRS-COCR [57]
DLIC	X	X	X	X
ACM	X	X	X	X
ACL/CRD	X	X	X	X
AMC	X	-	X	X
DCL	X	-	X	X
DSC	X	-	X	X
FIS / D-ATIS	X	-	-	X
FLIPCY	X	-	-	X
D-TAXI	-	-	X	X
IER	-	X	X	X
PR	-	X	X	X
4DTRAD	-	-	X	X
ITP	-	-	X	X
IM	-	-	X	X
DRNP	-	-	X	-

Auf eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Anwendungen wird an dieser Stelle zugunsten einer übersichtlichen Beschreibung verzichtet und auf die referenzierten Quellen und eine detailliertere Beschreibung der modellierten Anwendungen in Kapitel 6.4 verwiesen. Die Einzelanwendungen umfassen die Einwahl in die Kommunikationsumgebung (DLIC) und die Übergabe zwischen verschiedenen Kommunikationsstationen (ACM), verschiedene Anwendungen für die Freigabe von Flugsegmenten und Änderungsanfragen (ACL/CRD, DCL, DSC), Fluginformations- und Austauschdienste (IER, FIS / D-ATIS) sowie Funktionen für die Koordinierung von mehreren Luftfahrzeugen (4DTRAD, ITP, IM). Weiterhin enthalten ist die Anwendung zur Kontrolle des Sprechfunk-Mikrofons (AMC), Konsistenzprüfung des Flugplans (FLIPCY) sowie zur Übermittlung der aktuellen Navigationsleistung (RNP). Die Anwendung zur Positionsübermittlung (PR) beschreibt weiterhin die durch ADS-C erfüllten Funktionen.

Die Kommunikationskette zur Übertragung von CPDLC Informationen unterliegt den Leistungsanforderungen für die Kommunikation (RCP), wie sie unter anderem in [120] beschrieben wird. Dabei werden die Leistungsstandards RCP 130, RCP 240 und RCP 400

unterschieden, welche Anforderungen an die Transaktionszeit, Kontinuität, Verfügbarkeit und Integrität der Kommunikationsanwendung formulieren. Die Transaktionszeit umfasst dabei einen Zyklus aus Nachrichtenerstellung, -versand, -empfang und Antworterstellung, -versand sowie dem Empfang der Antwort. Schließlich werden den einzelnen Kommunikationsabschnitten zulässige Transaktionszeiten zugewiesen. RCP 130 ist für kontinentale Lufträume relevant, während RCP 240 und RCP 400 für ozeanische und abgelegene Lufträume ausschlaggebend sind. Die RCP-Standards sind in Tabelle 4-3 zusammenfassend dargestellt. Analog zu den Definitionen der Leistungsanforderungen an die Luftraumüberwachung beschreibt die Transaktionszeit (*transaction time*; TT), den mit einem Kontinuitätswert belegten Zielwert für die Übertragungszeit und die Ablaufzeit (*expiration time*; ET) den mit Kontinuitätswert belegten Zeitwert, bei dessen Überschreitung eine Nachricht ihre Gültigkeit verliert.

Tabelle 4-3: Leistungsanforderungen an die Kommunikation nach [120]

Parameter	RCP 130		RCP 240		RCP 400	
	ET	TT	ET	TT	ET	TT
Transaktionszeit [s]	130	67	240	210	400	350
Kontinuität	0,999	0,95	0,999	0,95	0,999	0,95
Verfügbarkeit	0,989		0,989 0,9899		0,989	
Integrität [1/FH]	$1 \cdot 10^{-5}$		$1 \cdot 10^{-5}$		$1 \cdot 10^{-5}$	
RCTP _{CSP} [s]	18	10	120	100	280	240

Bei der Betrachtung und Bewertung von Datenlinktechnologien ist vor allem der Anteil der Übertragungsstrecke interessant, welcher zwischen dem Kontrollzentrum der Flugsicherung und dem Luftfahrzeug liegt, bzw. die Übertragungsstrecke zwischen Funkbodenstation und Datenlinkantenne am Luftfahrzeug. Dieser fällt im RCP-Standard unter die Laufzeitanforderungen für den Kommunikationsdienstleister und ist in Tabelle 4-3 als RCTP_{CSP} ausgewiesen. So beträgt die zulässige Übertragungsdauer für den Kommunikationsdienstleister beispielsweise für den RCP 240 Leistungsstandard 100 s für 95% der Übertragungen und 120 s für 99,9% der Übertragungen. Hierbei ist zu beachten, dass diese Werte für die gesamte Übertragungsstrecke zwischen Luftfahrzeug und Kontrollzentrum der Flugsicherung anzuwenden sind, welche u.a. Kommunikationsstrecken am Boden zwischen Funkmast und Flugsicherung mit diversen zwischengeschalteten Verteilungsknoten beinhaltet (siehe auch Kommunikationstopologie in Abbildung 2-2). Der auf die reine Luftkomponente der Übertragungsstrecke entfallende Anteil der maximalen Übertragungsdauer ist daher in Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit des Gesamtnetzes niedriger anzusetzen.

Da nicht davon auszugehen ist, dass bei Nutzung eines AANETs, welches abhängig von der zufälligen Gegenwart einer ausreichenden Zahl anderer Luftverkehrsteilnehmer und der zeitvarianten Netzwerktopologie ist, die Kontinuitäts- und Verfügbarkeitsanforderungen an die Kommunikationsleistung gemäß Tabelle 4-3 erfüllt werden können, muss der Nutzwert auf die Ergänzung und Verbesserung bzw. teilweisen Ersatz der bestehenden Kommunikationsinfrastruktur aus Satellitenkommunikation und direkter Luft-Bodenkommunikation abzielen. Die Anforderungen an die Kommunikationsleistung aus den RCP-Standards kann

4 Anwendungsfall Luftfahrt-Datenkommunikation

hier eine Orientierung bieten, bis zu welchem Grad eine Verbesserung und teilweiser Ersatz der bestehenden Kommunikationsinfrastruktur erfolgen kann.

Die Bereitstellung eines AANETs für die Übertragung der ATS-Anwendungen ADS-C und CPDLC lässt insbesondere ein hohes Potential im Zusammenspiel mit bestehender Kommunikationsinfrastruktur erwarten. In diesem Zusammenspiel ist sichergestellt, dass die bestehenden Leistungsanforderungen erfüllt werden können und die tatsächliche Kommunikationsleistung ggf. weiter verbessert werden kann. Eine solche Verbesserung der Kommunikationsleistung würde zudem weitere Entwicklungen im Lufttransportsystem zu mehr Flugverkehr, Reduzierung von Sprechfunk zugunsten von CPDLC und komplexeren Flugprozeduren unterstützen.

4.3 Operationelle Luftfahrtkommunikation

Die operationelle Luftfahrtkommunikation (AOC) ist das betriebsrelevante und sicherheitskritische Gegenstück zur Flugführungskommunikation (ATS), welches die gesamte für den unmittelbaren Betrieb des Luftfahrzeug notwendige Kommunikation zwischen Pilot und Luftfahrzeug auf der einen Seite und der Operationszentrale der Fluggesellschaft auf der anderen Seite umfasst.

AOC dient dabei der Sicherstellung eines möglichst effizienten und störungsfreien Betriebs des Luftfahrzeugs, was sowohl den zeitlichen Ablauf des Fluges als auch laufende Wartungs- und Instandhaltungsaufgaben beinhaltet. Der Umfang der enthaltenen Funktionalitäten kann dabei je nach Flugzeugtyp und Betreiber variieren. Weiterhin spielen für die Ausprägung und Nutzung der AOC-Anwendung betriebsökonomische Aspekte eine starke Rolle, weshalb beispielsweise in ozeanischen und abgelegenen Lufträumen, in denen nur der vergleichsweise teure Satellitendatenlink zur Verfügung steht, ein reduzierter Funktionsumfang genutzt wird (vgl. hierzu [57]).

Zur Übermittlung der Informationen greift die AOC-Anwendung gleichermaßen wie die ATS-Anwendungen auf die bestehende Multi-Link Umgebung zurück, welche in der jeweiligen Flugphase verfügbar ist (siehe Tabelle 3-2). Für den Streckenflug in kontinentalem Luftraum ist dies aktuell der Luft-Boden-Datenlink VDL M2 mit perspektivischer Ablösung durch LDACS. Als Alternative steht in dieser Flugphase der Satellitendatenlink bereit. Für den Streckenflug in ozeanischem Luftraum steht absehbar nur ein Satellitendatenlink zur Verfügung, welcher perspektivisch durch das in dieser Arbeit diskutierte AANET auf der Basis von Luft-Luft-Datenlinks ergänzt werden kann.

AOC ist als grundlegende Anwendung für den sicheren und effizienten Betrieb von Luftfahrzeugen im Bereich des kommerziellen Lufttransports etabliert [2, 3].

Da durch die Offenlegung der konkreten Umsetzung der AOC-Anwendung detaillierte Einblicke in den Betriebsablauf einzelner Fluggesellschaften ermöglicht werden, sind hierzu wenige Informationen öffentlich verfügbar. Leistungsanforderungen ähnlich den RSP und RCP-Standards für ATS sind für AOC nicht vorhanden. Die Übertragungsleistung hängt damit von der Vereinbarung mit dem jeweiligen Kommunikationsdienstleister ab.

Einen Anhaltspunkt für die typischerweise in der AOC-Anwendung enthaltenen Einzelanwendungen liefern [57] und [58]. Auf eine Auflistung der Einzelanwendungen wird an dieser Stelle zugunsten einer kurzen Übersicht verzichtet und auf die genannten Quellen sowie die Darstellung des modellierten AOC-Kommunikationsbedarfs in Kapitel 6.4.2 verwiesen. Die Einzelanwendungen lassen sich klassifizieren in

- ❖ Konnektivitätsgrunddienste,
- ❖ Dienste zum Flugstatus,
- ❖ Dokumentationsanwendungen,
- ❖ Ergänzende Informationen für den Piloten,
- ❖ Anwendungen zu Wartung und Treibstoff,
- ❖ Anwendungen zur Softwareaktualisierung und
- ❖ Freitextanwendung.

AOC ist somit wesentlich für den ökonomisch effizienten Betrieb des Luftfahrzeuges und ermöglicht einer Fluggesellschaft den Informationsaustausch mit den von ihr betriebenen Luftfahrzeugen.

Ein wesentlicher Mehrwert, welcher durch die Nutzung eines AANETs für die Übertragung von AOC entstehen kann, ist einerseits eine Kostensenkung durch Vermeidung von Satellitenkommunikation und andererseits eine Verbesserung der bereits für ATS identifizierten Leistungsparameter hinsichtlich Kontinuität und Verfügbarkeit.

4.4 Definition Nutzwerte

Für die Bewertung der zu untersuchenden Datenlinktechnologie und die mit ihrer Hilfe aufgebauten AANETs gemäß dem in Kapitel 1.3 beschriebenen Vorgehen ist es erforderlich, geeignete Nutzwerte zu definieren. Diese sollen eindeutig quantifizierbar sein und im Wesentlichen von den in Kapitel 3 ausgewiesenen Kernausslegungsparametern abhängig sein, ohne weitere Abhängigkeiten von der Detailauslegung des Datenlinks. Als erster Anhaltspunkt werden hierfür die Anforderungskategorien, welche den technischen Leistungsstandards RSP und RCP unterliegen, herangezogen. Diese sind Transaktionszeit, Kontinuität, Verfügbarkeit und Integrität (vgl. Tabelle 4-1 und Tabelle 4-3). Ergänzend zu den technischen Leistungsstandards wird zudem die Datenlinktaxonomie aus [18, 24] herangezogen. Diese identifiziert die erforderlichen Eigenschaften der für den Erhalt von operationellen Funktionen innerhalb eines operationellen Szenarios notwendigen Informationen. In einem weiteren Schritt werden die Informationen nach Anwendungsgruppen geordnet. Hierbei werden unter anderem die zuvor beschriebenen Anwendungsfälle eingeordnet. In der darunter liegenden Ebene werden die Anwendungsgruppen mit Anforderungen belegt, bevor die Technologieauswahl erfolgt. Diese Anforderungen umfassen neben den oben genannten Leistungsanforderungen zudem Interoperabilitätsanforderungen und Ausstattungsanforderungen. Letztere stellen allerdings überwiegend regulatorische Anforderungen dar und sind allerdings im Rahmen der hier unternommenen Nutzwertanalyse auf technisch-operationeller Ebene als erfüllt vorauszusetzen. Daher verbleiben als Kandidaten für die Auswahl des Nutzwertes die in den Leistungsstandards RSP und RCP enthaltenen Anforderungen.

4 Anwendungsfall Luftfahrt-Datenkommunikation

Die Transaktionszeit ist, wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, stark von der Detailauslegung der Datenlinktechnologie abhängig und ist zudem stark von der jeweiligen Netzwerktopologie beeinflusst [130]. Weiterhin ist für eine Erfassung der Transaktionszeit im Sinne der Leistungsstandards RSP und RCP eine detaillierte Kenntnis der Gesamtnetze der jeweiligen Kommunikationsdienstleister abseits der durch die Datenlinktechnologie bedienten Kommunikationsstrecke in der Luft vonnöten. Die Transaktionszeit als Nutzwert wird daher für nicht geeignet befunden.

Gleiches gilt für die Kontinuitätsanforderung, welche in Verbindung mit den Anforderungen an die Transaktionszeit zu sehen ist und belegt, welcher Anteil der Übertragungen jeweils innerhalb der geforderten Transaktionszeit zu erfolgen hat. Die Kontinuität ist daher ebenfalls kein geeigneter Nutzwert im Sinne der initialen Nutzwertuntersuchung der neuen Datenlinktechnologie.

Die Verfügbarkeitsanforderung bietet mehr Potential für eine Verwendung als Nutzwert. So lässt sich diese aufteilen in eine technische Systemverfügbarkeit aufgrund der Verfügbarkeits- und Ausfallzeiten der einzelnen Systemkomponenten sowie eine operationelle Verfügbarkeit aufgrund der theoretisch erreichbaren Netzwerkabdeckung unter Berücksichtigung der Kernauslegungsparameter aus Kapitel 3. Die Einschätzung und Bewertung der technischen Systemverfügbarkeit erfordert eine tiefe Systemkenntnis und einen hohen technologischen Reifegrad der untersuchten Datenlinktechnologie und ist daher nicht als Nutzwert im Sinne der hier geplanten Untersuchung geeignet. Anders verhält es sich mit der operationellen Verfügbarkeit aufgrund der Netzwerkabdeckung. Diese lässt sich hinreichend abstrahiert betrachten, so dass eine Netzwerkabdeckung aufgrund des Kernauslegungsparameters Reichweite, r_a , unter Berücksichtigung der Vernetzung der Luftverkehrsteilnehmer möglich ist. Die Verfügbarkeit der Kommunikation über die zu untersuchende Datenlinktechnologie erscheint somit ein geeigneter Kandidat für einen Nutzwert zu sein.

Schließlich verbleibt die Anforderung an die Integrität der Übertragung. Die Bewertung der Übertragungsintegrität erfordert einen Einblick in die Detailauslegung der Übertragungstechnologie und ist daher ebenfalls für die Verwendung als Nutzwert im Sinne der hier unternommenen Nutzwertanalyse der Datenlinktechnologie ungeeignet.

Als geeigneter Nutzwert wurde somit die Verfügbarkeit der neuartigen Datenlinktechnologie und des von ihr aufgespannten Kommunikationsnetzes identifiziert. Die Verfügbarkeit wird dabei als die zeitliche und räumliche Verfügbarkeit dieses Kommunikationsweges gegenüber dem aus den Anwendungsfällen resultierenden Kommunikationsbedarf verstanden. Im Folgenden wird die Verfügbarkeit daher als Abdeckung des Kommunikationsbedarfs bezeichnet. Diese Kommunikationsbedarfsabdeckung kann sich auf einen spezifischen Anwendungsfall beziehen oder sämtlichen Kommunikationsbedarf im noch zu definierenden operationellen Szenario adressieren. Die Kommunikationsbedarfsabdeckung F lässt sich als Quotient aus tatsächlich übertragener Kommunikation T und Kommunikationsbedarf C beschreiben und wird in Kapitel 6.5.2 entsprechend definiert.

Weiterhin ist eine nur teilweisen Ausstattung der Verkehrsteilnehmer mit der zu untersuchenden Datenlinktechnologie aufgrund eines variierenden Einführungsgrades e_f z.B. aufgrund der Technologieeinführung (siehe Kapitel 2.3) zu berücksichtigen. Dieser Einführungsgrad e_f beschreibt den Anteil der Luftverkehrsteilnehmer, welcher mit der für die Teilnahme am AANET erforderlichen Avionik ausgestattet ist. Hieraus ergeben sich Variationsmöglichkeiten hinsichtlich der ausgestatteten Teilnehmer innerhalb eines definierten operationellen Szenarios. Daher ist die Betrachtung einer mittleren Kommunikationsbedarfsabdeckung $\bar{F}$ über mehrere Variationen an ausgestatteten Luftverkehrsteilnehmern sinnvoll, um die Effekte einiger für die Bildung von ad-hoc Netzwerken besonders günstigen oder ungünstigen Konstellationen auszugleichen und einen repräsentativen Mittelwert zu erhalten.

5 Operationelles Konzept

Wie in Kapitel 3 ausgeführt, bietet die als Anwendungsbeispiel zu untersuchende Technologie LDACS Luft-Luft-Datenlink voraussichtlich initial einen signifikanten Mehrwert für die in Kapitel 4 dargestellten Anwendungsfälle. Insbesondere das Bereitstellen einer weiteren Übertragungstechnologie in ozeanischen und abgelegenen Lufträumen (ORP) wie in Kapitel 3.1 verspricht einen Mehrwert zu bieten. Das operationelle Konzept ist dahingehend ausgerichtet für Kommunikationsanwendungen zwischen Kommunikationspartner in der Luft und Kommunikationspartner am Boden in ozeanischen oder abgelegenen Lufträumen außerhalb der Funkreichweite von Bodeninfrastruktur mittels luftgestütztem ad-hoc Netzwerk einen alternativen Kommunikationspfad zur Kommunikation über Satellitenverbindung zu ermöglichen. Hierfür kommen grundsätzlich alle abgelegenen oder ozeanischen Lufträume infrage, welche ein ausreichendes Verkehrsaufkommen ausweisen. Das Verkehrsaufkommen bedingt einerseits den Kommunikationsbedarf und stellt andererseits sicher, dass ausreichend Luftfahrzeuge zur Bildung eines luftgestützten ad-hoc Netzwerkes vorhanden sind.

Diese Bedingungen werden insbesondere von ozeanischen Lufträumen erfüllt, welche verdichtete, verkehrsreiche kontinentale Lufträume, wie Europa, Nordamerika oder Ostasien, verbinden. Dies trifft beispielsweise auf den nordatlantischen, ozeanischen Luftraum oder den nordpazifischen, ozeanischen Luftraum zu, welche beide aufgrund des hohen Luftverkehrsaufkommen über organisierte Flugpfadssysteme verfügen und bereits Gegenstand ähnlicher Untersuchungen waren [93, 95, 96, 131, 132]. Die hier vorliegende Arbeit nutzt aufgrund der ausgeprägten hohen Verkehrsdichte und gegebenen Datenverfügbarkeit das Nordatlantikszenario für die Ermittlung des anwendungsfallbezogenen Nutzwerts des LDACS Luft-Luft-Datenlinks.

Das operationelle Konzept wird beschrieben durch die räumliche Einordnung des Szenarios (5.1), die Flugbewegungsdaten, welche das Luftverkehrsaufkommen abbilden (5.2), die vorhandene Kommunikationsinfrastruktur (5.3) sowie die Ausprägung des in Kapitel 4 beschriebenen Anwendungsfalls der Luftfahrt-Datenkommunikation in diesem operationellen Kontext (5.4, 5.5).

5.1 Räumliche Einordnung

Der nordatlantische Luftraum nach Verständnis des ICAO Verbindungsstelle für Europa und den Nordatlantik (ICAO EUR-NAT) [73] umfasst nördlich von ca. 20° nördlicher Breite die ozeanischen Kontrollzonen (*oceanic control areas*; OCA)

- ❖ Santa Maria (LPPO),
- ❖ Shanwick (EGGX),
- ❖ Bodo (ENOB),
- ❖ Reykjavik (BIRD),
- ❖ Gander (CZQX) und
- ❖ New York Oceanic East (KZWY).

Diese sind in Abbildung 5-1 dargestellt. Die hier dargestellten ozeanischen Kontrollzonen sind identisch mit den entsprechenden Fluginformationsgebieten (*flight information regions*; FIR) mit Ausnahme von Nuuk FIR (BGGL), welches oberhalb von Flugfläche 195 entlang einer Trennlinie bei 63°30'' nördlicher Breite aufgeteilt wird auf die ozeanischen Kontrollzonen von Gander (CZQX) und Reykjavik (BIRD). Im Folgenden wird unter nordatlantischem Luftraum der nordatlantische obere Luftraum im Höhensegment zwischen den Flugflächen 285 und 420 verstanden, dessen Luftraumstruktur in Abbildung 5-1 dargestellt ist.

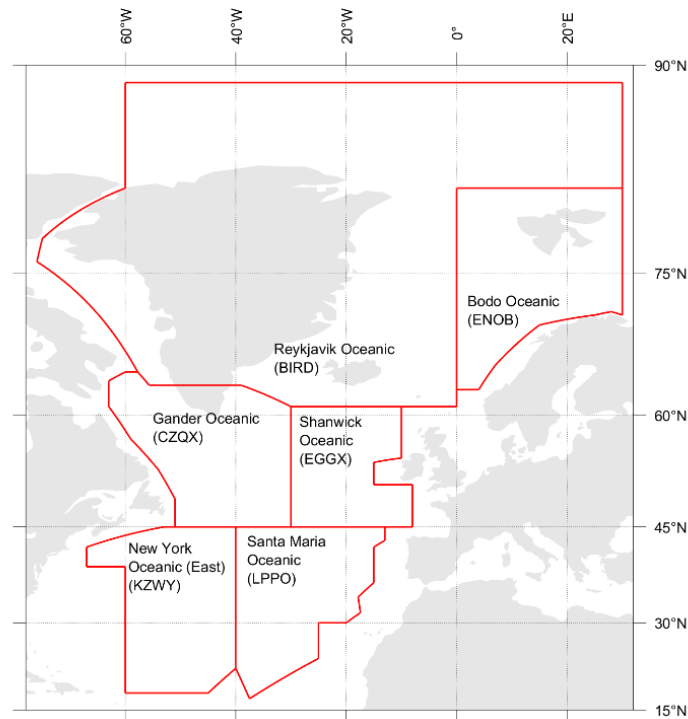


Abbildung 5-1: Nordatlantische ozeanische Kontrollzonen [106]

Besonderheiten bei den NAT-OCA bestehen in eingeschlossenen Landmassen mit Bodeninfrastruktur und Luftverkehr in der Flugphase An- und Abflug. Dies trifft z.B. auf Island oder die zu Portugal gehörigen Azoren zu.

In Zusammenhang mit der nachfolgend beschriebenen Fokussierung auf die verkehrsreichsten OCAs Gander (CZQY) und Shanwick (EGGX) wird eine Eingrenzung des betrachteten Bereichs auf die OCA-Anteile nördlich von 39° nördlicher Breite vorgenommen. Weiterhin ist es für die Untersuchung der Konnektivität erforderlich, eine Randzone entlang der östlichen und westlichen Grenzen der NAT-OCAs zu berücksichtigen. Die Breite dieser Randzone wird dabei entsprechend der größten betrachteten Kommunikationsreichweite gewählt. Eine detaillierte Definition der OCAs mit Ausweisung der Eckpunkte findet sich im Anhang (Abbildung A-1 und Tabelle A-2).

5.2 Flugbewegungen

Die Flugbewegungen als zugrunde liegende Mobilitätsdaten werden definiert als zeitreferenzierte Flugtrajektorien mit Informationen zu Start- und Zielflughafen, Flugzeugtyp,

5 Operationelles Konzept

Flugnummer und Fluggesellschaft. Betrachtet wird nur kommerzieller Lufttransport im Regelbetrieb gemäß Kapitel 2.2.1. Als Referenzzeitraum wird der 1. August 2019 als repräsentativer verkehrsreicher Tag gewählt. Die hohe Anzahl an vorhandenen Flügen ermöglicht bei Reduktion des Datensatzes, z.B. durch den in der Modellierung variierten Anteil an ausgestatteten Luftverkehrsteilnehmern, ebenfalls Aussagen für verkehrsärmere Zeiträume. Eine Berücksichtigung von für die Kommunikation im AANET ungünstiger, verkehrsärmerer Konstellation ist durch die Reduzierung des angenommenen Anteils mit der Datenlinktechnologie ausgestatteter Luftfahrzeuge weiterhin möglich. Bei der Wahl eines verkehrsarmen Referenzzeitraumes bestünde das Risiko, den unter realistischen Rahmenbedingungen erreichbaren Nutzwert der Referenztechnologie zu unterschätzen. Aufgrund des in 2020 pandemiebedingt erfolgten Einbruchs des globalen Flugaufkommens und der seither erfolgenden Erholung ist zu erwarten, dass ein ähnliches Verkehrsaufkommen in den Jahren 2023 - 2026 wieder erreicht wird [133, 134]. Das hier entwickelte operationelle Konzept sollte somit für diese Jahre repräsentativ sein. Berücksichtigt werden Flüge, deren Flugpfade eine Nutzung des nordatlantischen Luftraums erwarten lassen. Dies wird angenommen bei Flügen mit Start- und Zielflughäfen auf verschiedenen Seiten des Atlantiks, von denen sich mindestens einer von beiden in Nordamerika oder Europa befindet. Weiterhin werden Flüge zu den in den NAT-OCAs liegenden Flughäfen betrachtet (z.B. Reykjavik, Azoren).

Eine Besonderheit im nordatlantischen Luftraum stellt das organisierte Flugpfadsystem (*organized track system*; OTS) dar. Dieses stellt dem Flugverkehr zwischen Europa und Nordamerika täglich aktualisierte Flugstraßen entlang vordefinierter Wegpunkte zur Verfügung, um das Risiko durch Annäherungen und Nahbegegnungen zwischen Luftverkehrsteilnehmern zu minimieren und gleichzeitig einer großen Anzahl von Luftverkehrsteilnehmern je nach Flugrichtung die Nutzung oder Umgehung von Höhenwinden zu ermöglichen. Dies bewirkt zudem eine überwiegende räumliche Trennung von Flugpfaden in östlicher und westlicher Richtung. Diese sind weiterhin getrennt über die unterschiedlichen Zeitfenster für Abflüge in Nordamerika und Europa. Abflüge aus Nordamerika überqueren 30° westlicher Länge überwiegend zwischen 0100 UTC (*universal time coordinated*) bis 0800 UTC, während Abflüge aus Europa in westlicher Richtung diese Wegmarke überwiegend im Zeitraum von 1130 UTC bis 1900 UTC überqueren [135]. Hinsichtlich der möglichen Interkonnektivität zwischen einzelnen Luftverkehrsteilnehmern zur Bildung eines ad-hoc Netzwerkes werden die Verkehrsströme in westlicher und östlicher Richtung bei der Ermittlung des Nutzwertes und der Kernparameter daher getrennt betrachtet. Die Verfügbarkeit neuer Technologien, insbesondere für die Luftraumüberwachung [45, 124], ermöglichen ggf. eine Modifikation oder gänzliche Abkehr vom OTS in seiner aktuellen Form [136].

Tabelle 5-1 zeigt die Anzahl der Flugbewegungen aufgeschlüsselt nach NAT-OCA für den Zeitraum von 2014 bis 2021 auf der Basis von Aufzeichnungen der am NAT beteiligten Flugsicherungsbehörden [137–144]. Der Schwerpunkt des Verkehrsaufkommens liegt in den zentralen OCA des nordatlantischen Luftraums, Gander (CZQX) und Shanwick (EGGX). Diese machen für den Zeitraum der Aufzeichnungen durchschnittlich 66,8% des Gesamtverkehrsaufkommens im NAT aus. Dieser Anteil bleibt auch während der deutlichen Rückgänge des Verkehrsaufkommens während der Corona-Epidemie in 2020 und 2021 mit 65,5% und 64,9% erhalten. Um die Anzahl der betrachteten Flughafenpaare bei der

Auswahl der Flugbewegungsdaten zu reduzieren, sollen daher südlich gelegene Teile der OCAs KZWY und LPPO bei Bedarf von der Betrachtung ausgenommen werden. Dies ermöglicht den Ausschluss wenig frequentierter Flugrouten zwischen Südamerika und Europa sowie zwischen Nordamerika und Afrika.

Tabelle 5-1: Flugbewegungen je NAT-OCA 2014 bis 2023 [137–145, 65] mit Referenzjahr 2019

OCA Jahr	BIRD	ENOB³	CZQX	EGGX	KZWY	LPPO
2014	124906	17352	389313	418431	108823	111902
2015	142928	18665	407322	452825	114036	123508
2016⁴	-	-	-	-	-	-
2017⁵	180000	21303	450000	516000	126000	144000
2018	192337	21764	463066	501094	138630	151497
2019	192410	23496	511799	549324	144907	163339
2020	72338	9031	186570	212498	61424	67395
2021	94175	11510	238521	265380	83404	83576
2022⁶	168255	19070	380831	456902	127877	133655
2023⁷	194466	21335	435201	493096	144122	151210
Mittlerer Anteil am NAT-Gesamtaufkommen [%]	12,3	1,5	31,3	35,0	9,6	10,3

5.3 Bodeninfrastruktur

Der Nordatlantische Luftraum wird an seiner Ost- und Westseite sowie entlang der Südseite der BIRD OCA eingerahmt von einem Netz aus Funkbodenstationen, welche die Informationsübertragung über direkten Luft-Boden-Datenlink ermöglichen. Diese ermöglichen innerhalb ihrer Funkreichweite die Kommunikation über VHF-Sprechfunk und VHF-Datenlink (VDL). Im Rahmen der Untersuchung werden dabei alle VHF- und VDL-Bodenstationen der Betreiber ARINC und SITA innerhalb des NAT und entlang der Außengrenzen des NAT gemäß [73] wie in Abbildung 5-2 dargestellt berücksichtigt. Eine Auflistung der berücksichtigten Stationen unter Verwendung von Positionsdaten aus [60, 58] findet sich im Anhang (Tabelle A-3). Die vorhandene Bodeninfrastruktur bietet gute Rahmenbedingungen für die Vernetzung der durch Verkehrsteilnehmer gebildeten ad-hoc Netzwerke mit den bodengestützten Kommunikationsnetzen der Kommunikationsdienstleister und der Flugsicherung. Der hier gewählte Ansatz stellt im Gegensatz etwa zu dem in [93] vorgestellten Vorgehen mit hypothetischen Bodenstationen bewusst eine möglichst realitätsnahe Abbildung der

³ Anzahl Flugbewegungen in ENOB abgeschätzt auf 1,5% des Gesamtverkehrsvolumens auf Basis der Daten für eine Referenzwoche hoher Auslastung in 2019 aus [146].

⁴ Für das Jahr 2016 sind keine Daten für die Anzahl der Flugbewegungen vorhanden (siehe [139]).

⁵ Anzahl Flugbewegungen für Gesamtjahr auf Basis des Monatsdurchschnitt für April 2017 [140].

⁶ Flugbewegungen Januar bis Juni graphisch abgelesen aus [145].

⁷ In [65] sind nur Flugbewegungen für Juli bis Dezember 2023 enthalten, der Anteil Januar bis Juni gemäß monatlicher Verteilung in 2019 wurde aus [141] geschätzt.

5 Operationelles Konzept

Bodeninfrastruktur um den nordatlantischen Luftraum her, um für die Ermittlung des Nutzwertes realistische Rahmenbedingungen gemäß [73] zu schaffen.



Abbildung 5-2: VHF-Funkabdeckung im NAT bei Flugfläche 300 [73]

5.4 Rahmenbedingungen Konnektivität

Hinsichtlich der Konnektivität werden sowohl ideale Datenlinkverbindungen innerhalb der Funkreichweite angenommen, als auch eine ideale Vernetzung aller Luftfahrzeuge in Funkreichweite untereinander. Bezüglich der Funkreichweite werden lediglich geometrische Einschränkungen aufgrund des Sichthorizonts in verschiedenen Flughöhen berücksichtigt. Nicht berücksichtigt werden Beschränkungen in der Verbindungsqualität zwischen Luftfahrzeugen untereinander oder zwischen Luftfahrzeugen und Bodenstationen durch Effekte, welche auf den verschiedenen Netzwerkebenen auftreten und die Übertragungsqualität hinsichtlich Übertragungsrate und Reichweite beeinträchtigen. Dies betrifft unter anderem Beeinträchtigungen der Übertragungsqualität durch Sichtwinkel, Begegnungsgeschwindigkeiten, atmosphärische Effekte, Signalreflexionen, Zusatzkommunikation für den Verbindungsaufbau, Netzwerkzugriff und die Informationsweiterleitung sowie durch Datenfehler.

Die Luft-Boden-Verbindungen werden entsprechend der LDACS-Spezifikation [17] auf Basis der in [57] identifizierten Anforderungen mit einer Reichweite von 370,4 km (200 NM) angenommen. Abhängig von der Flugfläche, in der sich ein Luftfahrzeug befindet, kann die Reichweite entsprechend Abbildung 5-3 aufgrund des Sichthorizonts auch geringer sein.

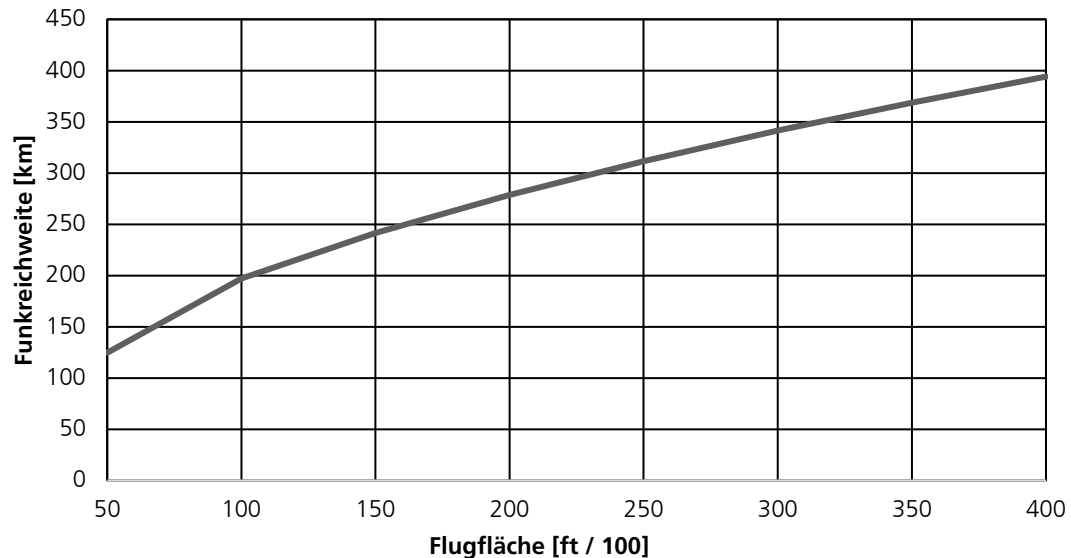


Abbildung 5-3: Funkreichweite in Abhängigkeit von der Flughöhe nach [30]

5.5 Rahmenbedingungen Kommunikation

Die Kommunikation im betrachteten operationellen Konzept besteht in der Anwendung der in Kapitel 4 beschriebenen Anwendungsfälle ATS und AOC auf die in Kapitel 5.1 definierten räumlichen operationellen Rahmenbedingungen. Der Kommunikationsbedarf für den Anwendungsfall AOC stützt sich hierbei bezüglich Art, Häufigkeit und Datenvolumen auf dem in [57] beschriebenen Umfang an Kommunikationsanwendungen im ozeanischen Luftraum ab. Es wird für alle Luftverkehrsteilnehmer ein identisches AOC Kommunikationsprofil angenommen. Unterschiede zwischen einzelnen Fluggesellschaften oder einzelnen Flugzeugmustern werden nicht berücksichtigt.

Für die Kommunikation im Anwendungsfall ATS wird angenommen, dass sich die Luftfahrtteilnehmer gemäß den Regeln für die Anwendung der Separationsminima im NAT [56] verhalten und die technischen Standard für die Datenlinkkommunikation [119–121] zur Anwendung kommen. Für die Auslöse- und Vorlaufzeiten von ADS-C Positionsmeldungen und Übergaben zwischen Kontrollzentren werden geeignete Werte gewählt, die mindestens eine Positionsmeldung und einen Abschluss der Übergabekommunikation vor Eintritt in die betreffende Kontrollzone gewährleisten. Zusätzliches Kommunikationsaufkommen aufgrund von fehlerhaften Informationsaustauschen oder relevanten Kursabweichungen (z.B. auf Basis von [147]) werden nicht berücksichtigt. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass jegliche Kommunikation zwischen Luftverkehrsteilnehmern und Luftverkehrskontrolle über Datenkommunikation stattfindet.

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

Die Ermittlung der operativen Kommunikationsabdeckung erfolgt über die Simulationsumgebung KoSMO (Kommunikations-Simulation Multipler Objekte), welche im Rahmen des Projektes IntAirNet (Inter Aircraft Network) entwickelt wurde. Diese teilt sich auf in vier Komponenten, welche jeweils durch einzelne Subroutinen der Modellierung unter Berücksichtigung der in Kapitel 5 formulierten operationellen Rahmenbedingungen adressiert werden:

- ❖ Mobilität (siehe Kapitel 6.2)
- ❖ Konnektivität und *Cluster*-Analyse (siehe Kapitel 6.3)
- ❖ Operativer Kommunikationsbedarf (siehe Kapitel 6.4)
- ❖ Kommunikationsbedarfsabdeckung (siehe Kapitel 6.5)

Das Gesamtmodell sowie die Schnittstellen der einzelnen Subroutinen werden in Kapitel 6.1 beschrieben. Die Modellierung von KoSMO erfolgte unter Nutzung von Matlab®, Python und R. Darüber hinaus wurde das *Trajectory Calculation Module* (TCM) des Instituts für Luftverkehr im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) [148] sowie das Visualisierungspaket für Matlab *m_map* [149] verwendet. Die Berechnung der Mobilitätsdaten erfolgte unter Nutzung des TCM. Die Konnektivitäts- und *Cluster*-Analyse nutzt Programme in Python und R Umgebungen. Der operative Kommunikationsbedarf und die Kommunikationsbedarfsabdeckung wurden schließlich mit Berechnungsprogrammen in Matlab®-Umgebung ermittelt. Neben der Nutzung bestehender Berechnungswerkzeuge (TCM), wurden somit im Wesentlichen auf die vorliegende Aufgabenstellung zugeschnittene Berechnungsanwendungen entwickelt und zur genutzt. Während einerseits möglichst lizenzfreie Programmiersprachen verwendet wurden (Python und R), kam andererseits die kommerzielle Software Matlab® zum Einsatz, wo dies wie z.B. bei der Berechnung der Kommunikationsbedarfsabdeckung aufgrund der höheren Leistungsfähigkeit für mehrdimensionale Matrixoperationen vorteilhaft erschien. In einer Abwägung von notwendiger Genauigkeit und vertretbarem Datenvolumen der Ergebnisdaten wurde eine Zeitschrittgröße von 60 s gewählt, welche alle Ergebnisdaten aus Flugbewegungssimulation, Konnektivitäts- und *Cluster*-Analyse, sowie die Kommunikationsbedarfsabdeckung betrifft. Lediglich die Kommunikationsereignisse aus der Berechnung des operativen Kommunikationsbedarfs können auch nicht-diskrete Zeitpunkten aufweisen, werden jedoch in der weiteren Berechnung wieder den diskreten 60 s Intervallen zugewiesen. Die Kommunikationsverläufe wurden wie alle übrigen Ergebnisdaten in einem proprietären Datenformat abgelegt. Für die bessere Verwendbarkeit in anderen Anwendungen würde sich etwa für die Kommunikationsverläufe eine Speicherung in einem etablierten Datenformat (z.B. .json) anbieten.

6.1 Modellübersicht

In Abbildung 6-1 findet sich eine Übersicht des Simulations- und Analysemodells. Hierbei wurde eine Strukturierung in die oben genannten Komponenten 1) Flugbewegungs- und 2) Konnektivitätssimulation, 3) Simulation des Datenkommunikationsbedarfs sowie 4) Analyse der Datenübertragung und 5) *Cluster*-Analyse vorgenommen, welche in [106, 150–152] vorgestellt wurden.

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

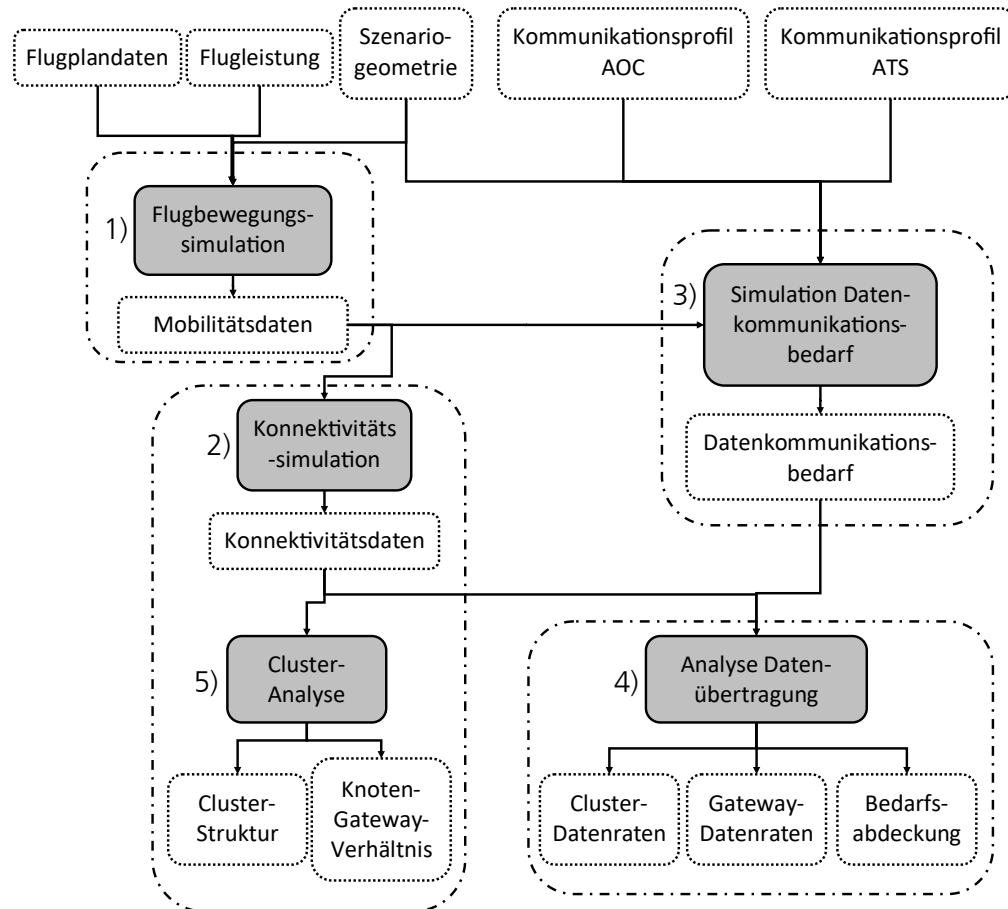


Abbildung 6-1: Strukturelle Darstellung des Simulationsmodells [106, 150–152]

In der Flugbewegungssimulation wird aus Szenariogeometrie, Flugplandaten und Flugleistung ein Mobilitätsdatensatz generiert, welcher alle relevanten Flugbewegungen innerhalb der Szenariogeometrie abbildet.

Die Simulation des Datenkommunikationsbedarfs nutzt diese Mobilitätsdaten, sowie Szenariogeometrie und Kommunikationsprofile der Anwendungsfälle ATS und AOC um den Datenkommunikationsbedarf zu ermitteln. Dieser enthält zeitlich referenzierte, geolokalisierte Kommunikationsereignisse für jeden Flug des Mobilitätsdatensatzes.

In der Konnektivitätssimulation werden die Mobilitätsdaten genutzt um die Konnektivität der Luftfahrzeuge untereinander und mit den in der Szenariogeometrie enthaltenen Bodenstationen zu ermitteln sowie zusammenhängende *Cluster* zu identifizieren.

Unter Nutzung der Konnektivitätsinformation und des Datenkommunikationsbedarfs werden schließlich unter Annahme von vereinfachten, idealisierten Übertragungsbedingungen die Abdeckung des Kommunikationsbedarfs durch das AANET sowie mittlere und maximale Datenraten innerhalb einzelner Netzwerkverbünde (sog. *Cluster*) sowie an den Verbindungsknoten zwischen *Clustern* und Bodeninfrastruktur (sog. *Gateways*) berechnet.

Die mithilfe der *Cluster-Analyse* aus den Konnektivitätsdaten gewonnen Erkenntnisse zu *Cluster-Struktur* und dem Verhältnis von Netzwerkknoten zu *Gateways* innerhalb einzelner

Cluster lässt abschließend eine weitere Einordnung und Bewertung der Ergebnisse aus der Analyse der Datenübertragung zu.

6.2 Flugbewegungssimulation

Die Modellierung der Flugbewegungen erfolgte unter Nutzung von Flugplandaten aus einer kommerziell verfügbaren Datenbank der Firma *Sabre* [153] für den in Kapitel 5.2 ausgewiesenen Zeitraum. Diese enthält die Flugplaninformationen für alle geplanten kommerziellen Passagiertransporte im Simulationszeitraum. Die Flugplandaten wurden gefiltert auf Flüge zwischen Europa und Nordamerika. Weiterhin wurde eine Reduzierung des Datensatzes auf Flüge mit Langstreckenflugzeugen und einer Reichweite von über 1000 km vorgenommen [152]. Dieser Datensatz deckt die wesentlichen Flugbewegungen des in Kapitel 5.1 definierten räumlichen Bereichs ab. Der reduzierte Flugplandatensatz wird schließlich unter Nutzung des Programms TCM [148] in Mobilitätsdaten umgesetzt. Die Mobilitätsdaten werden weiterhin auf den Anteil der Flugtrajektorien verkürzt, welcher sich innerhalb der NAT-OCA's nördlich von 39° nördlicher Breite oder der östlich und westlich davon gelegenen Randzonen befindet. Eine Einordnung der Flugbewegungssimulation mit Ausweisung eingehender und erzeugter Daten ist in Abbildung 6-2 dargestellt. Ergebnisgrößen, welche sich aus den Mobilitätsdaten ergeben, sind die Anzahl der Luftfahrzeuge im Simulationsbereich im Zeitverlauf ϕ sowie die Gesamtflugzeit τ .

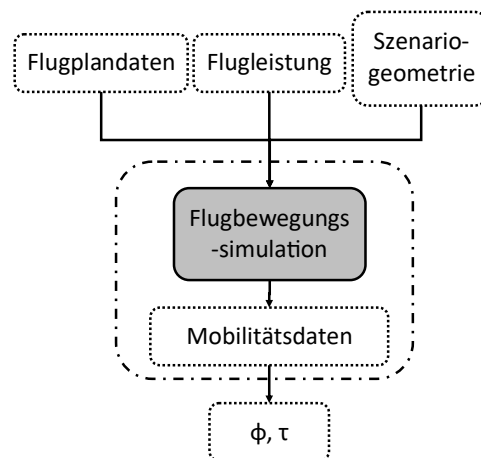


Abbildung 6-2: Detailansicht Flugbewegungssimulation

Auf dieser Basis wurden ein Datensatz mit Flügen in Ost- und Westrichtung für die Validierung des Kommunikationsbedarfs, sowie ein Datensatz mit Flügen lediglich in Westrichtung für die Analyse der Konnektivität und der Abdeckung des Kommunikationsbedarfs erstellt. Eine Übersicht über die verwendeten Datensätze ist in Tabelle 6-1 ersichtlich. Berücksichtigt wurden jeweils Flüge aus der *Sabre Datenbank* [153], der ausgewiesenen Zahl an Start-Ziel-Kombinationen (engl. *origin-destination-pairs*; ODP) unter Anwendung der oben beschriebenen Filterung.

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

Tabelle 6-1: Übersicht Mobilitätsdatensätze

Bezeichnung Szenario	Start-Ziel- Kombinationen	Flüge laut Datenbank	Gefilterte Flüge für Simulation
NAT 2019 B	69.666	7.018	2.605
NAT 2019 B o	35.754	3.299	780
NAT 2019 B w	33.912	3.307	665

In der weiteren Betrachtung wird die Anzahl der Luftfahrzeuge $\phi(t)$ verwendet, welche sich zum gleichen Zeitpunkt t in der Luft befinden. Diese ist als Mächtigkeit der Menge an Luftfahrzeugen im Simulationsbereich S zum Zeitpunkt t definiert:

$$\phi(t) = |S(t)| \quad (1)$$

Hierzu zeigt Abbildung 6-3 für alle enthaltenen Flüge nach Filterung (rot), alle Flüge im simulierten ozeanischen Luftraum oder der Randzone (blau) und den Anteil der Flüge, $\phi(t)$, welcher sich ausschließlich im ozeanischen Luftraum befindet (grün).

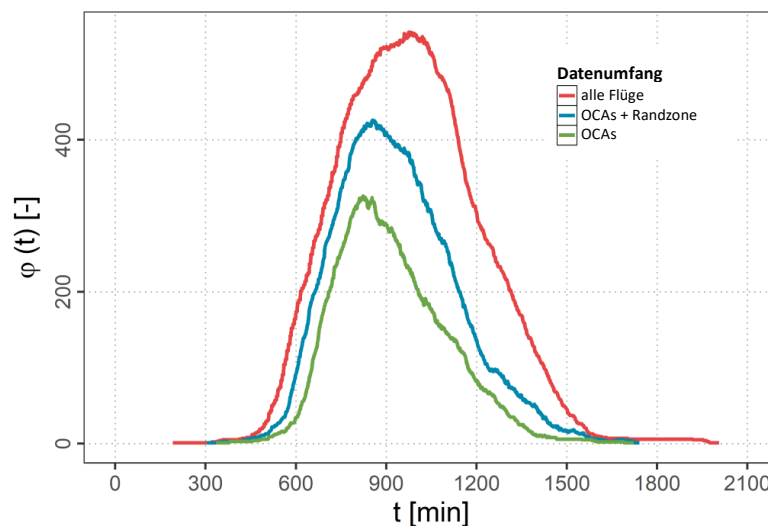


Abbildung 6-3: Westgerichteter Flugverkehr im Simulationsbereich mit Randzone [152]

In Abbildung 6-4 sind die zugehörigen Flugtrajektorien im simulierten ozeanischen Luftraum (grün) und in der Randzone (blau) dargestellt.

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

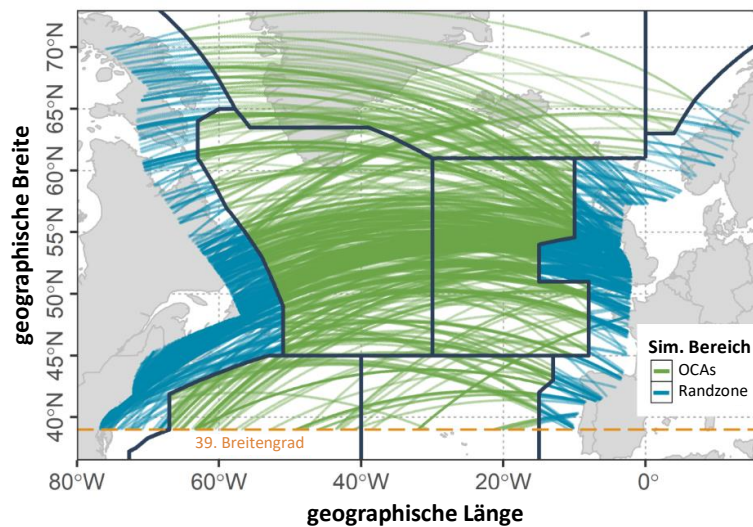


Abbildung 6-4: Flugspurenverteilung für das Szenario mit westgerichtetem Flugverkehr [152]

Die Flugtrajektorien der einzelnen Flüge werden unter Nutzung des *Trajectory Calculation Module* [148] auf Basis einer etablierten Flugleistungsdatenbank der EUROCONTROL (*base of aircraft flight performance models and data*; BADA, Version 4 [154]) als Geodäten zwischen Start- und Zielflughafen berechnet. Zudem wird zu jeder so berechneten Flugtrajektorien ein Höhenprofil ermittelt, mit ausgewiesenen Steigflug- und Sinkflugphasen jeweils zu Beginn und Ende der Flugtrajektorie, sowie die in Missionsprofilen des kommerziellen Lufttransport typischen Höhenstufen. Als Passagierladefaktor wurde ein Wert von 0,85 angenommen gemäß dem durchschnittlichen Wert, der für Europa und Nordamerika in 2019 erreicht wurde [155].

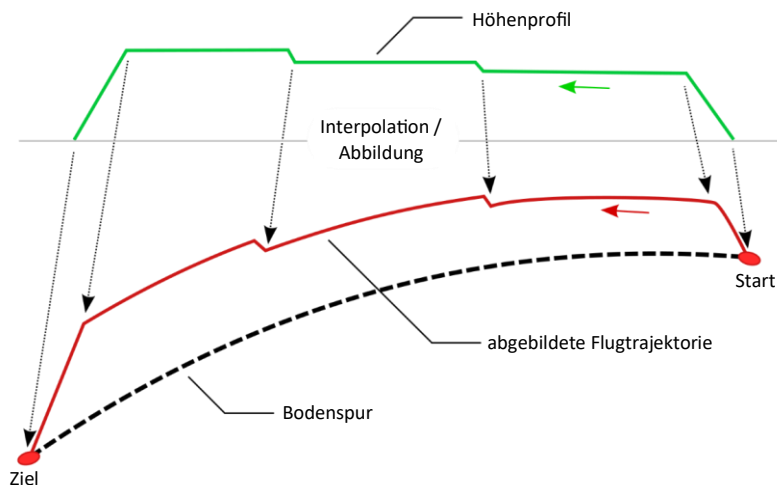


Abbildung 6-5: Abbildung der Flugtrajektorien [152]

Anschließend werden die Mobilitätsdaten, wie in [152] beschrieben, auf synchrone, diskrete Zeitschritte von 60 s interpoliert. Eine Variation des Mobilitätsdatensatzes und Selektion von Teildaten aufgrund von unterschiedlich angenommener Ausstattung der Luftverkehrsteilnehmer mit der für die Teilnahme am AANET notwendigen Kommunikationstechnologie wird im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

6.3 Konnektivität

Die Modellierung der Konnektivität erfolgt in zwei Schritten. In einem ersten Schritt werden zunächst die Mobilitätsdaten um A2G- und A2A-Kommunikationsverbindungen ergänzt und die Konnektivitätszustände der einzelnen Luftverkehrsteilnehmer ermittelt [152]. Im zweiten Schritt wird die Vernetzung der Luftverkehrsteilnehmer untereinander berücksichtigt und Gruppen vernetzter Luftfahrzeuge (*Cluster*) identifiziert [151].

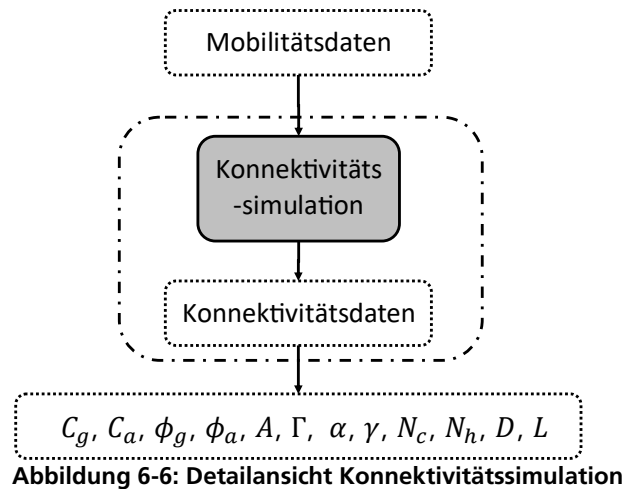


Abbildung 6-6: Detailansicht Konnektivitätssimulation

Abbildung 6-6 zeigt die Detailansicht der Konnektivitätsansicht mit eingehenden Mobilitätsdaten und den erzeugten Konnektivitätsdaten mit Ausweisung einzelner relevanter Kenngrößen. Diese umfassen die Zahl der Luftfahrzeuge mit Boden- und Luftkonnektivität, ϕ_g und ϕ_a sowie deren Anteile an der Gesamtzahl der Luftfahrzeuge im Simulationsbereich, C_g und C_a . Weitere Kenngrößen beschreiben die Flugzeit mit Boden- bzw. Luftkonnektivität (Γ, A) und deren relative Anteile an der Gesamtflugzeit (γ, α), die Anzahl der Verbindungen (N_c) und die Länge der Übertragungskette (N_h) sowie Menge (L) und Dauer (D) aller Luft-Luft-Verbindungen.

6.3.1 Verbindungstypen

Die Annahmen und Variationen zur Konnektivität werden in [152] beschrieben. Bezüglich der Konnektivität sind grundsätzlich Luft-Boden- und Luft-Luft-Verbindungen sowie der Anteil der ausgestatteten Luftfahrzeuge zu unterscheiden. Die Konnektivität hinsichtlich Luft-Boden-Verbindungen zwischen Luftfahrzeugen und Bodenstationen wird bestimmt durch die Platzierung der Bodenstationen entsprechend der Beschreibung in Kapitel 5.3, der Reichweite, und der geographischen Verteilung der Flugpfade. Als Reichweite für den Luft-Boden-Datenlink werden 370 km angenommen, entsprechend der in der LDACS A2G Spezifikation beschriebenen Maximalreichweite von 200 NM [97]. Für den Mobilitätsdatensatz mit westgerichtetem Luftverkehr, NAT 2019 w, aus dem vorigen Kapitel ergibt sich das in Abbildung 6-7 dargestellte Bild in grundsätzlicher Übereinstimmung mit der VHF-Funkabdeckung auf Flugfläche 300 im NAT (Abbildung 5-2).

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

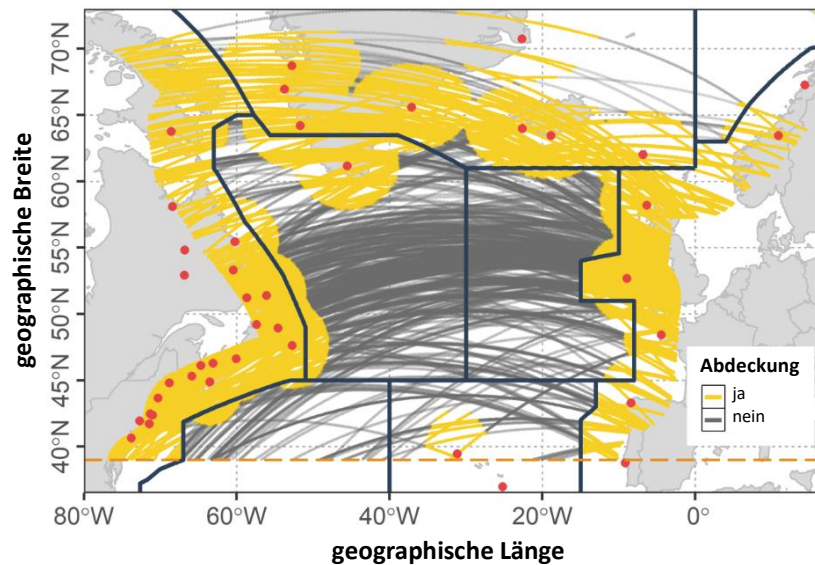


Abbildung 6-7: Flugspuren mit Bodenstationen und Abdeckungsbereichen [152]

Die Reichweite des Luft-Luft-Datenlinks wird im Bereich von 0 km bis 420 km um eine ausreichende Anzahl an Stützstellen zu erhalten in 15 km Intervallen variiert. Der Wert von 15 km als Intervallgröße wurde als ganzzahliger Teiler der Maximalreichweite von 420 km gewählt. Die resultierenden 28 Stützstellen liefern eine hohe Auflösung der Ergebnisse bei zugleich vertretbarem Berechnungsaufwand. In der Auslegung des Datenlinks ist hierbei zu beachten, dass die benötigte Sendeleistung um in der untersuchten Reichweite eine nutzbare Signalstärke zu erhalten proportional zum Quadrat der Reichweite zunimmt. Bei einer Steigerung der Reichweite von 15 km um den Faktor 28 auf 420 km steigert sich somit die benötigte Sendeleistung bei ansonsten gleichbleibenden Randbedingungen um den Faktor 784. Der Anteil an Luftverkehrsteilnehmern, welcher mit LDACS A2A ausgestattet ist wird im Wertebereich von 0 bis 1 in Schritten von 0,1 variiert. Eine Übersicht über die Parametervariation wird in Tabelle 6-2 gegeben. In Verbindung der Parameter e_f und r_a ergeben sich somit 290 einzelne Variationskombinationen. Da jeder Wert für den Einführungsgrad e_f mit Ausnahme von $e_f = 1$ mit zehn verschiedenen Variationen für die Auswahl der mit dem Luft-Luft-Datenlink ausgestatteten Teilnehmer berücksichtigt wird, ergibt sich eine Gesamtzahl von 2.810 verschiedenen Konnektivitätskonfigurationen.

Tabelle 6-2: Parametervariation Konnektivität

Parameter	Variation		Einheit
	Wertebereich	Schrittgröße	
e_f	0 – 1	0,1	[–]
r_g	370	-	[km]
r_a	0 – 420	15	[km]

Sowohl bei Luft-Boden-Datenlink als auch bei Luft-Luft-Datenlink wird eine Begrenzung der Funkreichweite aufgrund der Variation des Sichthorizonts bei variierender Flughöhe bei der Luftfahrzeuge bzw. Luftfahrzeug und Bodenstation, wie z.B. in [76] beschrieben,

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

berücksichtigt. Eine mögliche Begrenzung der Reichweite aufgrund der Sendeleistung wird aufgrund unterschiedlicher möglicher eingrenzender oder vorteilhafter Faktoren in der Datenlinkauslegung an dieser Stelle zunächst nicht berücksichtigt und ist bei der Ergebnisauswertung einzubeziehen. Darüber hinaus wird von einer idealen Datenlinkverbindung beider Kommunikationspartner ausgegangen, sobald sich diese innerhalb der Funkreichweite befinden. Die Funkreichweite wird dabei als Scheibe angenommen, d.h. konstant über die Richtung, in welcher sich der Kommunikationspartner befindet. Etwaige Unregelmäßigkeiten der Funkreichweite, welche sich z.B. aufgrund des Einbauortes der Funkantenne und Abschattungseffekte von Rumpf oder Leitwerken des Luftfahrzeuges ergeben können werden nicht berücksichtigt. Weiterhin werden Reichweiteneffekte aufgrund der Relativgeschwindigkeit der beiden Kommunikationspartner zueinander und der daraus resultierenden Richtungsänderung des ein- und ausgehenden Funksignals nicht berücksichtigt. Die Reichweite unter Nutzung des Erdradius R_e und der Flughöhen der beiden Kommunikationspartner, a_1 und a_2 , ergibt sich damit nach [76, 152] zu

$$r_{LOS} = \sqrt{a_1^2 + 2R_e a_1} + \sqrt{a_2^2 + 2R_e a_2} \quad (2)$$

Entsprechend den Grundlagen eines AANETs besteht eine Luft-Boden-Verbindung, sobald ein Luftfahrzeug direkt mit einer Bodenstation verbunden ist oder indirekt über eine Anzahl an Netzwerkknöten eine Verbindung mit einer Bodenstation aufbauen kann. Die sich so ergebende Bodenkonnektivität C_g zum Zeitpunkt t ergibt sich aus dem Quotienten aus der Anzahl der Luftfahrzeuge mit Bodenkonnektivität ϕ_g und der Anzahl der Luftfahrzeuge im Simulationsbereich ϕ zum betreffenden Zeitpunkt

$$C_g(t) = \frac{\phi_g(t)}{\phi(t)} \quad (3)$$

Die Gesamtflugzeit τ als Summe aller Einzelflüge innerhalb des Simulationsbereiches für die gesamte Szenariodauer berechnet sich aus der Summe der Einzelzeitschritte aller Flüge im Simulationsbereich multipliziert mit der Zeitschrittgröße Δt .

$$\tau = \sum_t \phi(t) \cdot \Delta t \quad (4)$$

Die Gesamtflugzeit Γ mit Bodenkonnektivität wird berechnet aus der Summe der Einzelzeitschritte aller Flüge mit Bodenkonnektivität multipliziert mit der Zeitschrittgröße Δt .

$$\Gamma = \sum_t \phi_g(t) \cdot \Delta t \quad (5)$$

Der relative Anteil γ der Flugzeit mit Bodenkonnektivität an der Gesamtflugzeit entspricht dem Quotienten aus Γ und τ .

$$\gamma = \frac{\Gamma}{\tau} \quad (6)$$

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

Weiterhin wird die Anzahl der benötigten Netzwerkknoten $n_{h,i}(t)$ für den Aufbau einer Verbindung eines Luftfahrzeuges i zu einer Bodenstation zum Zeitpunkt t definiert. Diese bildet die Grundlage für die Berechnung der durchschnittlichen Anzahl der benötigten Netzwerkknoten über alle bestehenden Verbindungen hinweg.

$$N_h = \frac{\Delta t}{T} \sum_t \sum_i n_{h,i}(t) \forall i \in S_g(t) \quad (7)$$

Analog zur Bodenkonnektivität C_g entspricht die Luftkonnektivität C_a dem Quotienten aus der Anzahl an Luftfahrzeugen mit Luft-Luft-Verbindung ϕ_a zum Zeitpunkt t und der Anzahl der Luftfahrzeuge im Simulationsbereich ϕ .

$$C_a(t) = \frac{\phi_a(t)}{\phi(t)} \quad (8)$$

Die Gesamtflugzeit mit Luftkonnektivität ergibt sich aus der Summe von ϕ_a über alle Zeitschritte, multipliziert mit der Zeitschrittgröße Δt .

$$A = \sum_t \phi_a(t) \cdot \Delta t \quad (9)$$

Aus dieser lässt sich der relative Anteil der Flugzeit mit Luftkonnektivität α an der Gesamtflugzeit τ berechnen.

$$\alpha = \frac{A}{\tau} \quad (10)$$

Die durchschnittliche Anzahl an Verbindungen aller Luftfahrzeuge mit Luftkonnektivität N_c wird berechnet aus der Summe der Anzahl bestehender Luft-Luft-Verbindungen je Luftfahrzeug i je Zeitschritt t über alle Luftfahrzeuge und Zeitschritt im Szenario für alle Luftfahrzeuge mit Luftkonnektivität.

$$N_c = \frac{\sum_t \sum_i n_{c,i}(t)}{A} \forall i \in S_a(t) \quad (11)$$

Weiterhin betrachtet wird die Verbindungsdauer für alle Luft-Luft-Verbindungen D . Die hierzu betrachtete Dauer d einer Luft-Luft-Verbindung l entspricht der Anzahl aufeinanderfolgender Zeitschritte, in denen die Verbindung besteht. Durch Multiplikation mit der Zeitschrittgröße ergibt sich somit die zeitliche Dauer. Während l eine einzelne Luft-Luft-Verbindung beschreibt, umfasst L die Menge aller Luft-Luft-Verbindungen.

$$D = \frac{\sum_n d}{|L|} \forall n \in L \quad (12)$$

Mit den oben aufgeführten Kennwerten lässt sich die Konnektivität im AANET grundsätzlich beschreiben hinsichtlich der relativen zeitlichen Anteile von Luft-Boden- und Luft-Luft-Konnektivität an der Gesamtflugzeit, der durchschnittlichen Anzahl an

Kommunikationsverbindungen je Luftfahrzeug und der durchschnittlichen Verbindungsdauern. Die zugehörigen Ergebnisse sind in Kapitel 7.1.1 bis 0 aufgeführt. Die Charakteristik der bei der Vernetzung im AANET stehenden Cluster wird dabei zunächst außer Acht gelassen und im nachfolgenden Kapitel 6.3.2 beschrieben.

6.3.2 Vernetzung

Aus der Summe an A2A- und A2G-Verbindungen bilden sich zwischen den Luftverkehrsteilnehmern vernetzte Strukturen und gesonderte Rollen der einzelnen Luftverkehrsteilnehmer heraus. Zum einen entstehen sogenannte *Cluster*, welche aus mindestens zwei, untereinander verbundenen Luftfahrzeugen bestehen, von denen mindestens ein Luftfahrzeug keine direkte Verbindung mit einer Bodenstation hat. Die Luftfahrzeuge innerhalb eines *Clusters* dienen entweder als Netzwerkknoten, sofern lediglich Verbindungen mit anderen Luftfahrzeugen bestehen oder als *Gateway*. Ein *Gateway*-Luftfahrzeug weist sowohl mindestens eine Verbindung zu einem anderen Luftfahrzeug auf, als auch mindestens eine Verbindung mit einer Bodenstation. Luftfahrzeuge, die als Netzwerkknoten dienen, werden dabei nur berücksichtigt, sofern sie sich im Simulationsbereich nach Abbildung 6-4 befinden. *Gateway*-Luftfahrzeuge können sich sowohl im Simulationsbereich als auch in der in Abbildung 6-4 ausgewiesenen Randzone befinden. Abbildung 6-8 zeigt hierzu die Detailansicht der *Cluster*-Analyse mit zugehörigen eingehenden und ausgehenden Daten und den darin enthaltenen Kenngrößen. Elementare Kenngrößen sind dabei die Anzahl der Luftfahrzeuge, welche in *Clustern* vernetzt sind (ϕ_{CL}), als *Gateway* dienen (ϕ_{GW}) oder allgemein für die Konnektivitätssimulation relevant sind (ϕ'). Zu letzterer Kenngröße, welche alle Luftfahrzeuge im simulierten ozeanischen Luftraum sowie *Gateway*-Luftfahrzeuge in der Randzone umfasst, wird ebenfalls die kumulierte Flugzeit τ' ermittelt. Weiterhin ausgegeben werden die zeitabhängigen Verhältnisse von vernetzten Luftfahrzeugen zu relevanten Luftfahrzeugen Ψ_{CL} und von *Gateway*-Luftfahrzeugen zu relevanten Luftfahrzeugen Ψ_{GW} . N_{CL} und N_{GW} beschreiben jeweils die kumulierte Anzahl an *Clustern* bzw. *Gateway*-Luftfahrzeugen im Zeitverlauf. Schließlich liefert die *Cluster*-Analyse die Kennziffern für das *Gateway* zu *Cluster* Verhältnis GPC , das Verhältnis von *Gateways* zu Netzwerkknoten GPN sowie das Verhältnis von *Gateways* zu Netzwerkknoten mit Bodenkonnektivität GPN' .

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

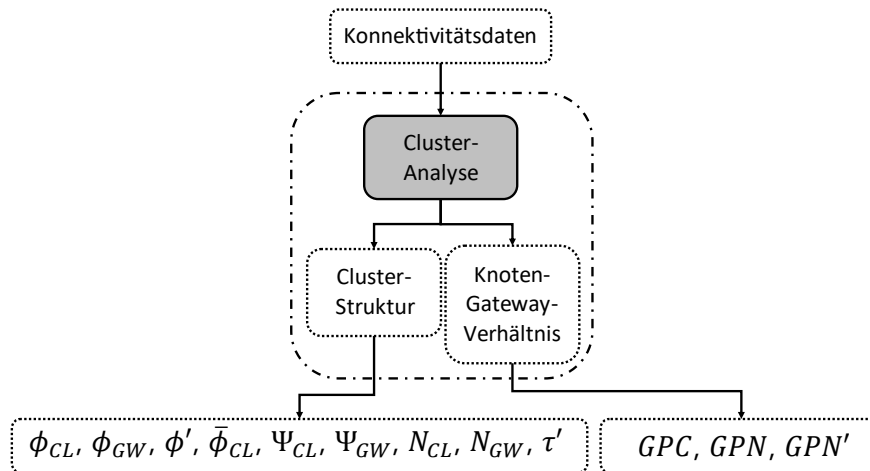


Abbildung 6-8: Detailsicht Cluster-Analyse

Die möglichen Verbindungstypen und Konnektivitätsarten sind in Abbildung 6-9 dargestellt. Die Bodeninfrastruktur wird durch zwei Bodenstationen *A* und *B* gestellt, welche sich in Außenbereich und Randzone befinden. Eine Positionierung im Simulationsbereich ist jedoch ebenfalls möglich (siehe Abbildung 6-7). Die Luftfahrzeuge 1-13 stehen über vier verschiedenen Verbindungsarten miteinander in Verbindung und bilden drei *Cluster I – III*. Die Luftfahrzeuge 4 und 5 sind über eine A2A-Verbindung miteinander verbunden und bilden das *Cluster II*. Dieser ist mit keiner Bodenstation verbunden und kann daher keinen der ausgewählten Anwendungsfälle abbilden. Eine Berücksichtigung bei der nachfolgenden Analyse der Abdeckung des Kommunikationsbedarfs erfolgt nicht. Luftfahrzeug 6 weist keinerlei Verbindung zu einem anderen Luftfahrzeug auf und kann ebenfalls keine Informationen mit einer Einrichtung am Boden austauschen. Die Luftfahrzeuge 1, 3, 7 und 12 sind direkt über eine A2G-Verbindung mit einer Bodenstation verbunden, jedoch besitzen nur die Luftfahrzeuge 1, 7 und 12 noch eine A2A-Verbindung mit einem weiteren Luftfahrzeug, welches sich im Simulationsbereich befindet. Daher stellen diese drei Luftfahrzeuge *Gateways* für die mit ihnen verbundenen *Cluster I* und *III* dar. Auf Luftfahrzeug 3 trifft dieses nicht zu, weshalb es weder einem *Cluster* zugerechnet wird, noch in der Kommunikationsbedarfsabdeckung berücksichtigt wird. Luftfahrzeug 13 befindet sich außerhalb von Simulationsbereich und Randzone und wird daher ebenfalls in der weiteren Analyse nicht berücksichtigt. Die Luftfahrzeuge 2 und 8-11 stellen einfache Netzwerkknoten in den *Clustern I* und *III* dar und sind über A2A-Verbindungen miteinander verbunden, die zugleich einen indirekten Zugang zum Bodennetzwerk aufweisen (indirekte Luft-Boden-Verbindung: A2A/A2G). Die *Cluster I* und *III* besitzen somit Bodenkonnektivität, welche allen beteiligten Netzwerkknoten bereitsteht. Da die Breite der Randzone r_b mit 420 km größer oder gleich der untersuchten A2A- und A2G-Reichweiten ist, ist es allein aufgrund der geometrischen Rahmenbedingungen nicht möglich, dass ein Luftfahrzeug im Außenbereich als *Gateway* oder Netzwerkknoten in einem *Cluster* dient. Der Ausschluss von Luftfahrzeugen im Außenbereich hat daher keine Auswirkungen auf die resultierende Konnektivität und die ermittelte Abdeckung des Kommunikationsbedarfs.

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

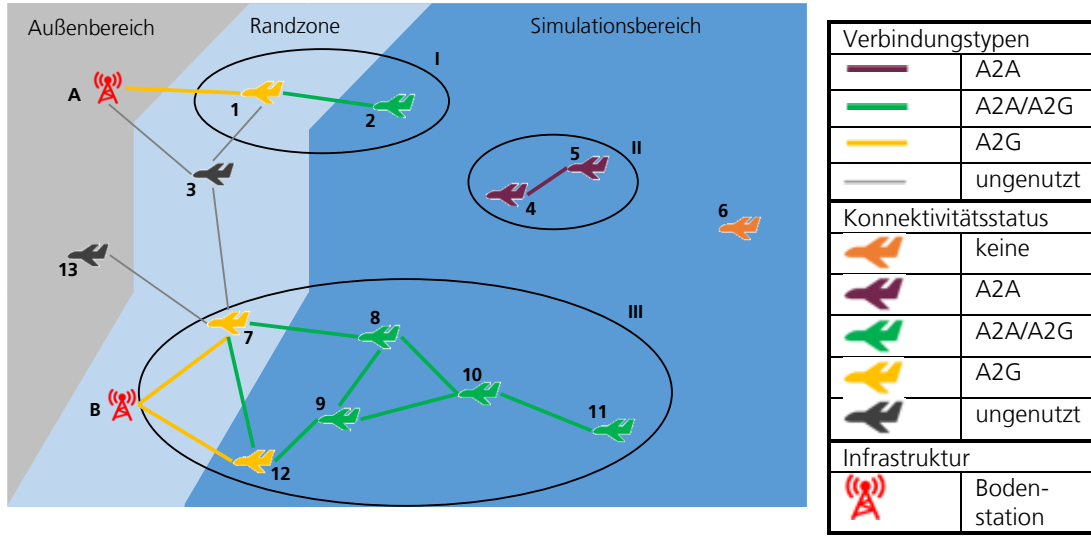


Abbildung 6-9: Arten von Konnektivität und Vernetzung im AANET [151]

Die nachfolgend in diesem Kapitel beschriebenen Kenngrößen für die Konnektivität wurden in [152] erstmals definiert und beschrieben.

Die Anzahl der Luftfahrzeuge ϕ_{CL} , welche Teil eines *Clusters* sind, ergibt sich aus der Mächtigkeit, $|S_{CL}(t)|$, der Menge an Luftfahrzeugen, welche in *Clustern* vernetzt sind.

$$\phi_{CL}(t) = |S_{CL}(t)| \quad (13)$$

In gleicher Weise ist die Anzahl der Luftfahrzeuge ϕ_{GW} definiert, welche als Luft-Boden-Knotenpunkt (*Gateway*) dienen.

$$\phi_{GW}(t) = |S_{GW}(t)| \quad (14)$$

Die Anzahl der für die Konnektivität relevanten Luftfahrzeuge ϕ' ist die Mächtigkeit der Vereinigung aus der Menge der *Gateway*-Luftfahrzeuge S_{GW} und der Menge der Luftfahrzeuge im Simulationsbereich S zum betreffenden Zeitschritt t .

$$\phi'(t) = |S(t) \cup S_{GW}(t)| \quad (15)$$

Weiterhin relevant ist die Anzahl der Luftfahrzeuge $\phi_{CL,i}$ in einem *Cluster* i , welche sich aus der zugehörigen Menge an Luftfahrzeugen in einem *Cluster* $S_{CL,i}$ ergibt.

$$\phi_{CL,i}(t) = |S_{CL,i}(t)| \quad (16)$$

Die durchschnittliche *Cluster*-Größe $\bar{\phi}_{CL}$ zu einem Zeitschritt t lässt sich mit $\phi_{CL,i}(t)$ und der Gesamtzahl der *Cluster* zu einem Zeitschritt $n_{CL}(t)$ berechnen nach

$$\bar{\phi}_{CL}(t) = \frac{1}{n_{CL}(t)} \sum_i \phi_{CL,i}(t) \quad (17)$$

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

Die Anzahl der Gateways $\phi_{GW,i}$ in einem Cluster i ist gegeben durch die Mächtigkeit der entsprechenden Menge $S_{GW,i}$, welche sich aus der Schnittmenge an Luftfahrzeugen im betreffenden Cluster $S_{CL,i}$ mit der Menge an Gateways S_{GW} ergibt.

$$\phi_{GW,i}(t) = |S_{GW,i}(t)| = |S_{CL,i}(t) \cap S_{GW}(t)| \quad (18)$$

Das Verhältnis der Anzahl an Clustern n_{CL} zur Anzahl der relevanten Luftfahrzeuge ϕ' ist gegeben durch Ψ_{CL} .

$$\Psi_{CL}(t) = \frac{n_{CL}(t)}{\phi'(t)} \quad (19)$$

Analog ist das Verhältnis der Anzahl an Gateways ϕ_{GW} zur Anzahl der relevanten Luftfahrzeuge ϕ' gegeben durch Ψ_{GW} .

$$\Psi_{GW}(t) = \frac{\phi_{GW}(t)}{\phi'(t)} \quad (20)$$

Eine weitere Kennziffer ist die Zahl der Gateways per Cluster $GPC(t)$, welche das Verhältnis der Anzahl an Gateways ϕ_{GW} zur Anzahl an Clustern n_{CL} im Zeitschritt t beschreibt.

$$GPC(t) = \frac{\phi_{GW}(t)}{n_{CL}(t)} \quad (21)$$

In gleicher Weise lässt sich $GPN_i(t)$, das Verhältnis der Anzahl an Gateways $\phi_{GW,i}$ in einem Cluster i zur Anzahl an Luftfahrzeugen in einem Cluster berechnen.

$$GPN_i(t) = \frac{\phi_{GW,i}(t)}{\phi_{CL,i}(t)} \quad (22)$$

Die $GPN(t)$ -Werte aller Cluster gemittelt über die Anzahl der Cluster n_{CL} ergeben die durchschnittliche Anzahl an Gateways je Luftfahrzeug.

$$GPN(t) = \frac{1}{n_{CL}(t)} \sum_i GPN_i(t) \quad (23)$$

Werden nur die Cluster betrachtet, welche auch eine Verbindung mit einer Bodenstation aufweisen, so wird $GPN'(t)$ verwendet.

$$GPN'(t) = \frac{1}{n_{CL}(t)} \sum_i GPN_i(t) \forall \{i | \phi_{GW,i}(t) > 0\} \quad (24)$$

Die kumulierte Anzahl an Clustern über die Simulationsdauer berechnet sich aus der Anzahl an Clustern je Zeitschritt n_{CL} .

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

$$N_{CL} = \sum_t n_{CL}(t) \quad (25)$$

Entsprechend ist die über die Simulationsdauer kumulierte Anzahl an *Gateways* N_{GW} definiert als Summe der Anzahl an *Gateway*-Luftfahrzeugen über den gesamten Simulationsverlauf.

$$N_{GW} = \sum_t \phi_{GW}(t) \quad (26)$$

Eine weitere Kennziffer ist die kumulierte Flugzeit aller relevanten Luftfahrzeuge über die Simulationsdauer.

$$\tau' = \Delta t \cdot \sum_t \phi'(t) \quad (27)$$

Hieraus lässt sich die relative, mittlere Anzahl an *Clusters* je Zeitschritt $\bar{\Psi}_{CL}$ ermitteln.

$$\bar{\Psi}_{CL} = \Delta t \frac{N_{CL}}{\tau'} \quad (28)$$

Die relative, mittlere Anzahl an *Gateways* je Zeitschritt ist analog definiert als

$$\bar{\Psi}_{GW} = \Delta t \frac{N_{GW}}{\tau'} \quad (29)$$

Unter Nutzung der Anzahl an Zeitschritten im Simulationsszenario n_t und der zeitschrittbezogenen Kennziffer $GPC(t)$, lässt sich die durchschnittliche Anzahl an *Gateways* je *Cluster* bezogen auf die gesamte Simulationsdauer GPC berechnen.

$$GPC = \frac{1}{n_t} \sum_t GPC(t) \quad (30)$$

Auf dieselbe Art unter Nutzung der zeitschrittbezogenen Kennziffer $GPN(t)$ wird die durchschnittliche Anzahl an *Gateways* pro vernetztem Luftfahrzeug GPN berechnet.

$$GPN = \frac{1}{n_t} \sum_t GPN(t) \quad (31)$$

Werden nur vernetzte Luftfahrzeuge mit Anbindung an eine Bodenstation als Referenz verwendet so ergibt sich die Kennziffer GPN' .

$$GPN' = \frac{1}{n_t} \sum_t GPN'(t) \quad (32)$$

Mit den in diesem Kapitel definierten Kennwerten ist nun ergänzend zu den in Kapitel 6.3.1 beschriebenen Kennwerten eine Charakterisierung der Vernetzung im AANET

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

möglich. So kann die Anzahl der Luftfahrzeuge in einzelnen *Clustern* und die Anzahl der als *Gateway* dienenden Luftfahrzeuge beschrieben werden. Darauf aufbauend können *Cluster* bezüglich des Verhältnisses von *Gateways* zu Kommunikationsknoten innerhalb der *Cluster* charakterisiert werden, was eine Indikation für die Stabilität der Luft-Boden-Verbindungen und die an den *Gateways* zu erwartenden, in Kapitel 6.5 beschriebenen Datenraten sein kann. Die zugehörigen Ergebnisse sind in Kapitel 7.1.6 aufgeführt.

6.4 Kommunikationsbedarf

Der Kommunikationsbedarf beschreibt das Kommunikationsaufkommen zwischen den Luftverkehrsteilnehmern und Parteien am Boden ungeachtet des Übertragungsmediums. Entsprechend den in Kapitel 4 gewählten Anwendungsfällen ist der hier beschriebene Kommunikationsbedarf bedingt durch die operationellen Gegebenheiten des jeweiligen Fluges, wie bereits in [106] dargestellt. Der Kommunikationsbedarf des Anwendungsfalles ATS wird in Kapitel 6.4.1 beschrieben, der des Anwendungsfalles AOC in Kapitel 6.4.2. Hierbei werden nur die anfallenden Daten auf Anwendungsebene betrachtet. Ein etwaiger sich aus der Datenübertragung im AANET ergebender Datenüberhang wird nicht berücksichtigt. Die für die Ermittlung des Datenkommunikationsbedarfs benötigten Eingabegrößen sowie die ausgegebenen Kennwerte sind in Abbildung 6-10 dargestellt. Hierbei bezeichnet ε ein Kommunikationsereignis, E das kumulierte Datenvolumen aus der Summe der Datengröße aller Kommunikationsereignisse und H die Gesamtanzahl aller Kommunikationsereignisse. Das absolute Kommunikationsdatenvolumen wird durch ρ , die absolute Nachrichtenhäufigkeit durch χ beschrieben, während κ das kumulierte Kommunikationsvolumen und ψ die kumulierte Häufigkeit von Kommunikationsereignissen beschreibt. Ξ und P beschreiben jeweils flächenbezogene Kommunikationshäufigkeit und -volumen.

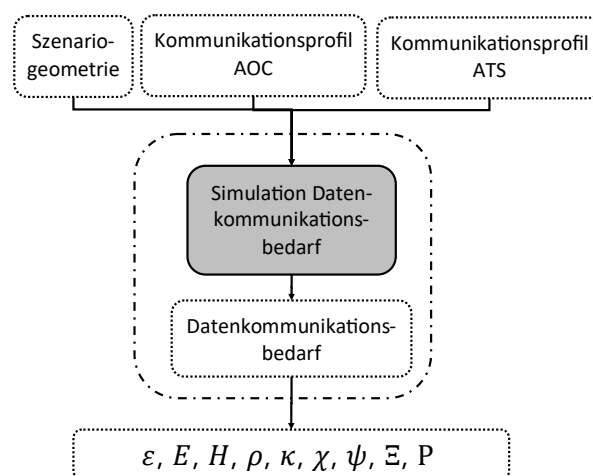


Abbildung 6-10: Detailansicht Datenkommunikationsbedarf

Die Einordnung des hier vorgenommenen Modellierungsansatzes im Vergleich zu bestehenden Luftfahrtkommunikationsmodellen ist in Tabelle 6-3 dargestellt. Wie dort ersichtlich ist, adressieren Modellierungsansätze für die Anwendungsfälle ATS und AOC vorwiegend kontinentale Lufträume und finale Flugphasen inklusive des Betriebs am Flughafen [8, 156–158]. Diese Modelle nutzen den zu diesem Zweck entwickelten gemeinsamen technischen

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

Leitfaden von FAA und EUROCONTROL [57, 129] oder alternativ ergänzend bzw. ausschließlich Daten von Luftfahrtkommunikationsdienstleistern und anderen beteiligten Parteien. Das bestehende Modell [93], welches ozeanischen und abgelegenen Luftraum betrachtet, adressiert ausschließlich Luftfahrtpassagierkommunikation (APC) und nutzt eine synthetische Modellierung des Kommunikationsbedarfs, welche auf die maximale Auslastung des Netzwerkes abzielt.

Tabelle 6-3: Modellübersicht LuftfahrtDatenkommunikation [106]

Referenz	Gräupl et al. [156, 157]	Ehammer et al. [158]	Medina [93]	SESAR [8]	KoSMO [106, 150–152] (hier vorgestellt)
Einsatzbedingung					
Kommunikationskategorie	AOC, ATS	AOC, ATS	APC	AOC, ATS	AOC, ATS
Flugphase	TMA, ENR	APT	ORP	TMA, ENR	ORP
Modellgrundlage					
Technischer Leitfaden [57]	X	X	-	-	X
Beiträge von Interessensparteien	-	X	-	X	-
Technische Standards [121, 119, 120]	-	-	-	-	X
Aufgezeichnete Betriebsdaten [142]	-	-	-	-	X
Synthetische Modellierung	-	-	X	-	-

6.4.1 Flugführungskommunikation

Die Flugführungskommunikation (ATS), wie in Kapitel 4.2 beschrieben, umfasst die Kommunikation zwischen Luftverkehrsteilnehmer und den Leitstellen der Flugsicherung. Um die operationellen Rahmenbedingungen des nordatlantischen ozeanischen Luftraums, welche sich aus den verwendeten Flugdaten ergeben, möglichst genau abbilden zu können, wurden gemäß Tabelle 6-3 die Annahmen des bestehenden technischen Leitfadens [57] um Vorgaben aus technischen Standards und Erkenntnissen aus aufgezeichnetem Datenkommunikationsaufkommen im betrachteten Luftraum ergänzt, wodurch sich ein neues, eigenständiges Simulationsmodell für ATS-Datenkommunikation ergibt. Das tatsächliche ATS-Datenkommunikationsaufkommen im nordatlantischen Luftraum wird zur Überwachung der Servicequalität und Einhaltung von Mindestanforderungen kontinuierlich überwacht und durch das EUR-NAT Büro der ICAO jährlich veröffentlicht. Für das betrachtete Szenario wurde der Bericht für das Jahr 2019 [142] als Grundlage verwendet, um relevante Einzelanwendungen der ATS-Datenkommunikation zu identifizieren. Der Bericht weist die Anzahl der ADS-C Nachrichten und der CPDLC Nachrichten jeweils für das erste und zweite Halbjahr in 2019 aus. Die Modellierung der Flugführungskommunikation konzentriert sich daher

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

auf die Einzelanwendungen ADS-C und CPDLC sowie die notwendigen Grunddienste zur Etablierung des jeweiligen Kommunikationsaustausches gemäß Beschreibung in den zugehörigen technischen Standards [119, 120] und technischem Leitfaden von FAA und EUROCONTROL [57]. Das sich hieraus ergebende Kommunikationsprofil für den Anwendungsfall ATS ist in Tabelle 6-4 dargestellt.

Tabelle 6-4: Kommunikationsprofil ATS [106]

Anwendung	Nachrichten-sequenz	Eintrittswahr-scheinlichkeit	Berichts-intervall	Aktivierungs-ereignis	S_FL [bytes]	S_RL [bytes]
ACM	FL-FL-RL-FL- RL-FL-RL-RL- FL-FL-RL	100%	-	Einflug OCA	34	34
CRD	RL-FL-RL	100%	-	Höhen- änderung (<i>step climb</i>)	186	186
ADS-C: Start	FL-RL	100%	-	Einflug OCA	34	34
ADS-C: periodisch	RL	100%	1 alle 14 min	ADS-C: Start	-	34
ADS-C: Ereignis	RL	100%	-	Überflug Wegpunkt	-	34
ADS-C: Ende	FL-RL	100%	-	Ausflug OCA	34	34

Hierbei sind die Einzelanwendungen bezüglich ihrer Nachrichtensequenz aus vom Luftfahrzeug empfangenen Nachrichten (*forward link*; FL) und vom Luftfahrzeug versendeten Nachrichten (*reverse link*; RL) aufgeschlüsselt und werden mit einem Muster für die Auslösung des jeweiligen Dienstes belegt:

- ❖ Eintrittswahrscheinlichkeit
- ❖ Berichtsintervall
- ❖ Aktivierungsereignis.

Ein Wert von 100% bezeichnet Anwendungsfälle, welche ausschließlich auf einem der intervall- oder ereignisbasiert sind. Als auslösende Ereignisse wurden der Einflug in eine OCA der Austritt aus einer OCA, das Überfliegen von Wegpunkten oder eine vorberechnete effizienzbedingte Höhenänderung (*step climb*) identifiziert. Weiterhin kann ein Anwendungsfall durch einen anderen Anwendungsfall aktiviert werden (Beispiel ADS-C: periodisch). Schließlich werden noch Nachrichtengrößen basierend auf den in [57] gegebenen Werten auf Anwendungsebene definiert. Nachfolgend werden die Einzelanwendungen beschrieben.

ATS Zugangsverwaltung (ATS Context Management, ACM)

Die ATS Zugangsverwaltung stellt sicher, dass ein Luftverkehrsteilnehmer immer mit der für ihn zuständigen Leitstelle der Flugsicherung kommuniziert und schließt aus, dass hinsichtlich sicherheitskritischer CPDLC-Anwendungen gleichzeitig Kommunikationsbeziehungen mit mehreren Leitstellen bestehen. Der Dienst wird aktiv beim Übergang zwischen zwei Kontrollzonen, wobei in der Modellierung eine Vorlaufzeit von 300 s vor dem Übertritt in die neue Kontrollzone berücksichtigt wurde. Dies stellt sicher, dass trotz etwaiger Verzögerung durch Datenübertragung beim wechselseitigen Nachrichtenaustausch bei Eintritt in die neue Kontrollzone eine Verbindung zur neuen Leitstelle etabliert wurde. Es wird erwartet,

dass die Vorlaufzeit in Realität unter anderem auch in Abhängigkeit von lokalen Randbedingungen verschiedene Werte annehmen kann und auch eine Übergabe erst nach Eintritt in eine neue Kontrollzone erfolgen kann. Da hierzu jedoch keine Daten vorlagen, wurde der oben genannte Wert für eine vorgelagerte Übergabe gewählt. Die hierdurch resultierenden Ungenauigkeiten werden als gering angenommen im Vergleich zu weiteren Modellierungsungenauigkeiten, z.B. aufgrund von Vereinfachungen bei der Modellierung der Mobilitätsdaten. Die Nachrichtensequenz wurde entsprechend dem in [120] beschriebenen Ablauf angenommen.

Freigaben (*Clearance Request and Delivery, CRD*)

Sobald eine Verbindung zu einer Leitstelle der Flugsicherung etabliert ist, kann der Luftverkehrsteilnehmer unter Nutzung von CPDLC (Kommunikation über Standardsatz digitaler Textnachrichten) Freigaben zur Änderung des Flugpfades anfragen und entsprechende Vorgaben erhalten. In der Modellierung wird angenommen, dass der Pilot eines Luftfahrzeuges zu jeder vorberechneten Höhenänderung zur Effizienzsteigerung (*step climb*) eine solche Anfrage stellt, von der Flugsicherungsleitstelle eine Freigabe, alternative Vorgabe, oder Ablehnung der Anfrage erhält und abschließend den Erhalt der Antwort bestätigt. Die Übereinstimmung von Höhenänderungen im Streckenflug mit CRD-Kommunikationsereignissen wurde z.B. in [131] gezeigt. Es ergibt sich in Übereinstimmung mit dem in [120] beschriebenen Kommunikationsprofil die in Tabelle 6-4 dargestellte Nachrichtensequenz aus versandten und empfangenen Nachrichten „*RL – FL – RL*“. Die Vorlaufzeit wird mit 200 s angenommen, innerhalb derer eine Freigabe erfolgt sein sollte. Diese Zeitvorgabe liegt innerhalb der 240 s, welche durch die Leistungsanforderungen für die Datenkommunikation vorgegeben werden [115, 120]. In der Realität sind diese Vorlaufzeiten abhängig von den Reaktionszeiten von Pilot und Fluglotse sowie Schwankungen in der Übertragungsdauer, weshalb dieser Wert unter realen Bedingungen ebenfalls einer Schwankung unterliegen dürfte. Es ist weiter davon auszugehen, dass die hierdurch verursachten Ungenauigkeiten zu vernachlässigen sind vor dem Hintergrund von Modellungenauigkeiten in anderen Bereichen. Die Häufigkeit und qualitative zeitliche und geografische Verteilung von CRD-Kommunikationsereignissen sollte von dieser Modellierungsungenauigkeit im Wesentlichen unbeeinflusst sein. Weiterhin wird angenommen, dass alle Luftfahrzeuge die Kommunikation über CPDLC CRD anstelle von Sprechfunk wählen. Dies wird als valide angesehen, da im Betrachtungszeitraum 98% bis 99% der Luftverkehrsteilnehmer, welche die NAT-OCAs unter Nutzung des OTS durchquert haben, CPDLC genutzt haben [142]. Für das Jahr 2021 lagen die Werte hier sogar bereits bei 100% [144]. Für Luftverkehrsteilnehmer, welche die NAT-OCAs außerhalb des OTS durchflogen haben, lagen die Werte bei 86% bis 96% im Jahr 2019 [142], bzw. 91% bis 98% [144] im Jahr 2021. Die OCA BIRD erreicht bei dieser Betrachtung generell deutlich niedrigere Anwenderzahlen für CPDLC.

Initiierung Statusnachrichten (ADS-C: Start)

Die Initiierung von ADS-C Statusnachrichten (ADS-C: Start) ist die Voraussetzung für den Versand von periodischen (ADS-C: periodisch) und ereignisbasierten Statusnachrichten (ADS-C: Ereignis) durch einen Luftverkehrsteilnehmer. Die Initiierung der ADS-C Beziehung besteht aus einer Anfragenachricht einer Flugsicherungsleitstelle und einer Antwort des

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

Luftverkehrsteilnehmers, in welcher dieser entweder die Anfrage bestätigt oder z.B. bei fehlender technischer Befähigung zum Versand von ADS-C Nachrichten verneint. Bei dem Initiierungsvorgang wird zwischen der betreffenden Leitstelle der Flugsicherung und dem Luftverkehrsteilnehmer festgelegt, welche Informationen in welchem Zeitintervall gesendet werden sollen und legt fest, welche Ereignisse zusätzlich das Versenden einer Statusnachricht auslösen. Prinzipiell sind mehrere ADS-C Bezeichnungen zwischen einem Luftverkehrsteilnehmer und verschiedenen Flugsicherungsleitstellen möglich [118, 120]. Zwischen einem Luftverkehrsteilnehmer und einer Flugsicherungsleitstelle kann zu einem Zeitpunkt jedoch nur eine ADS-C Beziehung bestehen [120]. Die Modellierung in KoSMO erfolgt unter der Annahme, dass zu jedem Luftverkehrsteilnehmer in einer Kontrollzone eine ADS-C Beziehung zur betreffenden Flugsicherungsleitstelle besteht. Die ADS-C Beziehung wird dabei mit einem Vorlauf von 30 Minuten vor dem Eintritt in die Kontrollzone aufgebaut, um einer Flugsicherungsleitstelle bereits Informationen über Luftverkehrsteilnehmer durch den Erhalt von bis zu zwei Statusnachrichten zur Verfügung zu stellen, welche zeitnah in ihre Kontrollzone einfliegen werden. Die tatsächlichen Vorlaufzeiten werden dabei abhängig von den prozeduralen Anforderungen der jeweiligen Leitstelle und ggf. technischen Rahmenbedingungen der Datenübertragung variieren. In der Modellierung wirken sich diese Ungenauigkeiten lediglich auf die geografische Verteilung der Kommunikationsereignisse aus, die Anzahl von Kommunikationsereignissen und zugehörigen Einzelnachrichten bleibt davon unberührt.

Periodische Statusnachrichten (ADS-C: periodisch)

Ist eine ADS-C Beziehung etabliert, so teilt der Verkehrsteilnehmer der Leitstelle über regelmäßige ADS-C Statusnachrichten wesentliche Informationen zu seinem aktuellen Zustand mit. Der Zeitabstand zwischen zwei Statusnachrichten wird dabei durch den Wert des Berichtsintervalls aus Tabelle 6-4 mit 14 Minuten beschrieben. Dieser Wert basiert auf den für den NAT ausgewiesenen ADS-C Berichtsintervallen im OTS in den OCAs CZQX und EGGX [56]. Die Statusnachricht besteht aus einer einzelnen Nachricht, welche vom Luftverkehrsteilnehmer an die Flugsicherungsleitstelle versendet wird [120].

Ereignisbasierte Statusnachrichten (ADS-C: Ereignis)

Ereignisbasierte ADS-C Statusnachrichten werden beim Eintreffen von Ereignissen ausgesendet, welche zuvor in der ADS-C Initiierung festgelegt wurden. Generell sind dabei folgende Ereignisse möglich [120]:

- ❖ Abweichung Höhenänderungsrate
- ❖ Wechsel Wegpunkt
- ❖ Laterale Abweichung
- ❖ Änderung Flugfläche
- ❖ Abweichung von Flugfläche
- ❖ Abweichung von Fluggeschwindigkeit
- ❖ Änderung Fluggeschwindigkeit
- ❖ Änderung Geschwindigkeit über Grund
- ❖ Änderung spezifischer Kennzahlen

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

- ❖ Abweichung von Höhenfreigabe
- ❖ Überschreitung Turbulenzwerte
- ❖ Änderung Flugplan

Als weiteres Ereignis kann die Überschreitung der festgelegten Übertragungszeiten für Überwachungsfunktionen hinzugezählt werden. Ist eine periodische Statusnachricht mehr als 180 s verzögert, so wird die Flugsicherungsleitstelle eine gesonderte Statusmeldung anfragen [118] oder den Luftverkehrsteilnehmer über CPDLC ansprechen und schließlich auf Sprechfunk wechseln [159]. Der Ausfall von periodischen Statusnachrichten oder signifikante Abweichungen von vorgegebenen Flugpfad oder Flugfläche sind jedoch mit einer geringen Eintrittswahrscheinlichkeit in der Größenordnung von $1 \cdot 10^{-2}$ bis $1 \cdot 10^{-7}$ pro Flugstunde belegt [147, 159], weshalb die betreffenden Ereignisse bei der Modellierung des Kommunikationsbedarfs in KoSMO nicht berücksichtigt werden. Ebenso wird das Ereignis einer Flugplanänderung aufgrund einer unzureichenden Datenlage nicht berücksichtigt. Lediglich der Wechsel des aktuellen Wegpunktes durch planmäßiges Abfliegen der vorgegebenen Wegpunkte wird als relevantes Ereignis mit gesicherter Eintrittswahrscheinlichkeit betrachtet und im Kommunikationsbedarfsmodell berücksichtigt. Als ereignisauslösende Wegpunkte werden hierbei die Überschreitungen der Längengrade bei 20°W, 30°W, 40°W und 50°W in den OCAs EGGX und CZQX herangezogen, was der Implementierung im OTS entspricht [73].

Beendigung Statusnachrichten (ADS-C: Ende)

Die Beendigung der ADS-C Beziehung zwischen Flugsicherungsleitstelle und Luftverkehrsteilnehmer erfolgt über den Versand einer entsprechenden Nachricht an den Luftverkehrsteilnehmer [120]. Hierbei wird im Rahmen der Modellierung angenommen, dass die Beendigung der Kommunikationsbeziehung 900 s nach Verlassen der betreffenden OCAs erfolgt. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Flugsicherungsleitstelle mindestens einen Statusbericht erhält, der das Verlassen der OCA bestätigt, bevor sie die ADS-C Kommunikationsbeziehung beendet. Entsprechend den Einschränkungen zu zuvor aufgeführten Vorlaufzeiten für Ereignisse, ist auch diese Nachlaufzeit eine Modellannahme, die von den in der Realität erreichten Werten abweichen dürfte. Die Auswirkungen betreffen dabei wiederum die geografische Streuung der Kommunikationsereignisse, während die Anzahl der Kommunikationsereignisse oder Einzelnachrichten nicht betroffen ist.

6.4.2 Operationelle Luftfahrtkommunikation

Die operationelle Luftfahrtkommunikation (AOC) als ökonomisch motivierter Informationsaustausch zwischen dem Operationszentrum einer Luftfahrtgesellschaft und den von ihr betriebenen Luftfahrzeugen ist nicht frei zugänglich und unterliegt keiner Standardisierung wie die Flugführungskommunikation (ATS). Dies hat zur Folge, dass eine Modellierung des AOC-Kommunikationsbedarfs vorwiegend anhand des von FAA und EUROCONTROL entwickelten technischen Leitfadens (FRS-COCR) [57] erfolgt, welcher bereits zahlreichen anderen Arbeiten als Grundlage gedient hat [17, 156–158, 160–165]. Dieser wurde mit öffentlich verfügbaren Informationen zur AOC-Datenkommunikation, wie z.B. [58], abgeglichen. Notwendige Anpassungen an den Vorgaben aus dem FRS-COCR [57] wurden

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

hierbei nicht identifiziert. Eine Besonderheit der Umsetzung in der Simulationsumgebung KoSMO ist die Konzentration auf Anwendungen, welche für den Betrieb im ozeanischen und abgelegenen Luftraum relevant sind entsprechend den Angaben im FRS-COCR [57]. Das resultierende Kommunikationsprofil auf der Basis von [57] für den Anwendungsfall AOC ist in Tabelle 6-5 aufgeführt. Es ist zu beachten, dass die AOC-Kommunikation nicht standardisiert ist und sich das AOC-Kommunikationsprofil in der Realität zwischen einzelnen Luftverkehrsteilnehmern deutlich unterscheiden kann. So können der Umfang und die Ausprägung der enthaltenen Einzelanwendungen bestimmt sein durch den Luftfahrzeughersteller, den Kommunikationsdienstleister, die Luftfahrtgesellschaft oder externe Anbieter.

Dieses lässt sich exemplarisch festmachen an der Ausprägung der Einzelanwendung WXRT, bei welcher ein Luftverkehrsteilnehmer am Flugzeug gemessene Wetterdaten zur Verwendung durch einen meteorologischen Dienst über Luftfahrtdatenkommunikation überträgt [166, 167]. So unterscheidet sich z.B. die Abtastrate für die Datenmessung und die Häufigkeit der Datenübertragung in der Realität je nach Flugphase mit einer gesteigerten Häufigkeit in Steig- und Sinkphasen, da bei der Wetterdatenerfassung insbesondere die Erfassung von vertikalen Messprofilen von Interesse ist [168]. Weiterhin findet nach [168] zudem eine Optimierung der Datenübertragung bei WXRT statt, mit dem Ziel eine möglichst gleichmäßige zeitliche Abdeckung mit Messdaten zu erreichen. Daher kann etwa bei häufig frequentierten Flughäfen oder Flugrouten die Funktion WXRT auf einigen Luftverkehrsteilnehmern deaktiviert werden [166]. Als weitere Einschränkung wird der Dienst in der Praxis teilweise über Regionen deaktiviert, welche nicht von Interesse für den meist nationalen Wetterdienst als Empfänger und Nutzer der Daten sind. Statt einer detaillierten Abbildung dieses Dienstes mit bedingter Auslösung bei Luftverkehrsteilnehmern teilnehmender Fluggesellschaften auf wenig frequentierten Routen und im ausgewählten Regionen findet gemäß FRS-COCR eine pauschale Nutzung der Anwendung auf allen Luftfahrzeugen ohne Berücksichtigung etwaiger Unterschiede nach Flugzeugtyp oder Betreibergesellschaft statt.

Ähnliche Vereinfachungen werden durch das FRS-COCR bei den anderen Einzelanwendungen vorgenommen, wie Wartungsanwendungen (MAINTPR, MAINTRT), Flugplanaktualisierungen (FLTPLAN) oder der Textkommunikation (FREETEXT) mit der operationellen Leitzentrale der Fluggesellschaft. Die getroffenen Vereinfachungen erscheinen sinnvoll, da eine detaillierte möglichst realitätsnahe Nachbildung des AOC-Kommunikationsprofils eine Vielzahl an Variationen und Sonderfällen berücksichtigen müsste. Daher wird an dieser Stelle das pauschalisierte AOC-Kommunikationsprofil des FRS-COCR verwendet, wie in Tabelle 6-5 dargestellt.

Die Einzelanwendungen in Tabelle 6-5 beschreiben aus Luftfahrtsicht folgende Funktionen:

- ❖ **FLTPLAN:** Empfang Flugplandaten
- ❖ **FLTSTAT:** Versand einer Flugstatusnachricht
- ❖ **FREETEXT:** Empfang und Versand einer Freitextnachricht
- ❖ **FUEL:** Versand einer Treibstoffstatusnachricht
- ❖ **MAINTPR:** Lösung eines Wartungsproblems
- ❖ **NOTAM:** Abrufen von NOTAMs

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

- ❖ **POSRPT**: Versende Positionsbericht
- ❖ **WXGRAPH**: Abrufen von Wetterkarte
- ❖ **WXRT**: Versand Wetterdaten
- ❖ **WXTEXT**: Abfrage Wetterbericht
- ❖ **ENGINE**: Versand Triebwerksdaten
- ❖ **MAINTRT**: Versand Wartungsdaten

Tabelle 6-5: Kommunikationsprofil AOC [106]

Anwendung	Nachrichten-sequenz	Eintrittswahr-scheinlichkeit	Berichts-intervall	Aktivierungs-ereignis	S_FL [bytes]	S_RL [bytes]
FLTPLAN	9xFL-RL	100%	1 in 4 h	-	968	92
FLTSTAT	RL	100%	1 in 4 h	-	-	157
FREETEXT	FL-RL	100%	2 in 4 h	-	377	377
FUEL	3xRL	100%	2 in 4 h	-	-	127
MAINTPR	4x(FL-RL)	5%	1 in 4 h	-	233	233
NOTAM	RL-4xFL-RL	100%	2 in 4 h	-	287	134
POSRPT	RL-FL	100%	1 alle 15 min	-	88	338
WXGRAPH	5x(RL-FL)-RL	100%	1 alle 40 min	-	21077	93
WXRT	RL	100%	1 alle 3 min	-	-	103
WXTEXT	5x(RL-FL)-RL	100%	2 in 4 h	-	680	103
ENGINE	2x(RL-FL)	100%	-	Ende Steigphase Eintritt Sinkflug	727	88
MAINTRT	5x(FL-RL)	100%	2 in 4 h	-	88	127

Mit Ausnahme von MAINTPR mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 5% pro Flug kommen alle Einzelanwendungen bei jedem Flug zum Tragen. Ein Charakteristikum des AOC-Kommunikationsprofils ist die zufällige Auslösung der Einzelanwendungen über den gesamten Flugzeitraum, welche gleichverteilt in ein- oder zweimal in einem Vierstundenintervall erfolgt (1 in 4 h, 2 in 4 h). Dies trifft auf alle Anwendungen zu, mit Ausnahme der periodisch ausgelösten Anwendungen POSRPT, WXGRAPH und WXRT mit einer Auslösefrequenz von jeweils 15, 40 und 3 Minuten. und der ereignisbasiert zum Ende des Steigflugs und Beginn des Sinkflugs ausgelösten Anwendung ENGINE. Ein besonderes Augenmerk kann hier auf die Datengrößen der ein- und ausgehenden Nachrichten (S_FL, S_RL) gelegt werden, welche einer deutlich größeren Streuung unterliegen und wesentlich höhere Werte erreichen als dies bei dem ATS-Kommunikationsprofil aus Kapitel 6.4.1 der Fall ist. Insbesondere fällt die besondere Größe der beim Luftfahrzeug eingehenden Nachrichten (S_FL) der Einzelanwendung WXGRAPH auf, welche ein um mehr als das 20-fache größeres Datenvolumen besitzt als die zweitgrößte Nachricht. Um diese zufällige Variation im AOC-Kommunikationsverhalten abzubilden, werden für jede der in Kapitel 6.3 beschriebenen 2.810 Konnektivitätskonfigurationen 10 gemäß Tabelle 6-5 variierte Datenkommunikationsprofile berücksichtigt.

6.4.3 Nachrichtenintervalle

Die Kommunikationsprofile für ATS und AOC aus Kapitel 6.4.1 und Kapitel 6.4.2 beschreiben für jede Einzelanwendung eine gesonderte Sequenz an Einzelnachrichten. Das Modell für den Datenkommunikationsbedarf liefert jedoch initial nur einen Datensatz mit

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

zeitreferenzierten Aktivierungen der Einzelanwendungen sowie Referenzierung auf das betroffene Luftfahrzeug. Um einen Datensatz mit Einzelnachrichten als Einträgen zu generieren ist die Annahme eines Zeitabstandes zwischen den Einzelnachrichten notwendig. Dieser repräsentiert idealerweise die sich aus Übertragungslatenzen und Reaktionszeiten von Avionik und ggf. Bediener des antwortenden Systems ergebene zeitliche Verzögerung. Da derartige Werte im Rahmen des hier verfolgten technisch-operationellen Ansatzes nicht belastbar zur Verfügung stehen und eine detailliertere Betrachtung auf kommunikationstechnischer Ebene auf die Ergebnisse dieser Arbeit bzgl. auslegungsrelevanter Kernparameter angewiesen ist, muss an dieser Stelle eine Vorwegnahme einer Schätzung der Latenzzeit d_t zwischen zwei Einzelnachrichten einer Anwendung erfolgen. Die Latenzzeit d_t wird dabei zu 0,1 s angenommen. Angesichts der zeitlichen diskreten Auflösung der Simulation und Berechnung von 1 s bewirkt diese Latenzzeit eine Verschiebung einzelner Kommunikationsereignisse in lediglich das nächste Zeitintervall. Der Wert stellt einen Platzhalter dar und ermöglicht u.a. die spätere Berechnung von initialen Datenübertragungsraten und kann als Platzhalter dienen, sobald detailliertere Modelle für die Netzwerk- und Datenlinkebene unter Verwendung der in dieser Arbeit identifizierten technisch-operationellen Anforderungen zur Verfügung stehen. Abbildung 6-11 zeigt die Bedeutung von d_t exemplarisch an der ATS-Einzelanwendung CRD.

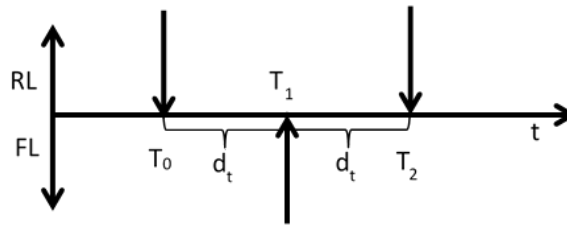


Abbildung 6-11: Zeitabstände zwischen Einzelnachrichten am Beispiel CRD [150]

Die Anwendung CRD beginnt mit einer Nachricht, welche eine Freigabeanfrage enthält, ausgehend vom Luftfahrzeug an die Flugsicherungsleitstelle am Boden. Diese Kommunikationsrichtung wird als *reverse link* (RL) bezeichnet. Als Antwort erhält das Luftfahrzeug eine Nachricht von der Flugsicherungsleitstelle, welche die Freigabe einer Flugpfadänderung oder die Verweigerung derselben enthält. Die betreffende Kommunikationsrichtung wird als *forward link* (FL) bezeichnet. Abschließend bestätigt der Luftfahrzeugführer den Erhalt der Nachricht und das Befolgen der darin enthaltenen Anweisungen. Zwischen zwei aufeinanderfolgenden Nachrichten wird jeweils die beschriebene Latenzzeit d_t angenommen. Daraus ergeben sich drei verschiedene Zeitpunkte T_0 , T_1 und T_2 für die drei Einzelnachrichten.

6.4.4 Definitionen

Das Datenvolumen in *bit* eines Kommunikationsereignisses ε im Zusammenhang mit einem Anwendungsfall UC zu einem Zeitpunkt t und auf ein Luftfahrzeug AC mit der laufenden Nummer i bezogen, wird beschrieben durch

$$\varepsilon_{AC,i}^{UC}(t) [bit] \quad (33)$$

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

Das Datenvolumen E in *bit* aller Kommunikationsereignisse ε eines Anwendungsfalles UC in Bezug auf ein Luftfahrzeug AC mit der Nummer i , die in einem Zeitschritt t mit der Dauer Δt übertragen werden, ergibt sich aus

$$E_{AC,i}^{UC}(t) = \sum \varepsilon_{AC,i}^{UC}(t), t - \frac{\Delta t}{2} \leq t < t + \frac{\Delta t}{2} \quad (34)$$

Die Häufigkeit H an Kommunikationsereignissen eines Anwendungsfalles UC in Bezug auf ein Luftfahrzeug AC mit der Nummer i , die in einem Zeitschritt t mit der Dauer Δt übertragen werden, ist die Mächtigkeit der Menge an Kommunikationsereignissen während des Zeitschrittes $S_\varepsilon(t)$.

$$H_{AC,i}^{UC}(t) = |S_{\varepsilon,AC,i}^{UC}(t)|, t - \frac{\Delta t}{2} \leq t < t + \frac{\Delta t}{2} \quad (35)$$

Das Gesamtkommunikationsvolumen über die Simulationsdauer in Bezug auf einen Anwendungsfall UC ergibt sich aus der Summe der Datenvolumen je Zeitschritt t über alle Luftfahrzeuge in diesem Zeitschritt.

$$E^{UC} = \sum_t \sum_i E_{AC,i}^{UC}(t) \quad (36)$$

Analog dazu ergibt sich das Gesamtkommunikationsaufkommen als Gesamtzahl der Kommunikationsereignisse eines Anwendungsfalles UC zu

$$H^{UC} = \sum_t \sum_i H_{AC,i}^{UC}(t) \quad (37)$$

Das absolute Kommunikationsdatenvolumen $\rho(x)$ beschreibt das Gesamtdatenvolumen, welches auf Nachrichtentypen bestimmter Datengröße x entfällt. $G(\varepsilon)$ beschreibt dabei das Datenvolumen eines Kommunikationsereignisses ε .

$$\rho^{UC}(x) = \sum_t \sum_i \varepsilon_{AC,i}^{UC}(t) \forall G(\varepsilon) = x \quad (38)$$

Das kumulierte Kommunikationsvolumen $\kappa^{UC}(x)$ eines Anwendungsfalles UC beschreibt entsprechend das kumulierte Datenvolumen aller Nachrichten bis zur Größe x normiert mit dem Gesamtkommunikationsvolumen E^{UC} .

$$\kappa^{UC}(x) = \frac{1}{E^{UC}} \sum_1^x \rho^{UC}(x) \quad (39)$$

Die absolute Nachrichtenhäufigkeit χ^{UC} von Nachrichten der Größe x wird ähnlich dem absoluten Kommunikationsdatenvolumen aus der Häufigkeit an Kommunikationsereignissen H (siehe Formel (35)) berechnet, welche auf die jeweiligen Nachrichten der

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

vorgegebenen Größe eingeschränkt wird. Hierbei beschreibt $S_{\varepsilon,AC,i}^{UC}(t)$ die Menge der Nachrichten eines Anwendungsfalles UC eines Luftfahrzeugs i zum Zeitpunkt t .

$$\chi^{UC}(x) = \sum_t \sum_i |S_{\varepsilon,AC,i}^{UC}(t)|, \forall G(\varepsilon) = x \quad (40)$$

Die kumulierte Nachrichtenhäufigkeit ψ^{UC} über die Nachrichtengröße x wird über die Gesamtzahl der im Simulationszeitraum angefallenen Nachrichten H^{UC} normiert und berechnet sich nach

$$\psi^{UC}(x) = \frac{1}{H^{UC}} \sum_1^x \chi^{UC}(x) \quad (41)$$

Die flächenbezogene Kommunikationshäufigkeit $\Xi^{UC}(K_1, K_2)$ beschreibt die durchschnittliche Anzahl an Nachrichten des Anwendungsfalles UC im durch die Punkte $K_1: [x, y]$ und $K_2: [x, y]$ aufgespannten Rechteck mit Kanten entlang von Längen- und Breitengraden und der Fläche R pro Quadratkilometer $[km^2]$. $S_{\varepsilon, K_1 K_2}^{UC}$ beschreibt hierbei die Menge an Kommunikationsereignissen in Zusammenhang mit Anwendungsfall UC im beschriebenen Rechteck.

$$\Xi^{UC}(K_1, K_2) = \frac{|S_{\varepsilon, K_1 K_2}^{UC}|}{R} \quad (42)$$

Das flächenbezogene Kommunikationsvolumen $P^{UC}(K_1, K_2)$ beschreibt das mittlere Datenvolumen pro Quadratkilometer in $\left[\frac{bit}{km^2}\right]$ in Zusammenhang mit Kommunikationsereignissen aufgrund eines Anwendungsfalles UC im durch die Punkte K_1 und K_2 aufgespannten Rechteck mit Kanten entlang von Längen- und Breitengraden. $\sum \varepsilon_{K_1 K_2}^{UC}$ beschreibt in diesem Zusammenhang die Summe des Datenvolumens aller Kommunikationsereignisse in Verbindung mit Anwendungsfall UC im beschriebenen Rechteck. Die Fläche des Rechtecks in km^2 wird beschrieben durch R .

$$P^{UC}(K_1, K_2) = \frac{\sum \varepsilon_{P_1 P_2}^{UC}}{R} \quad (43)$$

Mit den in diesem Kapitel definierten Kennwerten ist eine szenariobezogene Charakterisierung des Kommunikationsbedarfs möglich. So kann der Kommunikationsbedarf gesamt, oder aufgeschlüsselt nach den Anwendungsfällen ATS und AOC hinsichtlich dem Datenvolumen als auch der Nachrichtenhäufigkeit erfasst werden. Weiterhin ermöglichen die Kennwerte die Darstellung von Anteilen bestimmter Einzelanwendungen am Gesamtaufkommen von Kommunikationsereignissen und Datenvolumen. Die flächenbezogenen Kennziffern ermöglichen zudem eine geographische Verortung des Kommunikationsbedarfs. Die Ergebnisse zu den Kennwerten sind in Kapitel 7.2 aufgeführt.

6.5 Kommunikationsbedarfsabdeckung

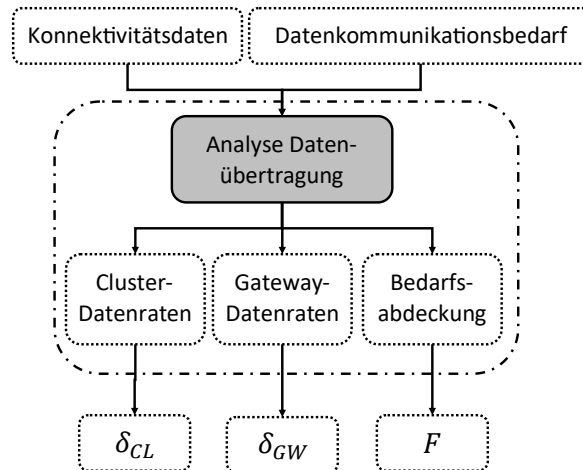


Abbildung 6-12: Detail Datenübertragungsanalyse

Der zentrale Nutzwert der LDACS A2A Datenlinktechnologie liegt in der Kommunikationsbedarfsabdeckung für den Luftverkehr im definierten Szenario. Diese resultiert aus der räumlichen und zeitlichen Verteilung des ATS und AOC Kommunikationsbedarfs und der Verfügbarkeit einer Verbindung über das durch LDACS A2A aufgespannte AANET. Dieser dimensionslose Kennwert kann Werte im Bereich von 0 für eine nicht vorhandene bis 1 für eine vollständige Kommunikationsbedarfsabdeckung belegen.

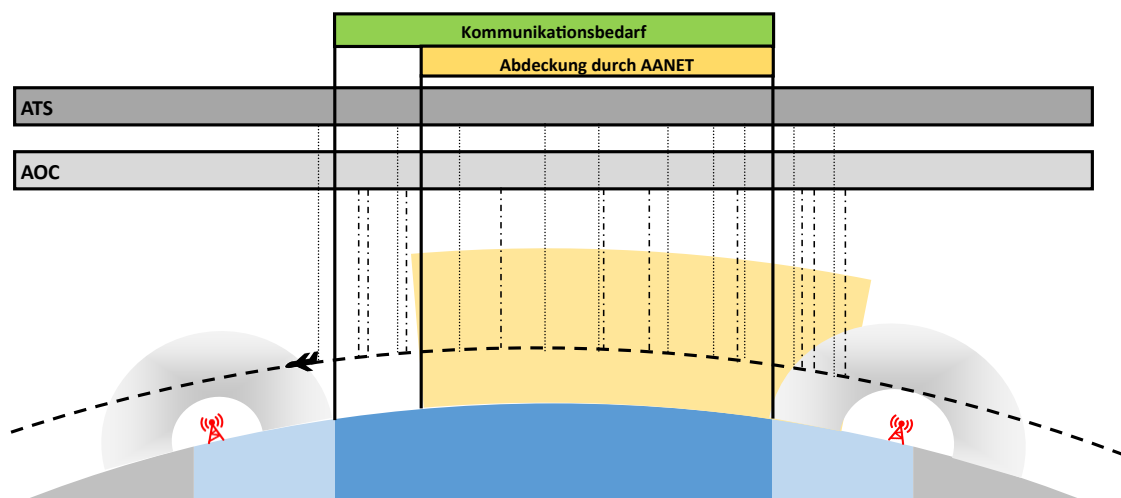


Abbildung 6-13: Schematische Kommunikationsbedarfsabdeckung durch das AANET

In Abbildung 6-13 ist dazu schematisch der Kommunikationsbedarf aus ATS und AOC-Anwendungen bei einem Atlantiküberflug sowie der durch ein AANET abgedeckte Anteil dieses Kommunikationsbedarfs schematisch dargestellt. Der Kommunikationsbedarf umfasst den gesamten Teil der Kommunikationsereignisse ε aus den betrachteten Anwendungsfällen ATS und AOC innerhalb des Simulationsbereiches, während der abgedeckte Kommunikationsbedarf nur den Teil der Kommunikationsereignisse umfasst, welche innerhalb die zeitliche und räumliche Abdeckung durch das AANET fallen. Die Definition der

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

Kommunikationsbedarfsabdeckung wird in Kapitel 6.5.2 gegeben. Eine Detailübersicht über die Analyse der Datenübertragung mit Zuordnung der berechneten und nachfolgend beschriebenen Kenngrößen wird in Abbildung 6-12 gegeben.

Eine weitere zentrale Kenngröße für das entstehende LDACS A2A AANET sind die zu erwartenden Datenraten, welche sich aus der durch das AANET übertragenen Kommunikation ergeben. Hierbei wird unterschieden zwischen Datenraten an einzelnen Luftfahrzeugen, $\delta_{AC,i}(t)$, Datenraten im gesamten *Cluster* an über das AANET verbundenen Luftfahrzeugen, $\delta_{CL,j}(t)$, sowie den Datenraten $\delta_{GW,k}(t)$ an den *Gateways*, welche das *Cluster* über Bodenstationen an das Bodennetz anbinden. Der Bezug zu den einzelnen Komponenten im AANET ist in Abbildung 6-14 für die genannten Datenraten dargestellt und eine Definition der Datenraten und zugrunde liegender Kenngrößen wird in Kapitel 6.5.2 gegeben.

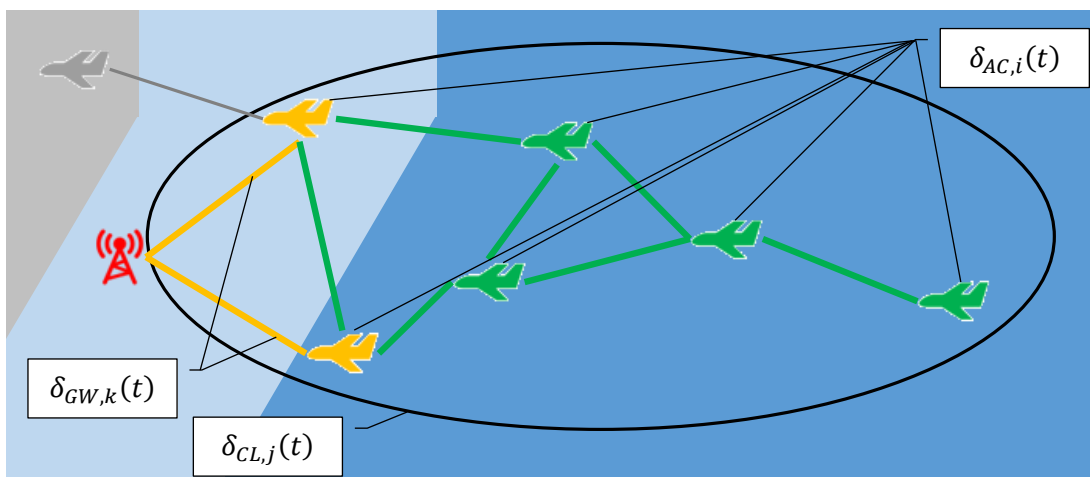


Abbildung 6-14: Übersicht aggregierte Datenraten im AANET

Hierbei ist zu beachten, dass $\delta_{AC,i}$ den Eintrag an Datenkommunikation eines Luftfahrzeuges i in dem verbundenen *Cluster* beschreibt, während $\delta_{CL,j}$ die kumulierte Datenkommunikation aller im *Cluster* j verbundenen Luftfahrzeuge umfasst. Für den Fall, dass nur ein Luftfahrzeug als *Gateway* dient, entspricht $\delta_{CL,j}$ der Datenrate δ_{GW} an der Datenlinkverbindung zwischen dem *Gateway*-Luftfahrzeug und der Bodenstation. Es ist dabei zu beachten, dass diese Datenlinkverbindung eine A2G-Verbindung ist und somit nicht in den Bereich der LDACS A2A Abdeckung fällt. Eine Berücksichtigung von $\delta_{GW,k}$ für den A2A-Datenlink impliziert somit die Annahme des ungünstigsten Falls, dass ein *Gateway*-Luftfahrzeug nur über eine A2A-Verbindung mit dem Rest des *Clusters* verbunden ist. Dies würde in Abbildung 6-14 bei Wegfall der A2A-Verbindung zwischen den beiden gelb markierten *Gateway*-Luftfahrzeugen zutreffen. Die Nutzung von δ_{GW} als Kernauslegungsparameter für die erforderliche Datenübertragungsrate des A2A-Datenlinks stellt somit eine konservative Abschätzung dar.

6.5.1 Zeitkontinuierliche Cluster

Die Identifizierung von *Clustern* auf Basis der Vernetzung der Luftfahrzeuge untereinander im Konnektivitätsmodell (Kapitel 6.3.2) erfolgt für jeden Zeitschritt individuell. Daraus ergeben sich in der Betrachtung der Abdeckung des Kommunikationsbedarfs und der

Abbildung der kontinuierlichen Zeitserien für Einzelnachrichten der Datenkommunikation gemäß Kapitel 6.4 auf die gewählte diskrete Zeitschrittgröße von 60 s Ungenauigkeiten bei der Zuordnung von Einzelnachrichten zu einem *Cluster* kommen. Ebenso ist in diesem Fall eine zeitkontinuierliche Auswertung des Datenkommunikationsaufkommens in einem *Cluster* nicht möglich. Daher werden den *Clustern* der Konnektivitätsmodellierung für die Berechnung der Abdeckung des Datenkommunikationsbedarfs zeitkontinuierliche Identifikationsmarkierung k hinzugefügt. Hierbei werden die *Cluster* aus zwei aufeinanderfolgenden Zeitschritten als identisch angesehen, wenn die Mehrzahl der Gateway-Luftfahrzeuge identisch ist. *Cluster*, die sich nach dieser Maßgabe neu formen oder in mehrere *Cluster* zerfallen, erhalten eine neue Identifikationsmarkierung k . *Cluster* ohne Gateways und damit ohne Bodenkonnektivität erhalten keine Identifikationsmarkierung und werden in der weiteren Betrachtung nicht berücksichtigt.

6.5.2 Abdeckung des Kommunikationsbedarfs

Der Gesamtkommunikationsbedarf C beschreibt ein Datenvolumen in $[bit]$ und ergibt sich aus der Summe aller Einzelkommunikationsereignisse von Luftfahrzeugen ε_{AC} im gesamten Simulationszeitraum, welche nicht über eine direkte Luft-Boden-Verbindung verfügen. $S_{A2G}(t)$ beschreibt dabei bezogen auf den jeweiligen Zeitschritt t die Menge an Luftfahrzeugen mit direkter Luft-Boden-Verbindung.

$$C = \sum_t \sum_i \varepsilon_{AC,i}(t) = E^{ATS} + E^{AOC}, i \notin S_{A2G}(t) \quad (44)$$

Das Kommunikationsdatenvolumen in $[bit]$, welches durch das untersuchte LDACS AANET auf Grundlage der in Kapitel 6.3 beschriebenen Konnektivität übertragen werden kann, wird durch T beschrieben. T ergibt sich aus der Summe der in *Clustern* übertragenen Daten $\delta_{CL} \cdot \Delta t$ abzüglich der Summe der Datenmenge aus Kommunikationsereignissen ε_{AC} , welche auf Gateway-Luftfahrzeuge aus der Menge $S_{GW}(j, t)$ entfallen.

$$T = \sum_j \sum_t \delta_{CL}(t) \cdot \Delta t - \sum_t \sum_i \varepsilon_{AC,i}(t), i \in S_{GW}(j, t) \quad (45)$$

Die bereits in Kapitel 4.4 als Nutzwert identifizierte Kommunikationsbedarfsabdeckung F entspricht dem Verhältnis von übertragenem Datenvolumen T zum Gesamtkommunikationsbedarf C . Diese Kennziffer beschreibt zu welchem Anteil das Kommunikationsdatenaufkommen, welches sich bisher außerhalb der Reichweite von bodengestützten Kommunikationsmitteln befindet, über ein AANET übertragen werden kann.

$$F = \frac{T}{C} \quad (46)$$

6.5.3 Konnektivitätsbedingte Datenraten

In Hinblick auf die Ermittlung konnektivitätsbedingter Datenraten, ist zunächst die Ermittlung einer Datenrate für jedes Luftfahrzeug im Simulationsbereich erforderlich. Dazu

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

wird für jeden diskreten Zeitschritt t mit der Zeitschrittgröße Δt eine auf einen Anwendungsfall UC bezogene Datenrate $\delta_{AC,i}^{UC}(t)$ aus der Summe der Einzelkommunikationsereignisse $\varepsilon_{AC,i}^{UC}$ im betreffenden Zeitschritt berechnet. Möglicher Datenüberhang aufgrund von Kommunikation, welche im Rahmen der Datenübertragung selbst anfällt wird hierbei nicht berücksichtigt.

$$\delta_{AC,i}^{UC}(t) = \frac{1}{\Delta t} \sum \varepsilon_{AC,i}^{UC}(t), t - \frac{\Delta t}{2} \leq t < t + \frac{\Delta t}{2} \quad (47)$$

Die Gesamtdatenrate $\delta_{AC,i}$ eines Luftfahrzeuges i in einem Zeitschritt t berechnet sich aus der Summe der anwendungsfallbezogenen Datenraten dieses Zeitschrittes. Im betrachteten Szenario sind dies die Anwendungsfälle ATS und AOC .

$$\delta_{AC,i}(t) = \delta_{AC,i}^{ATS}(t) + \delta_{AC,i}^{AOC}(t) \quad (48)$$

In Bezug auf die in Kapitel 6.3 beschriebene Konnektivität, lässt sich die Gesamtdatenrate $\delta_{CL,j}(t)$ in einem vernetzten *Cluster* j zum Zeitpunkt t als Summe aller Datenraten von Luftfahrzeugen beschreiben, welche in diesem Zeitschritt über das *Cluster* j vernetzt sind. Die Menge an Luftfahrzeugen, welche zum Zeitschritt t Teil des *Clusters* j sind wird dabei durch $S_{CL}(j, t)$ beschrieben.

$$\delta_{CL,j}(t) = \sum_i \delta_{AC,i}(t), \forall i \in S_{CL}(j, t) \quad (49)$$

Aufbauend auf $\delta_{CL,j}(t)$ lässt sich die Datenrate $\delta_{GW,k}(t)$ an einem *Gateway*-Luftfahrzeug k berechnen. Hierbei beschreibt $S_{GW}(j, t)$ die Menge der *Gateway*-Luftfahrzeuge im *Cluster* j im Zeitschritt t . In der untenstehenden Berechnungsvorschrift wird angenommen, dass sich die Datenkommunikation zu gleichen Teilen auf alle *Gateway*-Luftfahrzeuge verteilt, welche im betreffenden Zeitschritt im *Cluster* vorhanden sind.

$$\delta_{GW,k}(t) = \frac{\delta_{CL,j}(t)}{|S_{GW}(j, t)|}, k \in S_{GW}(j, t) \quad (50)$$

6.6 Modellverifikation

Die Modellierung von Luftverkehr, Konnektivität, Datenkommunikationsbedarf und Datenübertragung, bzw. Bedarfsabdeckung, wie in Abbildung 6-1 dargestellt, wurden einer Reihe von Verifikationstests nach den Maßgaben wissenschaftlicher Software-Entwicklung unterzogen (vgl. z.B. [169]). Diese sollen sicherstellen, dass das implementierte Modell die beabsichtigten Funktionen und Effekte korrekt umsetzt und reproduzierbare Ergebnisse erzeugt. Hierbei wird bei verwendeten bestehenden Modellen auf eine erneute Verifikation der Funktionalität verzichtet. Dies betrifft insbesondere die Berechnung der Mobilitäts- bzw. Trajektoriendaten aus Flugplandaten mit Hilfe des *Trajectory Calculation Module* [148] entsprechend der Beschreibung in Kapitel 6.2.

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

Die Flugbewegungs- und Konnektivitätssimulation entsprechend 1) und 2) in Abbildung 6-1 wie in [151, 152] beschrieben, wurde im Rahmen des Projekts IntAirNet [86] durch die folgenden Tests verifiziert:

- ❖ Überprüfung der Korrektheit der Koordinatentransformation von WGS84 Koordinaten zu einem geozentrischen Koordinatensystem (*earth-centered, earth-fixed*; ECEF)
- ❖ Verifikation der Berechnung von Zwischenpunkten auf Geodäten durch Vergleich der Berechnung in WGS-84 und ECEF-Koordinaten
- ❖ Visuelle Überprüfung der Interpolation der OCA-Grenzen aus geoJSON-Daten mit WGS84 Koordinaten und auf Kugeloberfläche (ECEF) auf Schließung der Polygonkanten und Interpolation der Großkreise.
- ❖ Verifikation der korrekten Berechnung der Abstände von Einzelpositionen der Flugtrajektorien zu den OCA-Grenzen durch visuellen Abgleich von Flugdaten innerhalb und außerhalb der OCA-Grenzen mit den OCA-Geometrien.
- ❖ Überprüfung der Aufteilung des nordatlantischen Luftverkehrs in west- und ostgerichteten Flugverkehr anhand der Filterung nach Start- und Zielflughafen durch Visualisierung im Zeitverlauf.
- ❖ Überprüfung der Funktion zur Berechnung der Sichtbarkeit zweier Luftfahrzeuge unter Berücksichtigung der Erdkrümmung durch Betrachtung zweier zeitgleicher Flüge in direkter Nachbarschaft mit festgelegten Flughöhen und Flughöhenvariation.
- ❖ Überprüfung der Verbindungsdauern im Vergleich mit und ohne Reduzierung der Trajektoriendaten auf den Simulationsbereich der OCAs.
- ❖ Prüfung auf Normalverteilung für Anzahl der Flugminuten ohne Bodenverbindung.

Für die Modellierung des Datenkommunikationsbedarfs und der Datenübertragung, bzw. Bedarfsabdeckung, entsprechend 3) und 4) in Abbildung 6-1 wurden die folgenden Verifikationstests unternommen:

- ❖ Prüfung der korrekten Ermittlung des Kommunikationsbedarfes für stichpunktartig ausgewählte Flüge durch Visualisierung der Auslösungspositionen (siehe Abbildung 6-15). Weiterhin Sicherstellung, dass alle Nachrichten innerhalb des Simulationsbereiches sind und die Nachrichtenanzahl plausibel gemäß der in Kapitel 6.4 beschriebenen Definition ist, durch Visualisierung des Gesamtnachrichtenaufkommens nach einzelnen Anwendungen. Kriterien für die Prüfung waren die korrekte, plausible zeitliche und räumliche Aktivierung aller definierten Dienste innerhalb der OCAs an Wegmarken, bei Höhenänderungen, Beginn und Ende der Horizontalflugphase mit einmaliger oder periodische Auslösung.
- ❖ Prüfung der Verteilung der Variation der Kommunikationsbedarfsabdeckung F über Ausstattungsvariation und Kommunikationsvariation und Feststellung der Gleichverteilung als geeignetste Darstellung (siehe Darstellung von F mit Konfidenzintervallen in Abbildung A-11).
- ❖ Prüfung der Verteilung der Variation der Gateway-Datenrate δ_{GW} über Ausstattungsvariation und Kommunikationsvariation und Feststellung der Normalverteilung als geeignetste Darstellung (siehe Darstellung von δ_{GW} mit Konfidenzintervallen in Abbildung A-12).

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

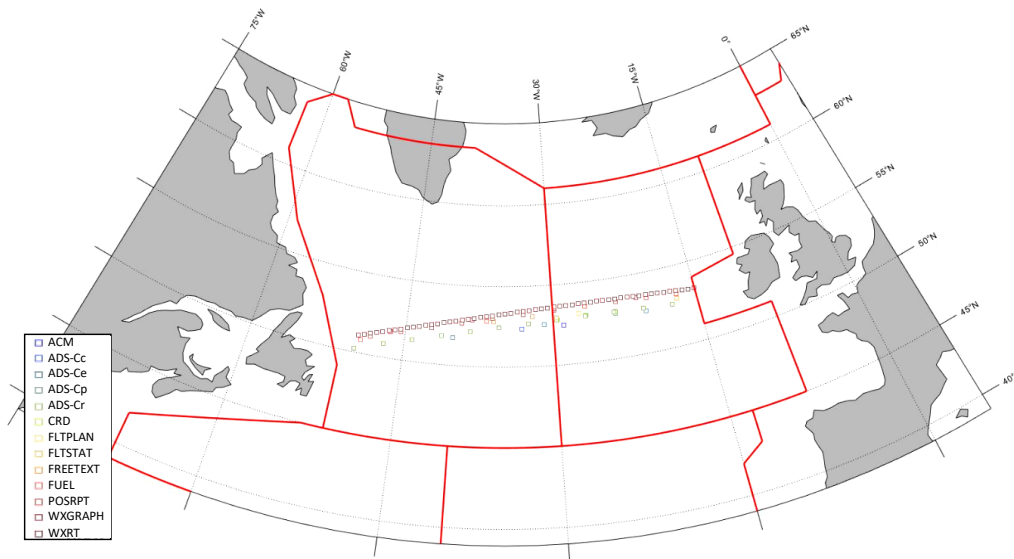


Abbildung 6-15: Prüfung Datenkommunikationsverlauf Einzelflug

6.7 Modellvalidierung

Grundsätzlich unterliegt eine Validierung des Kommunikationsbedarfsmodells aufgrund der nur begrenzt verfügbaren Informationen zum tatsächlichen Datenkommunikation und der daher erfolgten Abstützung auf bestehenden Modellen, technischen Standards und einem technischen Leitfaden (vgl. Tabelle 6-3) erheblichen Einschränkungen. Dies betrifft insbesondere die AOC-Datenkommunikation, bei welcher jedoch im Wesentlichen auf das bestehende Modell des FRS-COCR zurückgegriffen wurde. Eine teilweise Validierung für die ATS-Datenkommunikation und dem vorgestellten eigenständige, neuen Modell wird ermöglicht durch die Leistungsüberwachung der Datenkommunikation im NAT-Luftraum, welche durch die in der Verbindungsstelle ICAO-NAT zusammengeschlossenen Flugsicherungsbehörden durchgeführt wird und jährlich berichtet wird [106]. Für das untersuchte Szenario ist der Bericht für das Jahr 2019 relevant [142]. Dieser weist auf halbjährlicher Basis die Anzahl der Einzelnachrichten aus, welche auf ADS-B und CPDLC entfallen und schlüsselt diese auf die einzelnen ozeanischen Kontrollzonen auf. Weiterhin wird für jede OCA auf monatlicher Basis die Anzahl der Flüge angegeben, welche diese OCA kreuzen. Daraus lassen sich halbjährliche Durchschnittswerte für die Anzahl an ADS-C und CPDLC Nachrichten errechnen, welches ein Luftfahrzeug beim Durchflug durch einen NAT-OCA im Mittel erhält oder versendet. Entsprechend des in Kapitel 6.4.1 beschriebenen Kommunikationsprofils entspricht CPDLC hier der ATS Einzelanwendung CRD. Die auf diese Weise errechneten Werte sind in Tabelle 6-6 und Tabelle 6-7 jeweils in der Spalte ‚ICAO-NAT‘ unter der durchschnittlichen Anzahl an ADS-C oder CPDLC-Nachrichten pro Flug ausgewiesen. Für die OCA ENOB werden in [142] keine Daten ausgewiesen, weshalb hierzu keine durchschnittliche Nachrichtenzahl ermittelt werden kann. Die Spalte ‚Simulation‘ enthält die jeweiligen Simulationsergebnisse unter Nutzung des Mobilitätsdatensatzes NAT 2019 B.

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

Auf diese Weise kann keine Validierung zu dem in [142] nicht enthaltenen Einzeldienst ACM erfolgen. Eine Validierung von AOC Einzelanwendungen erfolgt ebenfalls nicht, da im Rahmen der Arbeit keine Leistungsüberwachungsdaten für diesen Anwendungsfall zur Verfügung standen. Zudem geht das zugrunde liegende Szenario davon aus, dass die Kommunikation ausschließlich über Datenlink erfolgt, konventionelle Kommunikation über Kurzwelle (HF) und Ultrakurzwelle (VHF), welche im NAT in Teilen ebenfalls eine Rolle spielt [170] wird nicht berücksichtigt. Dies kann sich insbesondere in OCAs auswirken, in denen die Kommunikation noch weitgehend auf konventionellem Sprechfunk basiert. In diesen wird durch das KoSMO-Simulationsmodell das Datenkommunikationsaufkommen höher eingeschätzt als tatsächlich vorhanden. Ebenfalls werden die Validierungsergebnisse beeinflusst durch die Reduktion des Simulationsbereiches auf den Anteil der NAT-OCAs oberhalb von 39 ° nördlicher Breite, weshalb die beiden südlichen OCAs KZWY und LPPO in der Simulation nur zu einem Teil berücksichtigt werden und das Datenkommunikationsaufkommen entsprechend deutlich unter dem Aufkommen in den Leistungsüberwachungsdaten liegt.

Tabelle 6-6: Validierung der ADS-C Nachrichtenhäufigkeit [106]

OCA	Durchschnittliche Anzahl ADS-C Nachrichten pro Flug [-]		Abweichung [-]
	ICAO-NAT	Simulation	
EGGX	10.60	9.93	-0.67
CZQX	12.94	13.00	+0.06
BIRD	10.93	10.87	+0.48
LPPO	20.59	9.83	-10.77
KZWY	38.38	7.30	-31.07
ENOB	-	2.94	-

Der Vergleich der ADS-C Nachrichtenhäufigkeit je Flug mit den Daten der Leistungsüberwachung der Datenkommunikation durch die ICAO [142] in Tabelle 6-6 zeigt die erwarteten starken Abweichungen in den in der Simulation nur teilweise abgebildeten OCAs KZWY und LPPO. Bzgl. der Nachrichtenhäufigkeit für die OCAs EGGX, CZQX und BIRD liefert die Simulation den reellen Daten ähnliche Ergebnisse. Die geringste Abweichung wird für CZQX beobachtet, während die Nachrichtenhäufigkeit für EGGX und BIRD jeweils etwas unter, bzw. überschätzt werden. Die Abweichung der Simulationsdaten von den Daten der Leistungsüberwachung lässt sich erklären durch folgende Effekte, welche durch die Simulation nicht erfasst werden:

- ❖ Unterschiedliche Meldeintervalle für den ADS-C Statusbericht, u.a. abhängig von OTS-Nutzung oder Separationserfordernissen aufgrund konkreter Verkehrslage
- ❖ Teilweise Nutzung der OCAs durch kreuzenden kontinentalen Luftverkehr (z.B. Kontinentaleuropa – Island)

6 Modell zur Ermittlung der operativen Kommunikationsbedarfsabdeckung

Tabelle 6-7: Validierung der CPDLC/CRD Nachrichtenhäufigkeit [106]

OCA	Durchschnittliche Anzahl an CPDLC Nachrichten pro Flug [-]		Abweichung [-]
	ICAO-NAT	Simulation	
EGGX	0.76	1.07	+0.31
CZQX	1.02	1.43	+0.41
BIRD	1.65	1.41	-0.24
LPPO	1.50	1.21	-0.29
KZWY	2.32	0.76	-1.56
ENOB	-	0.29	-

Die Validierung der CRD Nachrichtenhäufigkeit, als einziger abgebildeter CPDLC Anwendung, aus Simulation und Leistungsüberwachung der ICAO ist in Tabelle 6-7 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen eine Überschätzung der Nachrichtenhäufigkeit OCAs EGGX und CZQX um etwa 40%. Folgende Effekte, welche in der Simulation nicht abgebildet sind, können hierfür ausschlaggebend sein [106]:

- ❖ Höhenänderungen sind bereits im Flugplan eingeplant, eine zusätzliche Anfrage (CRD) ist nicht notwendig
- ❖ CRD erfolgt tlw. über Sprechfunk (Anteil der CPDLC-Anwender im Referenzzeitraum 2019 schwankte zwischen 88,6% (EGGX) und 93,5% (CZQX) [142])
- ❖ Unterbindung von Höhenänderungen auf OTS-Flugpfaden aufgrund von Separationsanforderungen
- ❖ Teilweise direkte Höhenänderungsvorgabe durch Luftverkehrskontrolle (CRD besteht aus 2 Nachrichten statt 3, Anfragenachricht entfällt)

Die CPDLC Nachrichtenübertragungen in den OCAs KZWY, LPPO und BIRD hingegen werden durch die Simulation unterschätzt. Ursächlich hierfür können neben der nur teilweisen Abdeckung der OCAs KZWY und LPPO folgende in der Simulation nicht abgebildete Effekte sein [106]:

- ❖ Zusätzlicher Kommunikationsbedarf in LPPO und BIRD durch in Simulation nicht abgebildetem Übergang zwischen Streckenflug und terminalen Flugphasen aufgrund in OCA eingeschlossener Flughäfen
- ❖ In Simulation nicht berücksichtigte Wettereffekte bedingen durch notwendige Routenänderungen zusätzliche CRD Aktivierungen

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass für die OCAs EGGX, CZQX und BIRD, welche vollständig durch den Simulationsbereich abgedeckt werden, eine Abweichung von bis zu 0,67 Einzelnachrichten pro Flug und OCA für ADS-C Einzelanwendungen und von bis zu 0,41 Einzelnachrichten pro Flug und OCA für die CRD Einzelanwendung ergeben. Insbesondere für die ADS-C Anwendung erscheinen die Abweichungen vor dem Hintergrund möglicher Modellierungsungenauigkeiten hinsichtlich der Mobilitätsdaten sehr akzeptabel. Die Überschätzung der Datenkommunikation für die Einzelanwendung CRD ist deutlicher und ist bei der Auswertung der Ergebnisse z.B. als Effekt einer weiteren Steigerung der Nutzung von Datenlinkkommunikation gegenüber Sprechfunk zu berücksichtigen.

7 Untersuchungsergebnisse

Die Untersuchungsergebnisse teilen sich auf in die Anteile Konnektivität (Kapitel 7.1), Kommunikationsbedarf (Kapitel 7.2) und Abdeckung des Kommunikationsbedarfs (Kapitel 7.3). Eine separate Darstellung von Ergebnissen der Erstellung der Mobilitätsdaten erfolgt nicht, da die Modellierung von Großkreisen zwischen Start- und Zielflughäfen, sowie zugehörigen optimierten Höhenprofilen unter der Nutzung von Flugleistungsdaten bereits in den ausgewiesenen Referenzen detailliert beschrieben ist.

Die Untersuchungsergebnisse für die Konnektivität in Kapitel 7.1 und die *Cluster*-Datenrate in Kapitel 7.3.1 nutzt die in Tabelle 7-1 beschriebenen Beispielkonfigurationen der Kernparameter e_f und r_a . Die Konnektivitätsergebnisse stützen sich dabei auf die bereits in [150, 151] aufgeführten Beispielkonfigurationen mit hohem Einführungsgrad e_f und hoher Reichweite (Konfiguration A), hohem Einführungsgrad und geringer Reichweite (Konfiguration B) und geringem Einführungsgrad und hoher Reichweite (Konfiguration C). Die Ergebnisse für die *Cluster*-Datenrate verwenden die bereits in [150] beschriebenen Beispielkonfigurationen und ergänzen diese um eine vierte Beispielkonfiguration mit geringem Einführungsgrad und geringer Reichweite (Konfiguration D), um die Variation der Datenrate in allen vier Kombinationsmöglichkeiten aus den Referenzwerten für e_f und r_a darzustellen. Für den Einführungsgrad e_f wurde jeweils ein Wert von 0,4 und 0,8 gewählt um jeweils die Situation zu Beginn der Einführung der Technologie und in einem fortgeschrittenen Einführungsstadium darzustellen. Für r_a wurde jeweils ein Wert von 150 km als Beispiel für eine geringere Reichweite und ein Wert von 330 km als Beispiel für eine leistungsfähigere Auslegung der untersuchten Datenlinktechnologie gewählt. Diese Werte sind angelehnt an den in [84] für die Referenztechnologie LDACS Luft-Luft-Datenlink identifizierten realisierbaren Reichweiten. Die aus dieser Auswahl resultierenden Beispielkonfigurationen werden in Tabelle 7-1 aufgeführt.

Tabelle 7-1: Beispielkonfigurationen für Kernparameter

Parameter		Einführungsgrad (e_f)	
		0,4	0,8
Reichweite (r_a)	330 km	C	A
	150 km	D	B

7.1 Konnektivität

Die hier aufgeführten Ergebnisse zur Konnektivität im durch die untersuchte Datenlinktechnologie aufgespannten AANET wurden initial und umfassend in [151, 152] vorgestellt und werden an dieser Stelle mit Schwerpunkt auf den für die Ergebnisse für die Kommunikationsbedarfsabdeckung relevanten Teile dargestellt. In [152] wird dabei zwischen Luftkonnektivität, d.h. dem Verbindungsaufbau zwischen zwei Luftfahrzeugen und der Bodenkonnektivität, d.h. dem direkten oder indirekten Verbindungsaufbau zwischen einem Luftfahrzeug und einer Bodenstation, unterschieden. Weiterhin werden Untersuchungen zur Anzahl der Netzknoten auf der Luft-Boden-Kommunikationsstrecke, der Anzahl der verfügbaren Verbindungen und der Verbindungsdauer vorgenommen. [151] fokussiert

7 Untersuchungsergebnisse

die Betrachtung auf die Charakterisierung der *Cluster*, bzw. der Netzwerktopologie in den Gruppen an vernetzten Luftfahrzeugen im AANET. Die Konnektivätsberechnungen erfolgen unter Nutzung des Simulationsdatensatzes NAT 2019 B w gemäß Tabelle 6-1.

7.1.1 Luft-Luft-Konnektivität

Die in Abbildung 7-1 in Abhängigkeit von e_f und r_a dargestellte Metrik $1 - \bar{\alpha}_0$ beschreibt den mittleren Anteil der Flugzeit aller Luftfahrzeuge bezogen auf die Gesamtflugzeit, während der mindestens eine Verbindung mit einem anderen Luftfahrzeug besteht. Der Mittelwert bezieht sich auf die Variation der ausgestatteten Luftfahrzeuge wie in Kapitel 6.3 beschrieben. Die Datenpunkte für die Beispielkonfigurationen aus Tabelle 7-1 sind markiert. Der zeitliche Anteil, während welchem eine Datenlinkverbindung zu mindestens einem anderen Luftfahrzeug besteht, steigt mit zunehmendem Einführungsgrad und zunehmender Kommunikationsreichweite an, wobei der Einfluss von e_f auf den Zeitanteil mit Konnektivität mit zunehmenden Werten von r_a höher ausgeprägt ist. Der Zeitanteil, bei welchem sich kein anderes Luftfahrzeug in Kommunikationsreichweite befindet sinkt mit hohen Werten für e_f und r_a auf unter 5%. Beispielkonfiguration A ($e_f = 0,8; r_a = 330 \text{ km}$) erreicht diesen Wert fast und ermöglicht für nahezu 95% des Simulationszeitraumes Konnektivität über das AANET. Beispielkonfiguration C ($e_f = 0,4; r_a = 330 \text{ km}$) erreicht von ca. 88% zeitlicher Luft-Luft-Konnektivitätsabdeckung. Da die Luft-Luft-Konnektivität die Grundvoraussetzung für die Übertragung von Datenkommunikationsbedarf der ATS und AOC-Anwendung ist, ist besonders bei den Konfigurationen A und C ein hoher Nutzwert möglich.

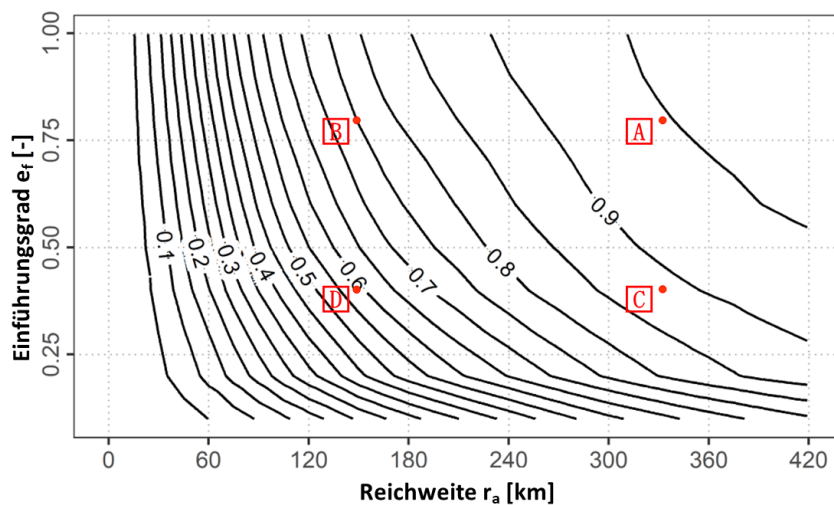


Abbildung 7-1: Luft-Luft-Konnektivität ($1 - \bar{\alpha}_0$) in Abhängigkeit von e_f und r_a [152]

7.1.2 Luft-Boden-Konnektivität

Die in Abbildung 7-2 dargestellte Metrik $1 - \bar{\gamma}_0$ beschreibt den mittleren Anteil der Flugzeit aller Luftfahrzeuge bezogen auf die Gesamtflugzeit, während welcher eine direkte oder indirekte Verbindung mindestens mit einer Bodenstation besteht. Hierbei ist zu beachten, dass aufgrund der Bodenstationen, deren Reichweite nicht variiert wird, bereits ein Zeitanteil

von bis zu 25% der Gesamtflugzeit eine Bodenkonnektivität besteht. Durch den Aufbau indirekter Luft-Boden-Verbindungen im AANET lässt sich dieser Anteil bei geeigneter Wahl von e_f und r_a auf über 95% steigern. Ähnlich wie die Luft-Luft-Konnektivität in Kapitel 7.1.1 ist die Luft-Boden-Konnektivität eine wesentliche Voraussetzung für die Übertragung des Datenkommunikationsbedarfs aus ATS und AOC-Anwendungen. Auf Basis der in Abbildung 7-2 dargestellten Ergebnisse, sind ebenfalls für Beispielkonfigurationen A und C die höchsten Nutzwerte zu erwarten.

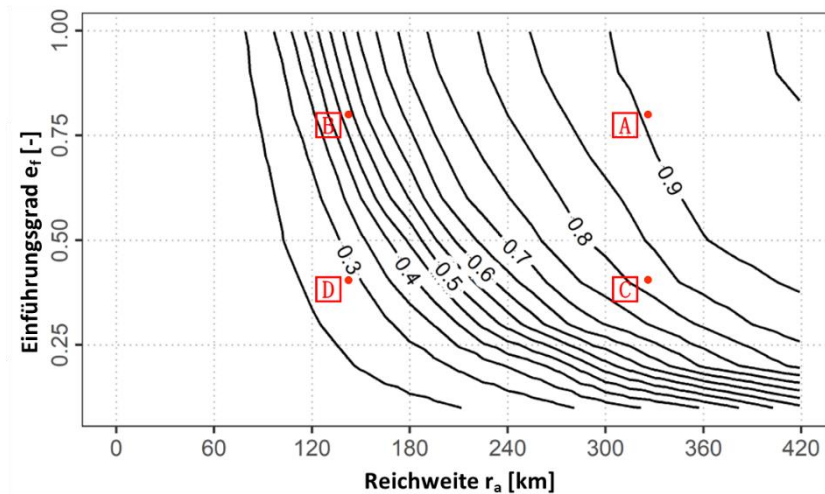


Abbildung 7-2: Luft-Boden-Konnektivität $(1 - \bar{\gamma}_0)$ in Abhängigkeit von e_f und r_a [152]

7.1.3 Verbindungsanzahl

Die in Abbildung 7-3 dargestellte mittlere Anzahl an Luft-Luft-Verbindungen je Luftfahrzeug $\bar{N}_c$ in Abhängigkeit von e_f und r_a ist einerseits ein Indikator für die Stabilität des AANETs, da bei höherer mittlerer Anzahl an möglichen Luft-Luft-Verbindungen eine höhere Wahrscheinlichkeit für einen stabilen Verbindungsaufbau besteht. Andererseits hat sie Auswirkungen auf die technologische Auslegung der Datenlinktechnologie, da bei vielen parallel möglichen Verbindungen Überlagerungseffekte eintreten und Herausforderung bei der Koordinierung des Verbindungsaufbaus bestehen können. $\bar{N}_c$ nimmt für Beispielkonfiguration B ($e_f = 0,8$; $r_a = 150$ km) Werte von über 2 Verbindungen an, für Beispielkonfiguration C ($e_f = 0,4$; $r_a = 330$ km) Werte von bis zu 6 Verbindungen und für Beispielkonfiguration A ($e_f = 0,8$; $r_a = 330$ km) Werte von bis zu 12 Kommunikationsverbindungen. Bei maximalem Einführungsgrad und maximaler Kommunikationsreichweite werden im Mittel bis zu 22 Luft-Luft-Verbindungen je Luftfahrzeug erreicht. Direkte Rückschlüsse auf den Nutzwert bezüglich der Übertragung des Datenkommunikationsbedarfs aus ATS und AOC lassen sich im Rahmen der in dieser Arbeit vorgenommenen Betrachtungen nicht ziehen.

7 Untersuchungsergebnisse

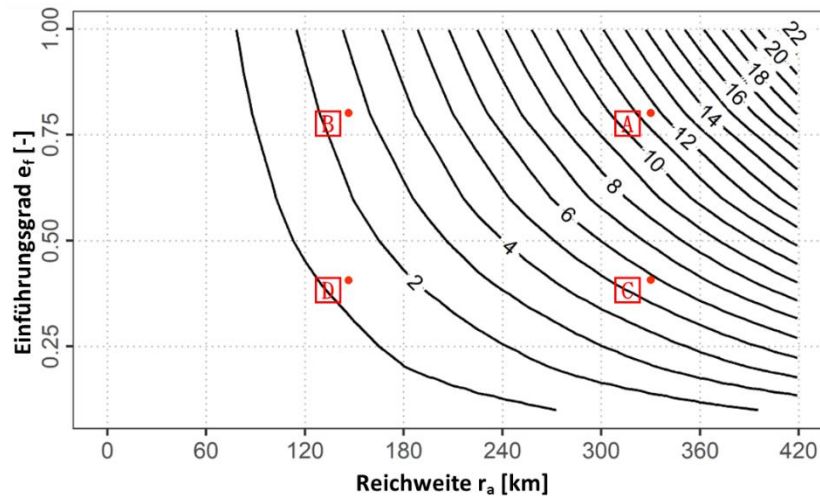


Abbildung 7-3: Zahl an Luft-Luft-Verbindungen ($\bar{N}_L$) in Abhängigkeit von e_f und r_a [152]

7.1.4 Länge der Übertragungskette

Relevant für die Komplexität und Stabilität der Übertragungskette sowie die möglichen Latenzzeiten ist vor allem die Anzahl der Netzwerkknoten zwischen Luftfahrzeug und Bodenstation, welche gemittelt über die Ausstattungsvariationen A-D in Abbildung 7-4 in Abhängigkeit von e_f und r_a dargestellt ist.

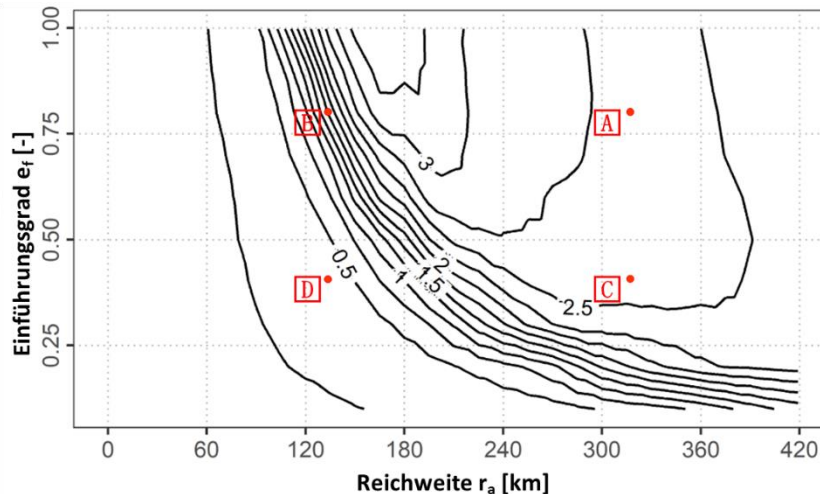


Abbildung 7-4: Länge der Übertragungskette ($\bar{N}_h$) in Abhängigkeit von e_f und r_a [152]

Hierbei steigt die Anzahl der Netzwerkknoten mit zunehmendem e_f generell an, während mit zunehmender Kommunikationsreichweite zunächst ein Anstieg der mittleren Anzahl an Netzwerkknoten zu beobachten ist, diese jedoch für höhere Kommunikationsreichweiten wieder sinkt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei zunehmender Reichweite weniger Netzwerkknoten innerhalb der Übertragungskette benötigt werden um die Strecke bis zur nächsten Bodenstation zu überwinden. So wird der Maximalwert für $\bar{N}_h$ von über 3,5 bei Reichweiten um 180 km bei Höchstwerten für e_f erreicht und sinkt bei Höchstwerten für r_a wieder auf unter 2,5. Die Länge der Übertragungskette ist primär ein Indikator für die Komplexität der Netzwerktopologie im AANET. Direkte Rückschlüsse auf den Nutzwert

für die ATS und AOC Datenübertragung lassen sich nicht ziehen. Jedoch ist eine größere Länge der Übertragungskette ein Indikator für eine höhere Anzahl an Netzwerkknoten pro Gateway (vgl. Kapitel 7.1.6) und eine höhere Datenübertragungsrate an den Gateways (vgl. Kapitel 7.3.2).

7.1.5 Verbindungsdauer

Die Verbindungsdauer der Luft-Luft-Verbindungen ist ausschlaggebend für die technische Umsetzung des Datenlinks und beeinflusst die Netzwerkstabilität sowie den Datenüberhang, welcher durch wiederholten Verbindungsaufbau und -initiiierung entsteht. Die Verbindungsdauer einer Luft-Luft-Verbindung ist als solche unabhängig vom Einführungsgrad e_f und bei den hier getroffenen Modellannahmen ausschließlich abhängig von der Kommunikationsreichweite r_a . In [152] wird eine mittlere Verbindungsdauer $\bar{D}$ von ca. 25 Minuten für die geringsten betrachteten Werte von r_a von 15 km bis zu ca. 115 Minuten für die höchsten betrachteten Werte von r_a von 420 km ermittelt. Für die Beispielkonfigurationen B ($e_f = 0,8; r_a = 150 \text{ km}$) und D ($e_f = 0,4; r_a = 150 \text{ km}$) wurde in [152] ein Wert von 75 Minuten bis 80 Minuten und für die Beispielkonfigurationen A ($e_f = 0,8; r_a = 330 \text{ km}$) und C ($e_f = 0,4; r_a = 330 \text{ km}$) ein Wert von ungefähr 105 Minuten angegeben. Bei Berücksichtigung der zusätzlichen Verzögerungen für den Verbindungsaufbau kann bei geringeren Verbindungsdauern der erzielte Nutzwert für die Übertragung von ATS und AOC Datenkommunikation beeinträchtigt werden. Im Rahmen der hier vorgenommenen Betrachtung sind jedoch keine direkten Korrelationen zu erwarten, welche nicht bereits durch andere Untersuchungsergebnisse erfasst werden.

7.1.6 Clustereigenschaften

Die mittlere Anzahl der Gateways pro Cluster (GPC) steigt wie in [151] beschrieben gemäß Abbildung 7-5 mit steigenden Werten für e_f und r_a an und erreicht für maximale Ausstattung und Kommunikationsreichweite Höchstwerte von über 15,5 Gateways pro Cluster. Beispielkonfiguration B ($e_f = 0,8; r_a = 150 \text{ km}$) erreicht nur einen GPC-Wert von 0,5. Dies bedeutet, dass im Schnitt nur jedes zweite Cluster über Gateways und somit über Bodenkonnektivität verfügt. Für Beispielkonfiguration C ($e_f = 0,4; r_a = 330 \text{ km}$) wird ein GPC von 2,6 erreicht und für Beispielkonfiguration A ($e_f = 0,8; r_a = 330 \text{ km}$) ein Wert von bis zu 5,9 Gateways pro Cluster. Die Werte für Beispielkonfiguration D ($e_f = 0,4; r_a = 150 \text{ km}$) liegen noch unterhalb der Werte von Beispielkonfiguration B . Dies deutet darauf hin, dass die Zahl der Gateways pro Cluster zunächst wesentlich von der Reichweite r_a beeinflusst wird und der Einführungsgrad e_f demgegenüber nur nachrangigen Einfluss hat (siehe Ergebnisdiskussion in Kapitel 8)

7 Untersuchungsergebnisse

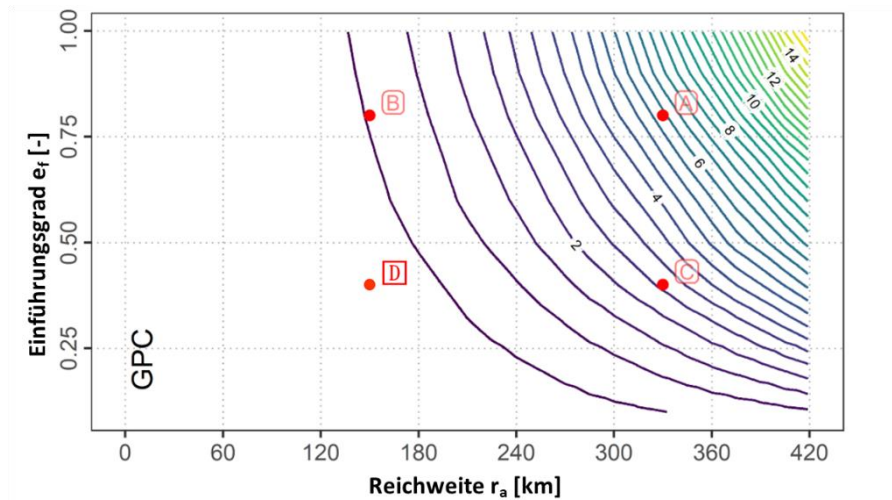


Abbildung 7-5: Zahl der Gateways pro Cluster (GPC) in Abhängigkeit von e_f und r_a [151]

In Verbindung mit der in Abbildung 7-5 dargestellten mittleren Anzahl an Gateways pro Cluster ist die in Abbildung 7-6 erfasste mittlere Anzahl an Gateways pro Netzwerkknoten GPN zu sehen. Diese Kennziffer bietet einen ersten Indikator dafür, auf wie viele Luft-Boden-Netzwerkknoten sich der Datenkommunikationsbedarf verteilt. Hierbei erreicht Beispielkonfiguration B einen Wert zwischen 0,09 und 0,10, d.h. auf ein Gateway kommen bis zu zehn Netzwerkknoten. Die Beispielkonfigurationen A und C liegen in etwa gleichauf bei Werten von GPN um 0,24. Dies heißt, dass im Mittel bei beiden Konfigurationen einem Gateway 4,16 Netzwerkknoten im AANET gegenüberstehen. Die geringere Anzahl an Gateways pro Cluster für Beispielkonfiguration C gegenüber Beispielkonfiguration A wie aus Abbildung 7-5 ersichtlich wird also durch eine gleichermaßen geringere Anzahl an Netzwerkknoten innerhalb des Clusters ausgeglichen.

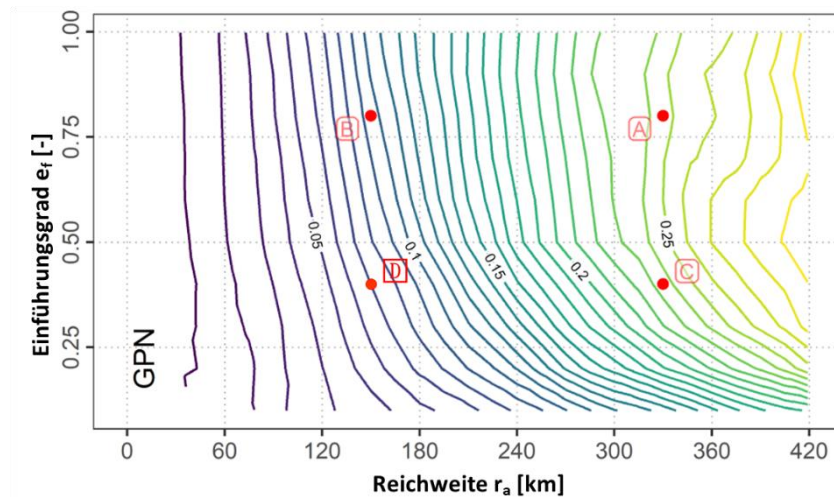


Abbildung 7-6: Gateways pro Netzwerkknoten (GPN) in Abhängigkeit von e_f und r_a [151]

Eine hierzu ergänzende Darstellung ist mit Abbildung 7-7 gegeben. Hier wird die mittlere Anzahl an Gateways pro Netzwerkknoten GPN' dargestellt, wobei nur Cluster mit Boden-konnektivität berücksichtigt werden. Für diese Cluster ergibt sich ein deutlich geringerer

Ergebnisbereich mit Werten von maximal 0,49 Gateways pro Netzwerkknoten für Reichweiten von ca. 50 km und bis unter 0,38 bei $120 \text{ km} < r_a < 240 \text{ km}$ und $e_f > 0,25$. In diesem Bereich, in welchen auch Beispielkonfiguration B fällt, sind die wenigsten Gateways pro Netzwerkknoten im Cluster vorhanden. Beispielkonfigurationen A, C und D weisen GPN'-Werte von 0,4 bis 0,41 auf.

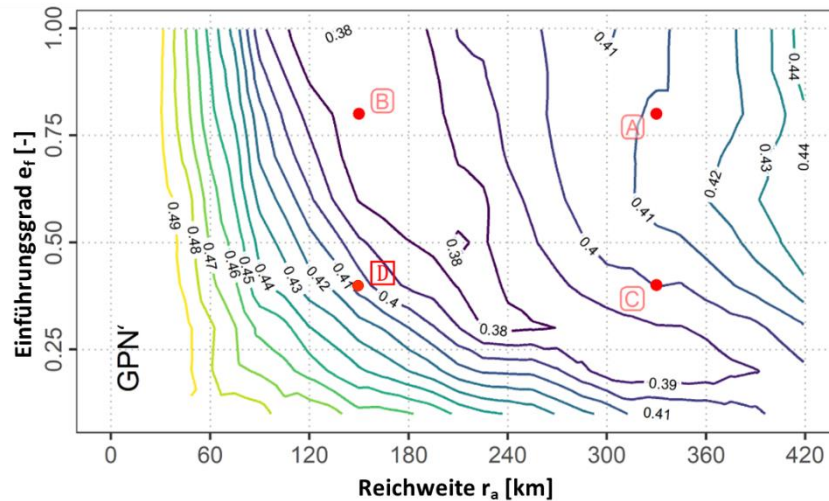


Abbildung 7-7: Gateways pro Netzwerkknoten mit Bodenkonnektivität (GPN') [151]

Von Interesse für den Nutzwert für die ATS und AOC-Datenübertragung und den zu erwartenden Datenübertragungsraten ist insbesondere die Kombination aus GPC und GPN'. Erst wenn alle Cluster im Schnitt über mindestens ein Gateway verfügen sind signifikante Kommunikationsbedarfsabdeckungen zu erwarten (siehe Kapitel 7.3.3). Ein höheres Verhältnis an Gateways zu Netzwerkknoten sollte zu geringeren Datenübertragungsraten an den Gateways führen (siehe Kapitel 7.3.2).

7.2 Kommunikationsbedarf

Der Kommunikationsbedarf der sich aus den Kommunikationsprofilen für ATS und AOC in Verbindung mit den Mobilitätsdaten für die NAT-OCA ergibt, lässt sich untersuchen hinsichtlich seiner räumlichen und zeitlichen Verteilung, der Verteilung der Datenvolumen und der Zusammensetzung nach Einzelanwendungen. Die Summe aus allen vier Betrachtungsdimensionen lässt eine weitgehend vollständige Darstellung und Einordnung des Kommunikationsbedarfes auf der Ebene der operativen Anforderungsanalyse zu. Die in den Kapiteln 7.2.1, 7.2.2 und 7.2.3 dargestellten Kommunikationsbedarfe basieren auf dem Simulationsdatensatz NAT 2019 B w gemäß Tabelle 6-1 und berücksichtigt alle Flüge des Datensatzes (d.h. $e_f = 1$). Eine weitere Reduzierung auf den Kommunikationsbedarf der Flüge bei geringeren Einführungsgraden e_f erfolgt durch Abbildung des Kommunikationsbedarfes auf die spezifischen Mobilitätsdaten einer Parameterkonfiguration in Kapitel 7.3. Die in Kapitel 7.2.4 und 7.2.5 dargestellten geographischen Verteilungen der Kommunikationsbedarfe berücksichtigen Luftverkehr in westlicher und östlicher Richtung gemäß Simulationsdatensatz NAT 2019 B aus Tabelle 6-1.

7 Untersuchungsergebnisse

7.2.1 Zusammensetzung der Luftfahrtdatenkommunikation

In Tabelle 7-2 ist die Zusammensetzung der Luftfahrtdatenkommunikation mit Hinblick auf die beiden Anwendungsfälle ATS und AOC im Gesamtszenario sowie den beiden zentralen OCAs EGGX und CZQX dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sowohl hinsichtlich der absoluten Anzahl an ausgetauschten Einzelnachrichten als auch des übertragenen Datenvolumens AOC-Anwendungen den größten Teil der Luftfahrtdatenkommunikation ausmachen. Im Fall des Datenvolumens entfällt bei den zugrunde gelegten Kommunikationsprofilen und Datengrößen für ATS und AOC sogar nahezu das gesamte Datenvolumen im simulierten Szenario auf AOC-Anwendungen.

Tabelle 7-2: Anteile Nachrichtenzahl und Datenvolumen von ATS und AOC

Aufteilung von	Gesamt-szenario		EGGX		CZQX	
	AOC	ATS	AOC	ATS	AOC	ATS
Nachrichtenzahl (absolut)	200.327	38.324	44.227	13.211	58.899	8.032
Nachrichtenzahl (anteilig)	84 %	16 %	77 %	23 %	88 %	12 %
Datenvolumen (absolut) [MB]	528,48	1,66	125,18	0,63	152,84	0,77
Datenvolumen (anteilig)	> 99 %	< 1 %	> 99 %	< 1 %	> 99 %	< 1 %

Beim Vergleich der Aufteilung der Nachrichtenanzahl zwischen den OCAs EGGX und CZQX fällt auf, dass der Anteil der auf ATS entfallenden Nachrichten mit 23% in EGGX nahezu doppelt so hoch ist wie in CZQX mit 12%. Dies ist u.a. darauf zurückzuführen, dass der CZQX insbesondere entlang der geographischen Breite größer ist als EGGX was zu einer häufigeren Auslösung der Einzelanwendungen mit zeitlich gekoppelter Auslösewahrscheinlichkeit oder festen Auslöseintervallen führt. Da diese Einzelanwendungen das Kommunikationsprofil von AOC dominieren, während ATS viele ereignisbasierte Anwendungen enthält, welche vor allem an den OCA-Übergängen auslösen führt dies zu der beobachteten Verschiebung der anteiligen Nachrichtenzahl beider Anwendungsfälle.

Die Aufteilung der Nachrichtenzahl und des Datenvolumens aus beiden Anwendungsfällen auf Kommunikation in Richtung des Luftfahrzeugs (FL, *uplink*) und ausgehend vom Luftfahrzeug (RL, *downlink*) ist in Tabelle 7-3 dargestellt. Hier ist einerseits ein Verhältnis von etwa zwei zu eins an Nachrichten, welche vom Luftfahrzeug ausgehen, gegenüber von diesem empfangenen Nachrichten ersichtlich. Zudem wird deutlich, dass Kommunikation welche vom Luftfahrzeug empfangen wird mit 96% des Gesamtdatenvolumens den größten Teil der übertragenen Datenmenge ausmacht. Dies ist vsl. der deutlich inhomogenen Verteilung der Datengrößen für Einzelnachrichten in den Kommunikationsprofilen aus Kapitel 6.4 zuzurechnen, in welchen insbesondere die AOC Einzelanwendung WXGRAPH mit besonders hohen Datenvolumen für die beim Luftfahrzeug eingehenden Nachrichten (FL) hervorsteht. Auf der anderen Seite wird die Nachrichtenhäufigkeit vor allem von Anwendungen mit regelmäßiger Informationsübertragung vom Luftfahrzeug zu

Kommunikationspartnern am Boden (Kommunikationsrichtung RL) dominiert, wie z.B. der ADS-C Anwendung oder der Wetterdatenmessung (WXRT). Diese weisen kurze Berichtsintervalle von 3 Minuten bis 14 Minuten und eine geringe Nachrichtengröße von 34 Bytes bzw. 103 Bytes auf.

Tabelle 7-3: Aufteilung des Kommunikationsbedarfs auf Kommunikationsrichtung

Anteil an Gesamtaufkommen	Kommunikationsrichtung	
	FL (Boden-Luft)	RL (Luft-Boden)
Nachrichten	33 %	67%
Datenvolumen	96 %	4 %

Tabelle 7-4 zeigt die Anteile der Einzelanwendungen an der Gesamtnachrichtenzahl und dem Gesamtdatenvolumen der Luftfahrt Datenkommunikation im simulierten Szenario. Während bei der Nachrichtenzahl eine gleichmäßigere Verteilung der Anteile auf die Einzelanwendungen beobachtet werden kann, bei der die Einzelanwendungen zum Erhalt und zum Versand von Wetterinformationen, WXGRAPH und WXRT, jeweils 20% bis 30% der Gesamtnachrichtenzahl ausmachen, stellt sich beim Datenvolumen ein anderes Bild dar. Hier macht die Einzelanwendung WXGRAPH in Übereinstimmung mit den oben aufgeführten Beobachtungen über 90% der übertragenen Datenmenge aus.

Tabelle 7-4: Nachrichten- und Datenvolumensanteile der ATS- und AOC Einzelanwendungen

Anwendungsfall	Einzelanwendung	Anteil [%] (FL und RL)	
		Nachrichtenzahl	Datenvolumen
ATS	ACM	6,5	0,10
	ADS-Cc	1,1	0,02
	ADS-Ce	0,8	0,01
	ADS-Cp	1,1	0,02
	ADS-Cr	5,5	0,08
	CRD	1,0	0,08
AOC	ENGINE	1,6	0,29
	FLTPLAN	5,2	1,24
	FLTSTAT	0,3	0,02
	FREETEXT	1,2	0,20
	FUEL	1,8	0,10
	MAINTPR	0,1	0,01
	MAINTRT	6,0	0,29
	NOTAM	3,5	0,37
	POSRPT	10,9	1,04
	WXGRAPH	21,7	93,90
	WXRT	27,8	1,29
	WXTEXT	4,0	0,94

7 Untersuchungsergebnisse

7.2.2 Häufigkeitsverteilung Datenvolumen und Nachrichtenzahl

Die Auswertung der Häufigkeitsverteilungen von Datenvolumen und Anzahl der Einzelnachrichten ermöglicht eine Charakterisierung der Datenkommunikation hinsichtlich der Häufigkeit von Nachrichten bestimmter Größen über die Einzelanwendungen hinweg sowie deren Anteil am Gesamtdatenaufkommen. Auch lassen sich so in Ergänzung zu den Betrachtungen in Kapitel 7.2.1 einzelne Anwendungen oder zugehörige Nachrichten herausstellen, welche einen besonders großen Anteil am Gesamtdatenaufkommen haben, wie zum Beispiel WXGRAPH bezüglich der Datenmenge oder auch ACM und ADS-C Einzelanwendungen bezüglich der Häufigkeit. Dies kann die Grundlage sein für die differenzierte Auslegung der Datenlinktechnologie auf Netzwerk- oder Datenlinkebene unter Einbeziehung der Kommunikationsrichtung.

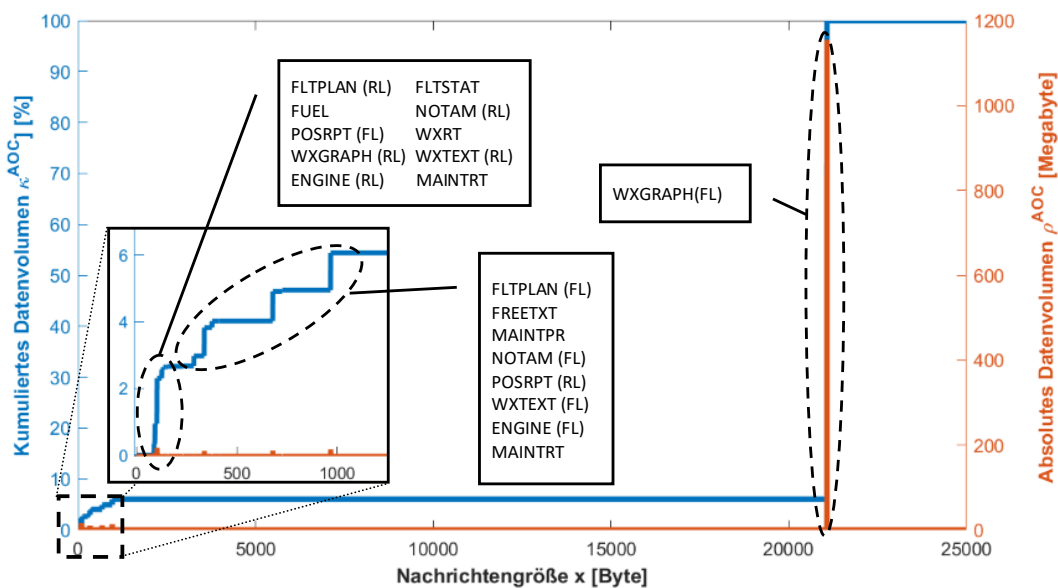


Abbildung 7-8: Absolutes und kumuliertes Datenvolumen für AOC-Anwendungen [106]

Das kumulierte Datenkommunikationsvolumen für AOC-Anwendungen ist in Abbildung 7-8 dargestellt. Hierbei wird in orange das absolute Datenvolumen angezeigt, welches auf Einzelnachrichten der betreffenden Datengröße entfällt und in blau der kumulierte prozentuale Anteil auf den Datenkommunikation bis zu einer bestimmten Nachrichtengröße entfällt. Abbildung 7-9 zeigt jeweils die absolute und kumulierte Nachrichtenhäufigkeit für die AOC-Einzelnachrichten. Es ist ersichtlich, dass für den Anwendungsfall AOC Nachrichten mit einer Größe bis 157 Byte nur 2,7% des Gesamtdatenvolumens ausmachen, obwohl sie entsprechend Abbildung 7-9 für 69% des gesamten Nachrichtenaufkommens verantwortlich sind. Weitere 27% der Einzelnachrichten mit Größen zwischen 233 und 968 Byte kommen für 3,3% des AOC-Gesamtdatenvolumens auf. In diesen beiden Gruppen sind die Einzelnachrichten aller AOC-Einzelanwendungen enthalten mit Ausnahme der FL-Nachrichten der Anwendung WXGRAPH. Die übrigen 94% des AOC-Gesamtdatenvolumens entfallen auf ebendiese von den Luftfahrzeugen empfangenen Nachrichten der WXGRAPH Einzelanwendung.

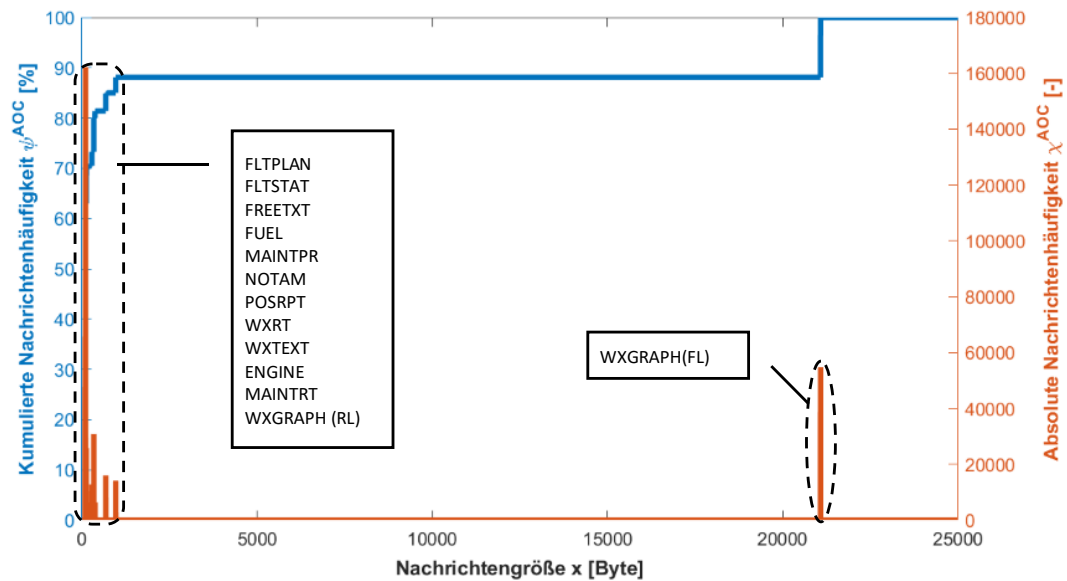


Abbildung 7-9: Absolute und kumulierte Nachrichtenhäufigkeit für AOC-Anwendungen [106]

Die entsprechenden Daten für den Anwendungsfall ATS sind in Abbildung 7-10 und Abbildung 7-11 dargestellt. Es wird deutlich, dass das ATS-Kommunikationsprofil im Wesentlichen aus Nachrichten mit geringem Datenvolumen von 34 Byte aus den Einzelanwendungen ADS-C und ACM gemäß Tabelle 6-4 besteht, welche 80% des durch ATS generierten Datenvolumens ausmachen. Die übrigen 3% der Nachrichtenzahl gemäß Abbildung 7-11 entfällt auf die Einzelanwendung CRD und ist entsprechend Abbildung 7-10 verantwortlich für 80% des Gesamtdatenvolumens aus ATS-Anwendungen.

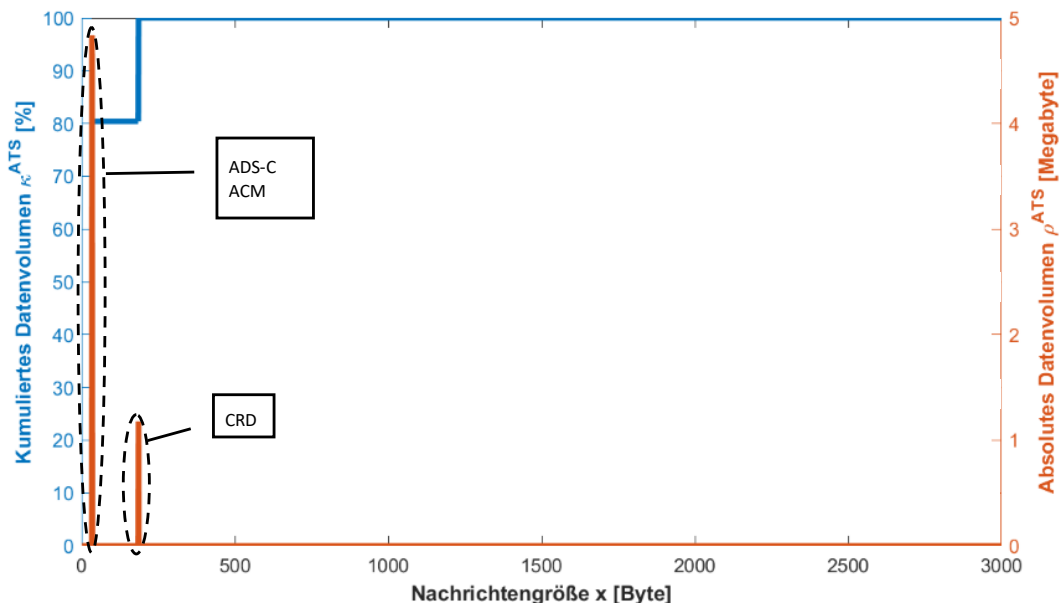


Abbildung 7-10: Absolutes und kumuliertes Datenvolumen für ATS-Anwendungen [106]

7 Untersuchungsergebnisse

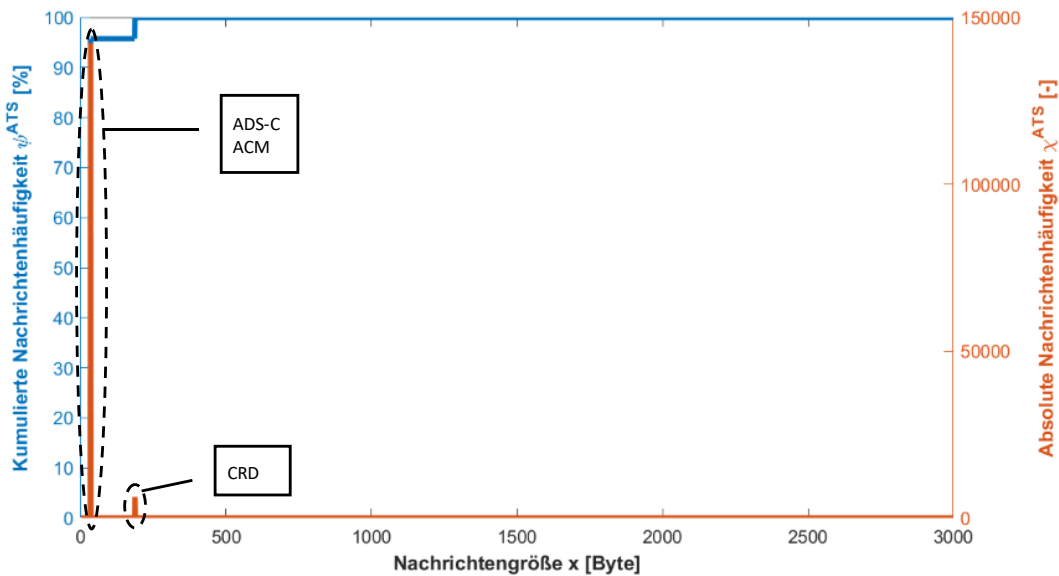


Abbildung 7-11: Absolute und kumulierte Nachrichtenhäufigkeit für ATS-Anwendungen [106]

Zusammenfassend lässt sich das AOC-Kommunikationsprofil dahingehend beschreiben, dass es überwiegend kompaktere Einzelnachrichten bis zu einer Größe von 157 Byte enthält, ein Großteil des Gesamtdatenvolumens jedoch von Einzelnachrichten der WXGRAPH-Anwendung mit einem im Vergleich sehr großen Datenumfang von 21.077 Byte ausgemacht wird. Im Vergleich dazu ist das Kommunikationsprofil für den Anwendungsfall ATS charakterisiert von kleinen Einzelnachrichten der Anwendungen ADS-C und ACM mit einer Größe von 34 Byte, welche auch den weitaus größten Anteil der Einzelnachrichten ausmachen.

7.2.3 Zeitliche Verteilung

Der zeitliche Verlauf des Kommunikationsaufkommens innerhalb des Simulationszeitraums sowohl hinsichtlich der Kommunikationsereignisse ε als auch hinsichtlich des Datenaufkommens ist in Abbildung 7-12 ersichtlich. Dieser spiegelt die bereits in in Abbildung 6-3 dargestellte laufende Anzahl der Luftfahrzeuge im Simulationsbereich wider.

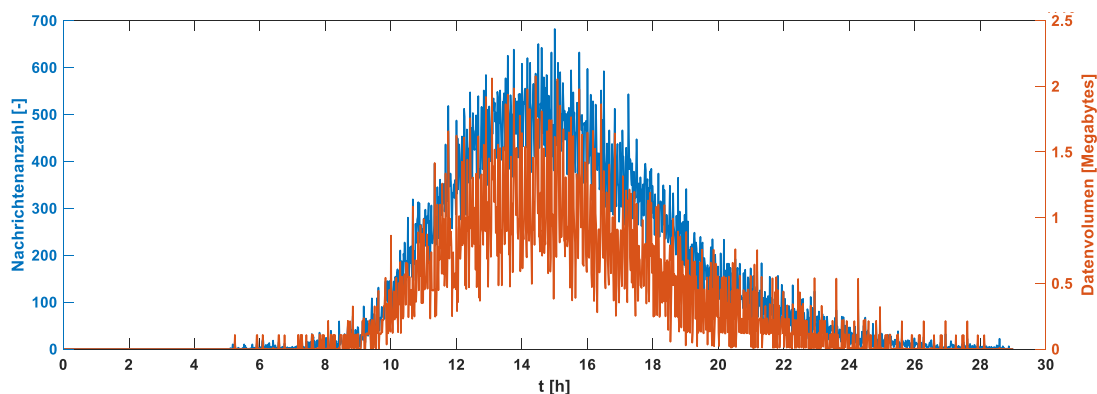


Abbildung 7-12: Nachrichtenzahl (blau) und Datenvolumen (rot) im Simulationszeitraum

Deutlich werden die starken Schwankungen zwischen den Zeitschritten. Im Bereich des höchsten Kommunikationsaufkommens zwischen 13 Stunden und 15 Stunden Simulationszeit schwankt dieses zwischen 400 und 700 Einzelnachrichten und zwischen einem Datenvolumen von 0,5 Megabyte und 2,1 Megabyte je diskretem einminütigem Zeitintervall.

7.2.4 Räumliche Verteilung der Flugführungskommunikation

Die räumliche Verteilung des Kommunikationsbedarfs aus dem ATS-Kommunikationsprofil wird in Betrachtung in Bezug auf die Aktivierung von Einzelanwendungen (Abbildung 7-13 bis Abbildung 7-16), die Verteilung der Einzelnachrichten (Abbildung 7-17) und die Verteilung des Datenvolumens (Abbildung 7-18). Die flächenbezogene Verteilung des ATS-Nachrichtenaufkommens, Ξ^{ATS} , ergibt sich dabei aus der Auflösung der Einzelanwendungen in Einzelnachrichten und Umrechnung in eine flächenbezogene Größe gemäß Definition in Kapitel 6.4.4. Als Bezugsfläche sind hierbei die durch eine Rasterung des Simulationsbereichs in 1°-Schritten entlang Breiten- und Längengraden entstehenden Flächensegmente der Erdoberfläche gewählt. Die flächenbezogene Verteilung des ATS-Datenvolumens, P^{ATS} , stellt in gleicher Weise die Verteilung des Datenvolumens im Simulationsbereich aufgrund der Größe der einzelnen Nachrichten dar.

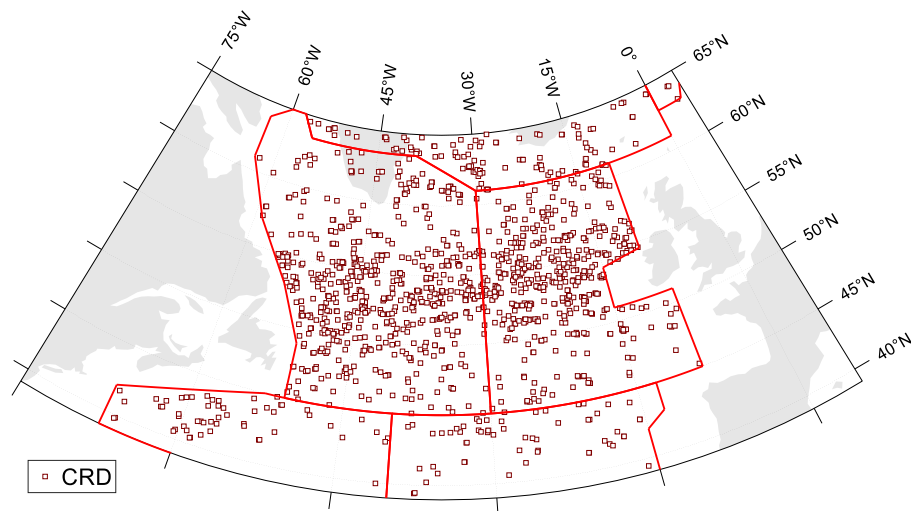


Abbildung 7-13: Geographische Verteilung der CRD-Anwendung [106]

Die geographische Verteilung der CRD-Anwendung (Anfrage und Erteilung von Freigaben) aus dem ATS-Kommunikationsprofil ist in Abbildung 7-13 dargestellt. Diese Einzelanwendung ist anders als die übrigen ATS-Anwendungen unabhängig von den Luftraumstrukturen, wie OCA-Grenzen oder Wegpunkten. Die Auslösung der CRD-Anwendung ist einzig bedingt durch die sich aus Flugpfad und Flugleistung ergebenden Höhenänderungen für einen möglichst effizienten Flug. Entsprechend folgt die Verteilung in Abbildung 7-13 der Flugdichte in den betreffenden Regionen (vgl. Abbildung 6-4). Der Darstellung liegt ein Einführungsgrad e_f von 1 zugrunde. Bei Reduktion des Einführungsgrades e_f ist eine Ausdünnung der in Abbildung 7-13 dargestellten Verteilung zu erwarten.

7 Untersuchungsergebnisse

Ein anderes Bild stellt sich bei der geographischen Verteilung der Einzelanwendungen aus dem ADS-C Kontext dar, welche in Abbildung 7-14 und Abbildung 7-15 dargestellt sind.

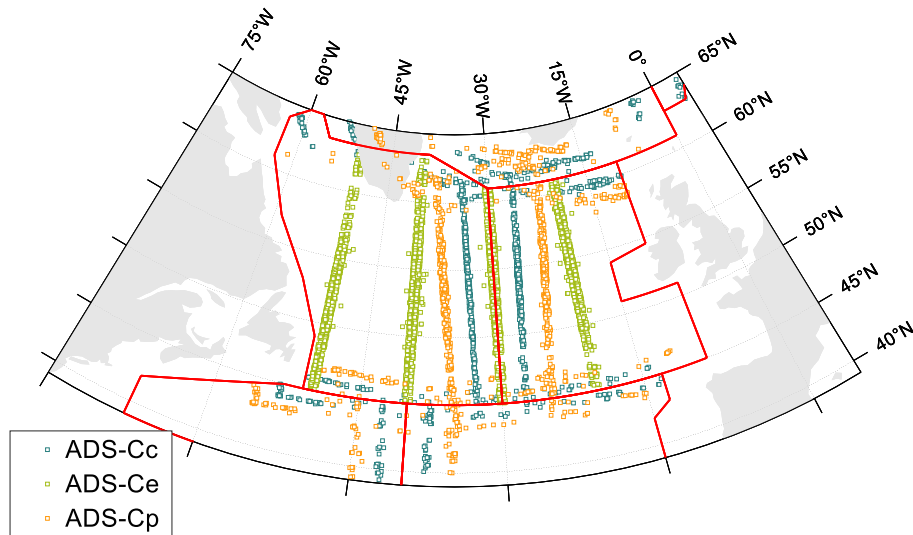


Abbildung 7-14: Geographische Verteilung der ADS-C Anwendung (Start, Ende, Ereignis) [106]

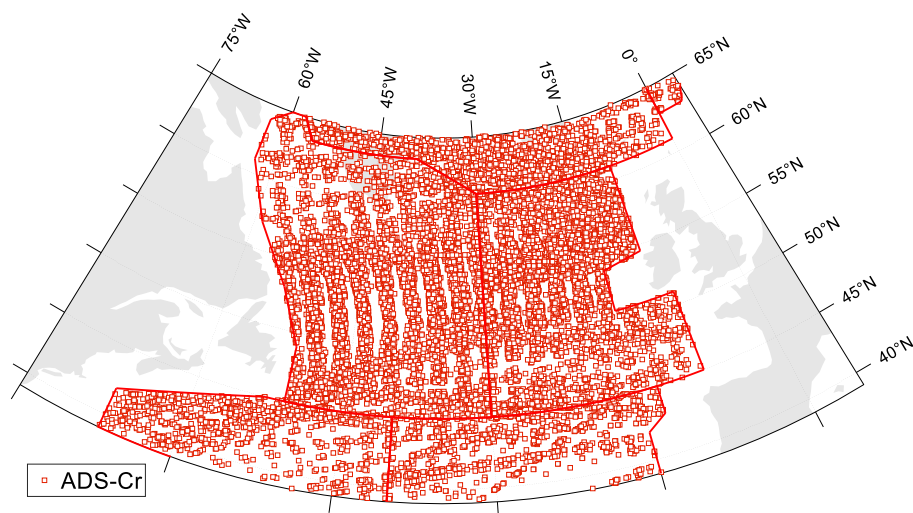


Abbildung 7-15: Geographische Verteilung der ADS-C Anwendung (periodisch) [106]

Bezüglich der ereignisbasierten ADS-C Einzelanwendungen für die Initiierung und Beendigung der ADS-C Anwendung sowie die Statusnachricht bei dem Überqueren von Wegpunkten ergibt sich eine klare Orientierung entlang von OCA-Grenzen und geographischen Orientierungspunkten. Da die Fluggeschwindigkeiten im Reiseflug der betrachteten Luftfahrzeuge gemäß den Mobilitätsdaten nur wenig variieren führt auch der zeitliche Vorlauf, bzw. Nachlauf bei den ADS-C Start (orange) und Endanwendungen (grün) zu geographisch festen Auslösezonen entlang von parallelen Linien zur OCA-Grenze zwischen CZQX und EGGX. Entlang der übrigen OCA-Grenzen ist die Streuung größer, da hier ebenfalls die

Flugrichtung der kreuzenden Luftfahrzeuge stärker streut. Die Auslösung der Anwendung ADS-Ce (ereignisbasierte ADS-C Nachricht) erfolgt gemäß Definition an den vorgegebenen Wegmarken bei Überquerung der Meridiane bei 20°W, 30°W, 40°W und 50°W.

Da die Auslösung der periodischen ADS-C Statusnachrichten, deren geographische Verteilung in Abbildung 7-15 dargestellt ist, im gesamten Simulationsbereich bei ähnlichen Fluggeschwindigkeiten dem gleichen Zeitintervall von 14 Minuten folgt, sind insbesondere im Bereich der OCAs CZQX und EGGX linienförmige Auslösebereiche erkennbar, welche sich in gleichen Abständen von den OCA-Grenzen fortpflanzen.

Die geographische Verteilung der Einzelanwendung ACM orientiert sich entlang der Luftraumgrenzen, wie in Abbildung 7-16 ersichtlich. Ausnahmen stellen die An- und Abflüge um den Flughafen Reykjavik im Luftraum BIRD dar. Diese entsprechen dem Übergang der Verantwortlichkeit des Flugverkehrskontrollzentrums des Flughafens Reykjavik auf das Kontrollzentrum des ozeanischen Luftraums BIRD.

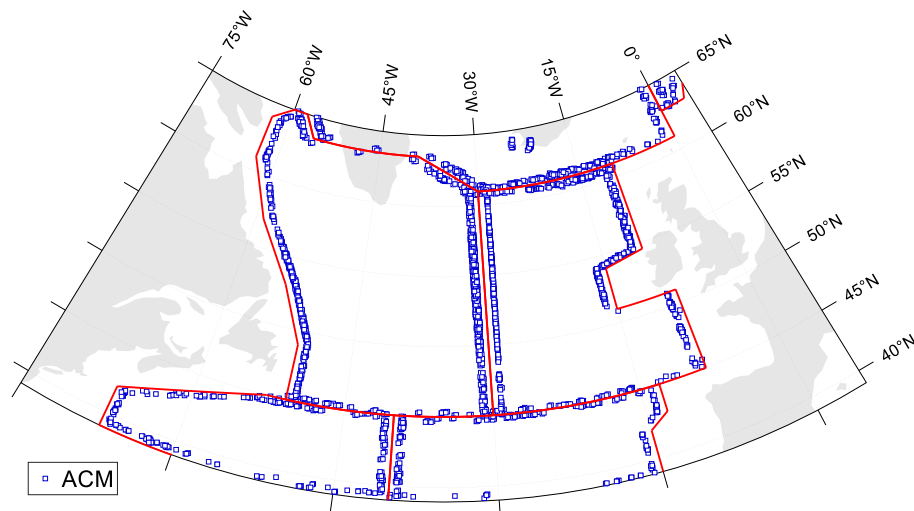


Abbildung 7-16: Geographische Verteilung der Einzelanwendung ACM [106]

In Abbildung 7-17 ist das kumulierte ATS-Nachrichtenaufkommen über alle ATS-Einzelanwendungen hinsichtlich der Anzahl an Einzelnachrichten je Flächeneinheit dargestellt in einer Auflösung von je einem Grad in Richtung von Längen- und Breitengraden. Es ist zu beachten, dass die abgedeckte Fläche je Datenpunkt, dadurch mit zunehmender Entfernung vom Äquator abnimmt. Es werden die lokalen Schwerpunkte in der geographischen Verteilung des Nachrichtenaufkommens entlang der zentralen Grenze zwischen den Lufträumen CZQX und EGGX ersichtlich, welche bedingt sind durch die Aktivierung und Beendigung von ADS-C Diensten und der Übergabe der ATS-Datenkommunikation zwischen den beteiligten Kontrollzentren. Dies ist konsistent mit den in Abbildung 7-14 und Abbildung 7-16 aufgeführten Ergebnissen für die Einzelanwendungen ADS-C (Start, Ende) und ACM.

7 Untersuchungsergebnisse

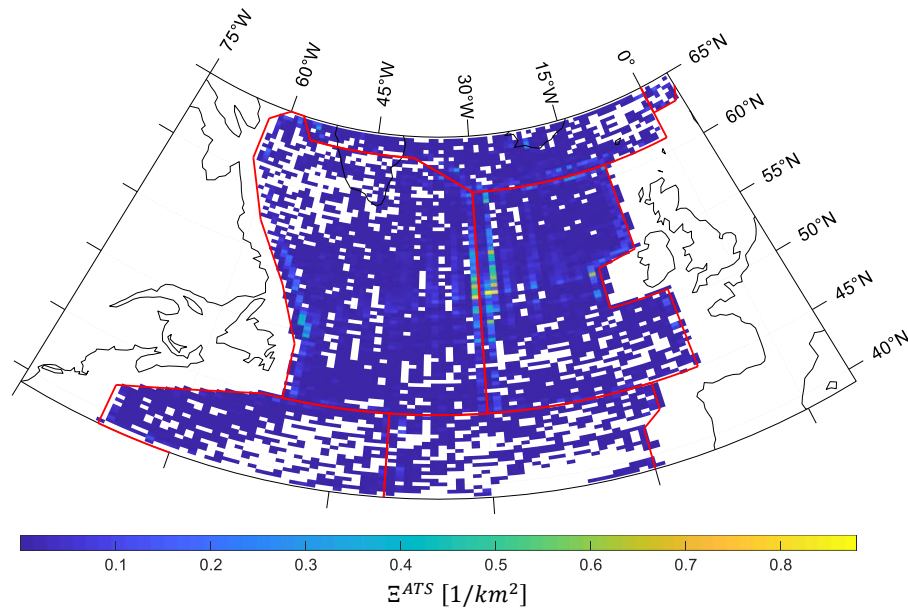


Abbildung 7-17: Geographische Verteilung des ATS-Nachrichtenaufkommens

Da für die Einzelnachrichten des ATS-Datenkommunikationsprofils gemäß Tabelle 6-4 aus Kapitel 6.4.1 überwiegend identische Datengrößen angenommen wurden, entspricht die aus der Verteilung der Einzelnachrichten resultierende geographische Verteilung des ATS-Datenvolumens in Abbildung 7-18 im Wesentlichen der Verteilung der Einzelnachrichten.

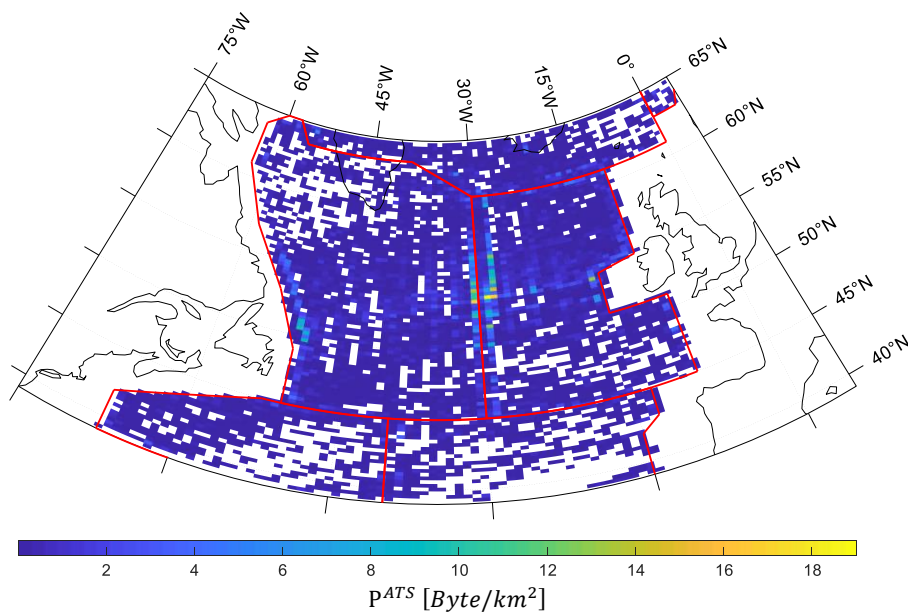


Abbildung 7-18: Geographische Verteilung des ATS-Datenvolumens [106]

7.2.5 Räumliche Verteilung der operationellen Luftfahrtkommunikation

Analog zu den in Kapitel 7.2.4 präsentierten Ergebnissen zur räumlichen Verteilung des Anwendungsfalls Flugführungskommunikation (ATS), wird in diesem Kapitel die räumliche Verteilung des Anwendungsfalls operationelle Luftfahrtkommunikation (AOC) zwischen Luftfahrzeug und Operationszentrale der Luftfahrtgesellschaft dargestellt. Aufgrund der großen Anzahl der zum Teil ähnlich ausgeprägten Einzelanwendungen beschränkt sich die Darstellung an dieser Stelle auf ausgewählte, repräsentative Einzelanwendungen sowie die aggregierte Darstellung des AOC-Gesamtdatenkommunikationsaufkommens. Für die vollständige Darstellung aller AOC-Einzelanwendungen wird auf den Anhang verwiesen (Abbildung A-2 bis Abbildung A-8). Allen AOC-Einzelanwendungen ist gemein, dass sie sich lediglich an bestimmten Zeitintervallen, Flugphasen oder Zufallsfaktoren orientieren und Luftraumgrenzen keinen Einfluss auf die Auslösung einzelner Anwendungen haben.

In Abbildung 7-19 ist die Einzelanwendung FLTSTAT (Flugstatusbericht) zu sehen, welche pro Flug innerhalb eines Intervalls von vier Stunden auf Grundlage einer Gleichverteilung jeweils einmal ausgelöst wird. Entsprechend orientiert sich die geographische Verteilung der Aktivierungen dieser Einzelanwendung vorwiegend an der Verteilung der modellierten Flüge mit einem Schwerpunkt in den zentralen NAT-Lufträumen CZQX und EGGX etwa im Bereich der 50° und 55° nördlichen Breitengrade.

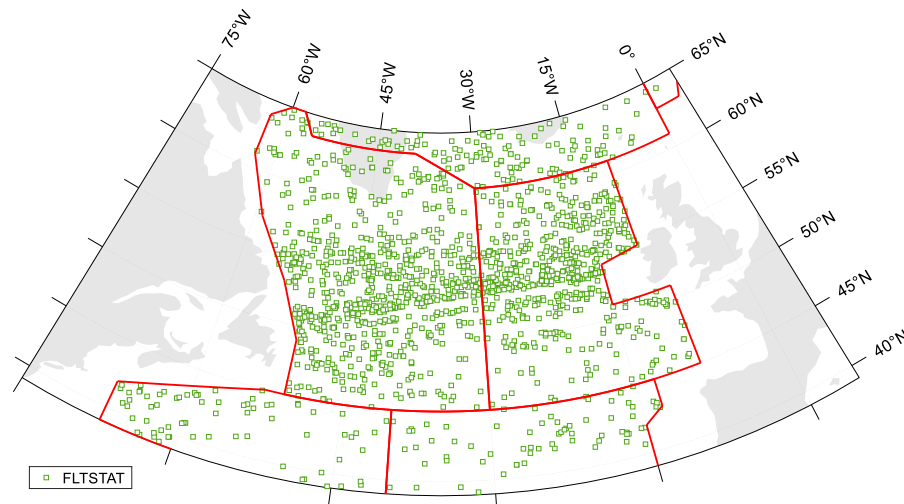


Abbildung 7-19: Geographische Verteilung der FLTSTAT-Aktivierungen

Abbildung 7-20 zeigt die geographische Verteilung der Einzelanwendung MAINTPR (Wartungs-Problembericht). Diese Einzelanwendung weist die Besonderheit auf, dass sie nur für 5% aller Flüge ausgelöst wird und dann eine Häufigkeit von einer Auslösung je Zeitintervall von vier Stunden aufweist. Entsprechend ist eine Häufung von MAINTPR-Aktivierungen in den Lufträumen CZQX und EGGX zu beobachten.

7 Untersuchungsergebnisse

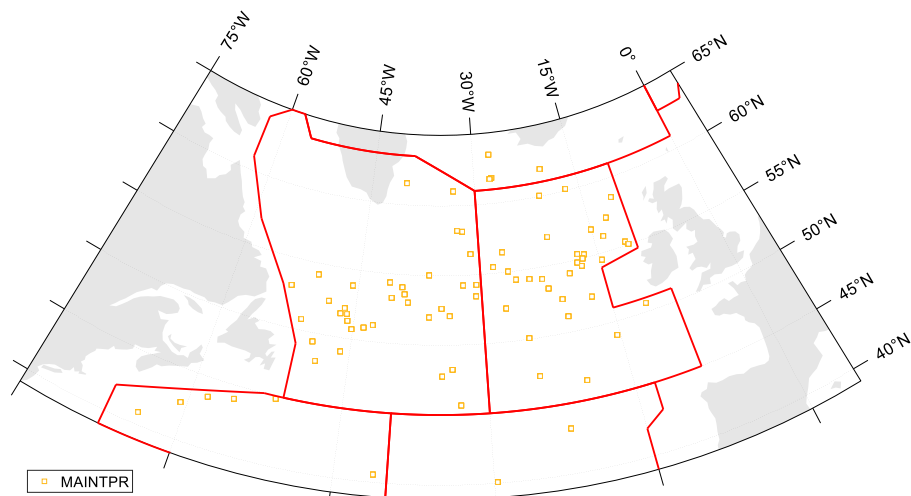


Abbildung 7-20: Geographische Verteilung der MAINTPR-Aktivierungen

Die AOC-Einzelanwendung POSRPT (Positionsbericht) ist in Abbildung 7-21 zu sehen. Diese macht entsprechend den in Kapitel 7.2.2 aufgeführten Ergebnissen den drittgrößten Anteil an der Zahl der Einzelnachrichten aus, sowohl bezogen auf den Anwendungsfall AOC als auch auf das Gesamtszenario aus ATS und AOC Datenkommunikation. Da POSRPT für alle simulierten Flüge bei Eintritt in den ozeanischen Luftraum periodisch alle 900 s eine Nachricht generiert, orientiert sich die Verteilung an den zugrunde liegenden Mobilitätsdaten.

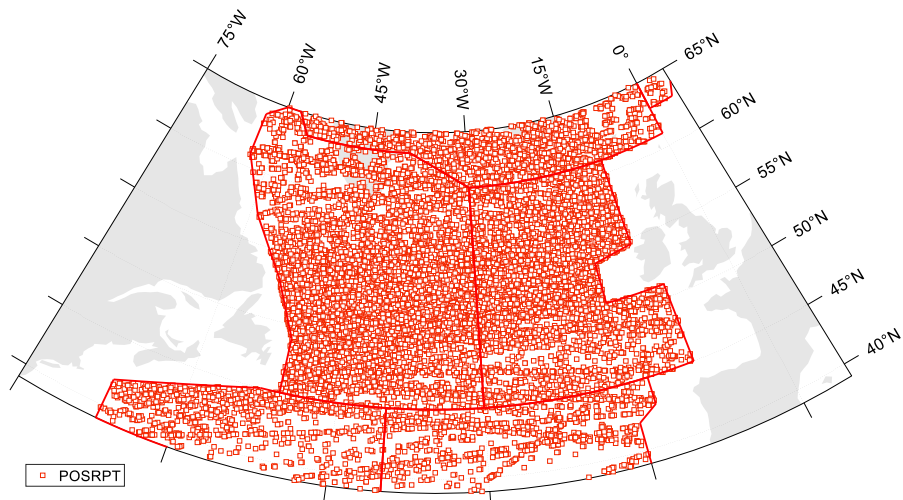


Abbildung 7-21: Geographische Verteilung der POSRPT-Aktivierungen

Eine besondere Rolle kommt der AOC-Einzelanwendung WXGRAPH (grafische aufbereitete Wetterinformationen) zu, welche wie in Kapitel 7.2.2 dargestellt sowohl einen Großteil der erzeugten Einzelnachrichten als auch den überwiegenden Teil des damit verbundenen Datenvolumens ausmacht. WXGRAPH wird entsprechend den in Kapitel 6.4.2 dargelegten Modellierungsannahmen mit Eintritt eines Fluges in den ozeanischen Luftraum mit einer Frequenz von 2400 s ausgelöst, was zu dem in Abbildung 7-22 dargestellten Resultat führt. Aufgrund der ähnlichen Geschwindigkeiten der simulierten Luftverkehrsteilnehmer ergeben

sich insbesondere in den zentralen Lufträumen CZQX und EGGX lokale wellenartige Häufungen der WXGRAPH Aktivierungen in Nord-Süd-Richtung aufgrund des Aktivierungsintervalls von 40 Minuten nach Eintritt in den ozeanischen Luftraum. Zusätzlich ist analog zur Verteilung des simulierten Luftverkehrs eine weitere Verdichtung der WXGRAPH-Aktivierungen im Bereich der geographischen Breitengrade um 50° bis 55° Nord zu beobachten.

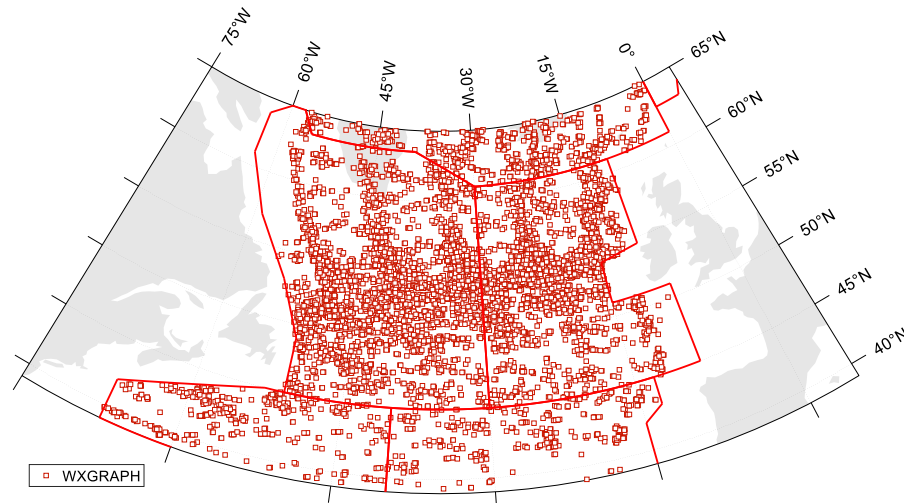


Abbildung 7-22: Geographische Verteilung der WXGRAPH-Aktivierungen

Eine Darstellung des kumulierten AOC-Nachrichtenaufkommens je Fläche ergibt das in Abbildung 7-23 dargestellte Ergebnis. Ersichtlich ist zum einen eine Häufung der Nachrichten entlang der Flugtrajektorien aufgrund von Einzelanwendungen mit hoher Aktivierungsfrequenz (z.B. POSRPT, WXRT, vgl. Tabelle 6-5) und zum Anderen das Verteilungsmuster der Einzelanwendung WXGRAPH wie im zuvor dargestellt, welches zu lokalen Häufungen in Nord-Süd Richtung in den zentralen Lufträumen CZQX und EGGX führt. Hierbei ergibt sich ein Wert von etwa 0,3 AOC-Nachrichten pro Quadratkilometer im zentralen Bereich zwischen den geographischen Breitengraden 50° und 55° Nord.

Die geographische Verteilung des aus den AOC-Einzelanwendungen resultierenden Datenaufkommens ist in Abbildung 7-24 erfasst. Durch das große Datenvolumen der WXGRAPH Einzelanwendung dominiert hier die von dieser aufgeprägte geographische Verteilung welche in der Ergebnisdarstellung in Abbildung 7-22 ersichtlich ist. Dies führt zu den bereits oben genannten lokalen, wellenartigen Konzentrationen des Datenkommunikationsbedarfes in Nord-Süd Richtung mit lokalen Höchstwerten von bis zu 2.432 Byte pro Quadratkilometer.

7 Untersuchungsergebnisse

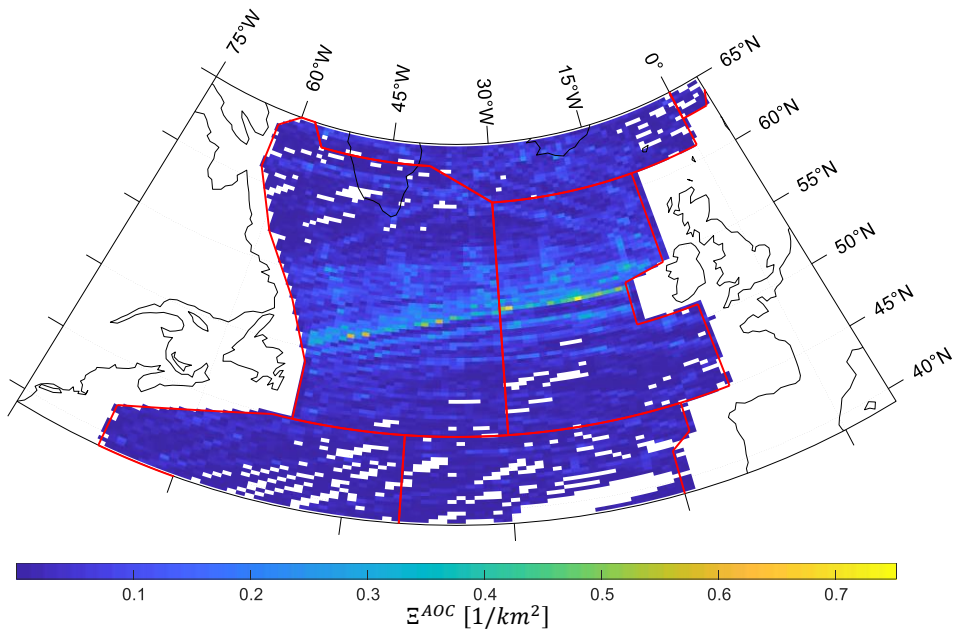


Abbildung 7-23: Geographische Verteilung des AOC-Nachrichtenaufkommens

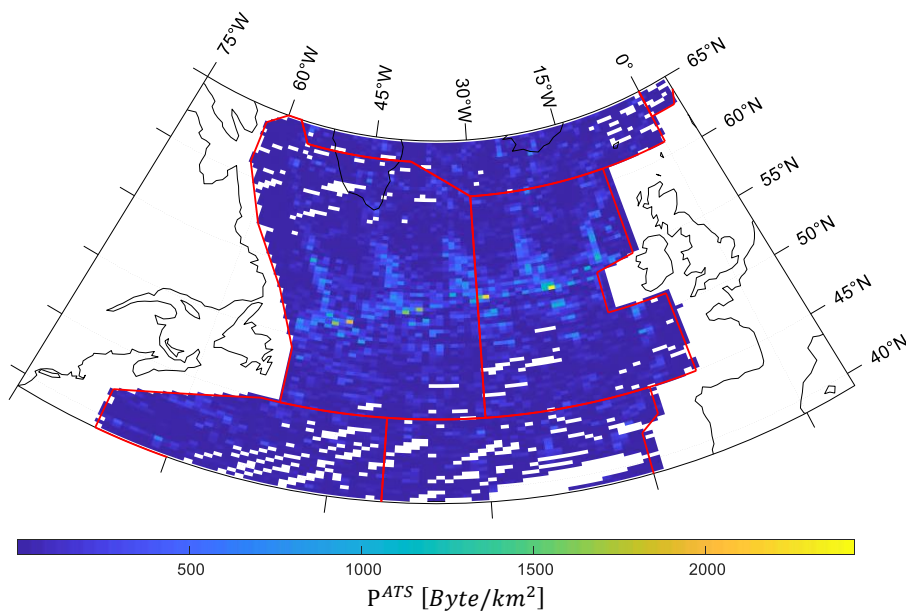


Abbildung 7-24: Geographische Verteilung des AOC-Datenvolumens [106]

7.3 Abdeckung des Kommunikationsbedarfs

Wesentliche Kenngröße für den Nutzwert der untersuchten Datenlinktechnologie für den Anwendungsfall Luftfahrt Datenkommunikation ist der Anteil des gesamten Kommunikationsbedarfs im betrachteten Szenario, welcher mittels dieser Technologie übertragen werden kann. Wie in Kapitel 6.5.2 aufgeführt, wird dies durch die

Kommunikationsbedarfsabdeckung F beschrieben. Ergebnisdaten für das hier untersuchte Szenario werden nachfolgend in Kapitel 7.3.3 präsentiert.

Weiterhin für die technische Auslegung und Realisierung relevant ist die Identifikation der Kernauslegungsparameter Kommunikationsreichweite, r_a , und Datenübertragungsrate δ . In Kapitel 7.3.1 wird hierzu zunächst die Datenrate innerhalb eines *Clusters* im Zeitverlauf dargestellt und in Kapitel 7.3.2 die resultierende Datenrate an den Luftfahrzeugen innerhalb eines *Clusters*, welche die Verbindung mit der Kommunikationsinfrastruktur am Boden herstellen.

7.3.1 Cluster-Datenrate

Abbildung 7-25 zeigt den Zeitverlauf der *Cluster*-Datenrate δ_{CL} für die Beispielkonfiguration A, welche repräsentativ für ein Szenario mit reichweitenstarkem Datenlink und hohem Einführungsgrad der Luftverkehrsteilnehmer steht. Die Lebensdauer des *Clusters* erreicht bis zu 12 Stunden mit über 200 Luftfahrzeugen, welche zur gleichen Zeit Anwendungen der Datenkommunikation nutzen. Die Anzahl der Luftfahrzeuge, welche eine Verbindung zur Bodeninfrastruktur herstellen (*Gateways*), liegt im Zeitfenster von 270 Minuten bis 400 Minuten der *Cluster*-Lebensdauer für Zeiträume von etwa 20 Minuten bis 40 Minuten zeitweise bei über 50. Die *Cluster*-Datenrate δ_{CL} erreicht Spitzenwerte von bis zu 230 kbit/s. Der von Anfangs- und Endphase abgesehene kontinuierliche Verlauf von n_{GW} und n_{AC} impliziert neben der langen *Cluster*-Lebensdauer eine hohe Stabilität des *Clusters* ohne signifikante Abspaltungs- und Fusionsereignisse.

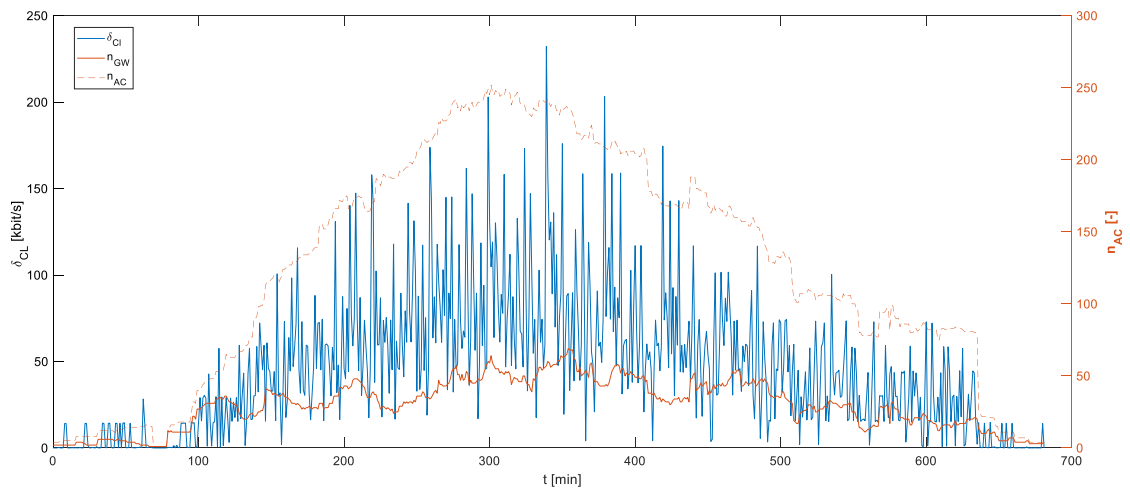


Abbildung 7-25: Cluster-Datenrate (δ_{CL}) im Zeitverlauf, Konfiguration A [150]

In Abbildung 7-26 wird der Zeitverlauf von δ_{CL} für Beispielkonfiguration B gezeigt. Diese steht repräsentativ für den Fall eines weniger reichweitenstarken Datenlinks bei hohem Ausstattungsanteil der Luftverkehrsteilnehmer. Hierbei wird eine *Cluster*-Lebensdauer von 140 Minuten erreicht bei Werten der Cluster-Datenrate (δ_{CL}) von über 85 kbit/s. Die Anzahl der gleichzeitig sendenden oder empfangenden Luftfahrzeuge im *Cluster*, n_{AC} , bleibt unter 120 und n_{GW} erreicht im Maximum 17 Luftfahrzeuge. Das Cluster zerfällt nach 140 Minuten, da zu diesem Zeitpunkt das einzige verbleibende *Gateway*-Luftfahrzeug die

7 Untersuchungsergebnisse

Bodenkonnektivität verliert und das *Cluster* somit nur noch als reines Netzwerk von untereinander bestehenden Luftfahrzeugen ohne Bodenkonnektivität weiterbesteht. Für die hier untersuchten Anwendungsfälle, welche ausschließlich die Luft-Boden-Kommunikation adressieren, endet die relevante *Cluster*-Lebensdauer daher beim Zeitpunkt 140 Minuten. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass der nach diesem Zeitpunkt weiterbestehende Verbund an vernetzten Luftfahrzeugen zu einem späteren Zeitpunkt wieder eine Bodenkonnektivität herstellen kann. Das dann wieder bestehende *Cluster* würde aber als eigenständiges *Cluster* angesehen und in der Ergebnisauswertung berücksichtigt.

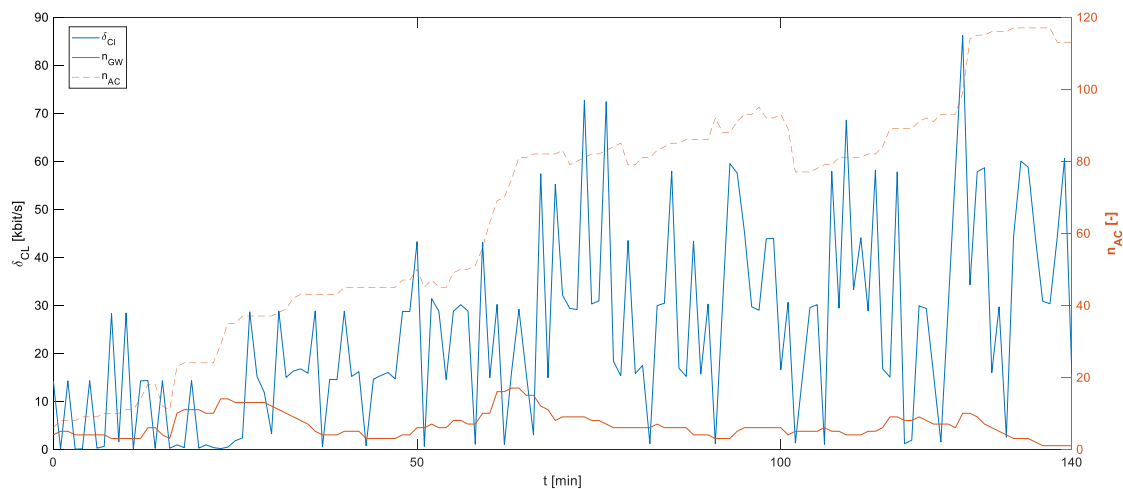


Abbildung 7-26: δ_{CL} im Zeitverlauf, Konfiguration B [150]

Der Zeitverlauf für δ_{CL} in Beispielkonfiguration C, welche repräsentativ für die fortgeschrittene Einführungsphase eines reichweitenstarken Datenlinks steht, ist in Abbildung 7-27 dargestellt. Hierbei erreicht δ_{CL} Werte von bis zu 370 kbit/s bei Werten von n_{GW} und n_{AC} von jeweils bis zu 120, bzw. bis zu 25. Die Lebensdauer des *Clusters* beträgt über 570 Minuten, was den Zeitraum eines Atlantiküberfluges eines Luftverkehrsteilnehmers prinzipiell abdecken kann.

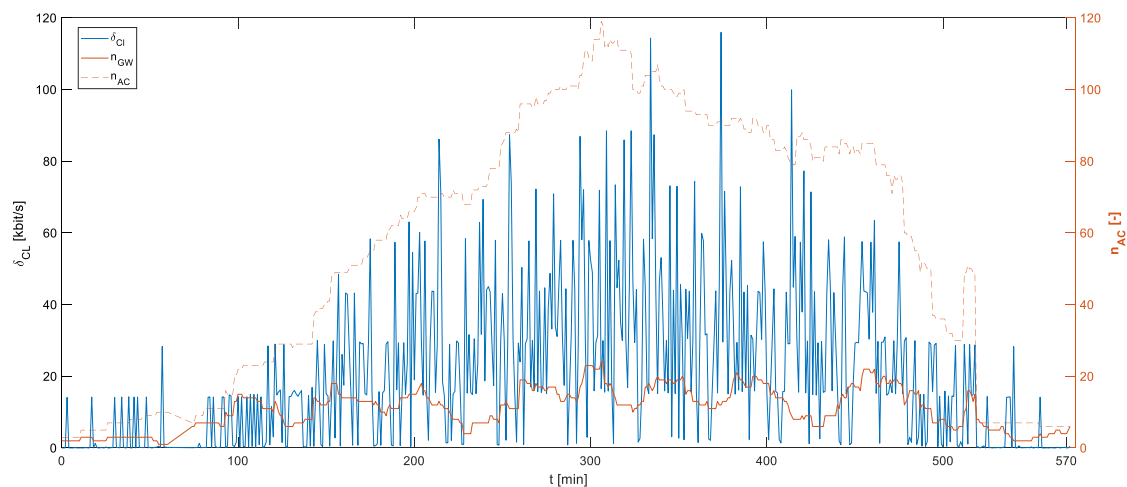


Abbildung 7-27: δ_{CL} im Zeitverlauf, Konfiguration C [150]

In Abbildung 7-28 schließlich ist δ_{CL} im Zeitverlauf der *Cluster*-Lebensdauer in der Beispielkonfiguration *D* dargestellt. Diese stellt ein repräsentatives Beispiel für ein Szenario mit fortgeschrittener Einführung eines Datenlinks und 40% ausgestatteten Luftverkehrsteilnehmern sowie mit limitierter Reichweite von 150 km dar. Die Lebensdauer des dargestellten *Clusters* beträgt 45 Minuten und δ_{CL} erreicht Höchstwerte von weniger als 30 kbit/s. Die Anzahl der gleichzeitig Daten übertragenden Luftfahrzeuge n_{AC} erreicht im Höchstwert 32, während die Anzahl der *Gateway*-Luftfahrzeuge n_{GW} zwischen 1 und dem kurzzeitigen Höchstwert 4 schwankt.

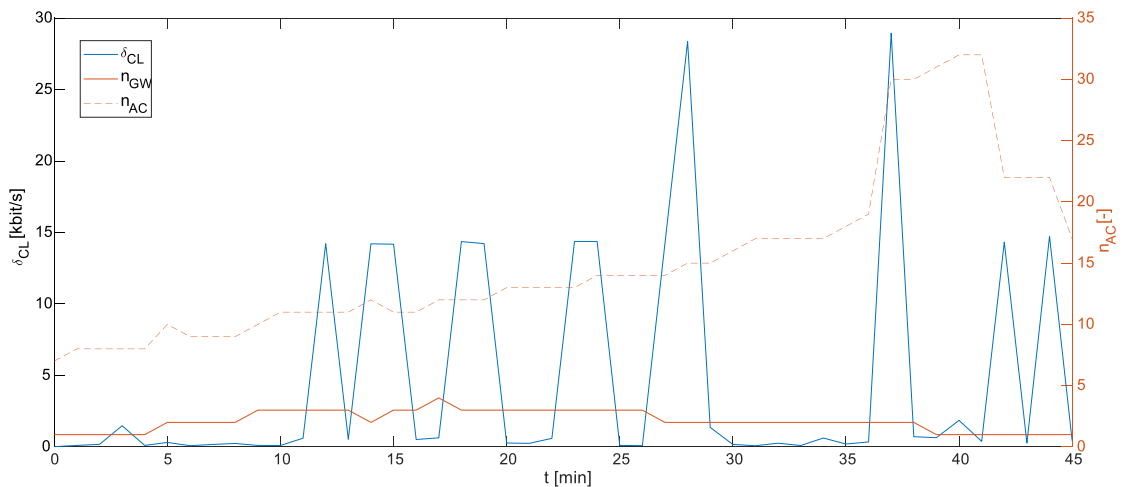


Abbildung 7-28: δ_{CL} im Zeitverlauf, Konfiguration D

7.3.2 Gateway-Datenrate

Unter der Annahme, dass sich der mit δ_{CL} beschriebene, im *Cluster* anfallende Datenkommunikationsbedarf zu gleichen Teilen auf die zum jeweiligen Zeitpunkt zur Verfügung stehenden *Gateways* verteilt, wird die *Gateway*-Datenrate ermittelt. Entsprechend den in Kapitel 6.5.3 aufgeführten Definitionen werden an dieser Stelle die Ergebnisse für die mittlere *Gateway*-Datenrate $\bar{\delta}_{GW}$ und die 99-Perzentil *Gateway*-Datenrate $\delta_{0,99,GW}$ aufgeführt.

In Abbildung 7-29 wird $\bar{\delta}_{GW}$ über den Variationsbereich der Parameter e_f und r_a dargestellt. Die höchsten Werte für $\bar{\delta}_{GW}$ von über 2.300 bit/s werden in Bereichen von r_a zwischen 135 km und 165 km und e_f größer als 0,8 erreicht. Mit zunehmenden Werten für r_a nimmt $\bar{\delta}_{GW}$ ab und erreicht Werte von unter 1.100 bit/s für die höchsten betrachteten Kommunikationsreichweiten von 400 km bis 420 km. Ein weiteres lokales Maximum besteht im Bereich um $e_f = 0,2$ und $r_a = 30$ km. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass in Bereichen mit solch geringer Konnektivität nur wenige Datenpunkte für $\bar{\delta}_{GW}$ bestehen und bereits wenige Einzelwerte das Mittel der Datenübertragungsrate $\bar{\delta}_{GW}$ deutlich beeinflussen können.

7 Untersuchungsergebnisse

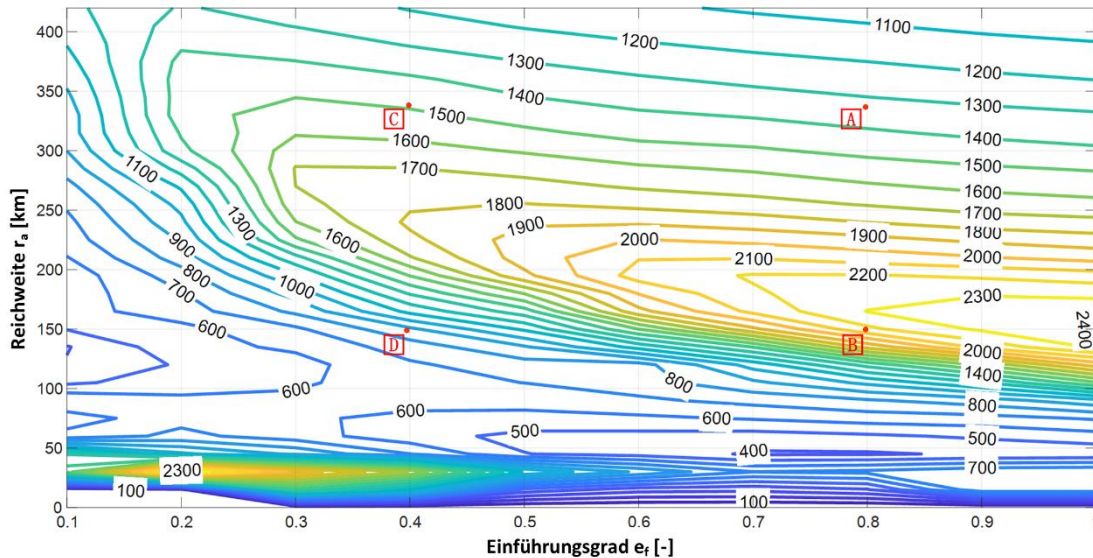


Abbildung 7-29: Mittlere Gateway-Datenrate ($\bar{\delta}_{GW}$) [bit/s] über e_f und r_a [150]

Die Ergebnisse für $\delta_{0.99,GW}$, welche in Abbildung 7-30 dargestellt sind, zeigen einen ähnlichen Trend bezüglich der Höchstwerte wie die zuvor präsentierten Ergebnisse für $\bar{\delta}_{GW}$. Es werden Höchstwerte von über 24.000 bit/s bei $e_f > 0,8$ und r_a zwischen 100 km und 150 km erreicht. Unterhalb dieses Bereiches und in einem schmalen Band in r_a -Richtung oberhalb dieses Bereiches bleibt $\delta_{0.99,GW}$ um dann mit steigenden Werten für r_a abzusinken. Bei den in der Analyse gewählten Höchstwerten für e_f und r_a von 1.0 und 420 km wird ein lokales Minimum von 3.000 bit/s erreicht.

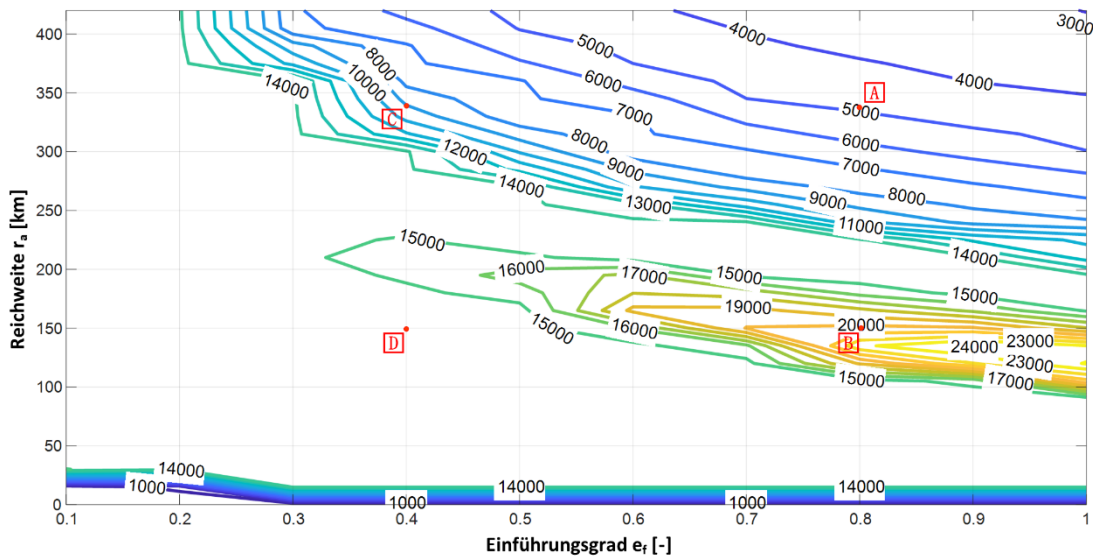


Abbildung 7-30: 99-Perzentil Gateway-Datenrate [bit/s] ($\delta_{0.99,GW}$) über e_f und r_a [150]

7.3.3 Abdeckung Kommunikationsbedarf

Die Abdeckung des Kommunikationsbedarfes $\bar{F}$ bzw. ihr über die Stichprobenanzahl der einzelnen Variationen innerhalb eines Szenarios gemittelter Wert $\bar{F}$ stellen eine zentrale Kenngröße des Nutzwertes der untersuchten Datenlinktechnologie dar. Abbildung 7-31 zeigt $\bar{F}$ über den gesamten Variationsbereich von r_a und e_f . Die zugrunde liegenden Datenstützpunkte sind entsprechend den in Tabelle 6-2 ausgewiesenen Diskretisierungsschritten gerastert. Die Anzahl der Datenpunkte pro Stützstelle entspricht dabei der Anzahl der Variationen je Stützstelle. Dies sind 100 Variationen für Stützstellen im Bereich $0 \leq e_f \leq 0,9$ und 10 Variationen für $e_f = 1,0$. Die zugehörigen Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle sind im Anhang in Abbildung A-3 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass für Werte von $r_a > 360 \text{ km}$ und $e_f > 0,7$ unter den vorausgesetzten idealisierten Annahmen für Netzwerkaufbau und Datenübertragung eine mittlere Abdeckung des Datenkommunikationsbedarfs aus AOC und ATS-Anwendungen von größer 0,85 erreicht wird. Weiterhin treten mit zunehmenden Werten für r_a und e_f deutliche Sättigungseffekte auf. Während z.B. eine Reichweitensteigerung von 100 km auf 250 km bei $e_f = 1,0$ eine Steigerung von $\bar{F}$ von 0,1 auf über 0,65 mit sich bringt, lässt sich durch eine weitere Reichweitensteigerung um weitere 150 km auf 400 km nur noch eine Steigerung von $\bar{F}$ von 0,65 auf über 0,85 erreichen. Unterhalb von 100 km ist abhängig von e_f nur eine Abdeckung des Kommunikationsbedarfs von 0,005 bis zu 0,1 erreichbar. Bezüglich der Variation von e_f bei feststehender Reichweite r_a ist ebenfalls ein geringerer Zuwachs von $\bar{F}$ für die oberen Wertbereiche von e_f zu beobachten. So wird z.B. bei $r_a = 300$ bereits bei $e_f = 0,4$ eine mittlere Kommunikationsbedarfsabdeckung $\bar{F}$ von 0,6 erreicht. Diese steigert sich bei weiterer Erhöhung des Einführungsgrades e_f auf 1,0 lediglich auf über 0,8. Bei Variation von r_a verschieben sich die notwendigen Werte von e_f und erreichbaren Werte für $\bar{F}$ entsprechend.

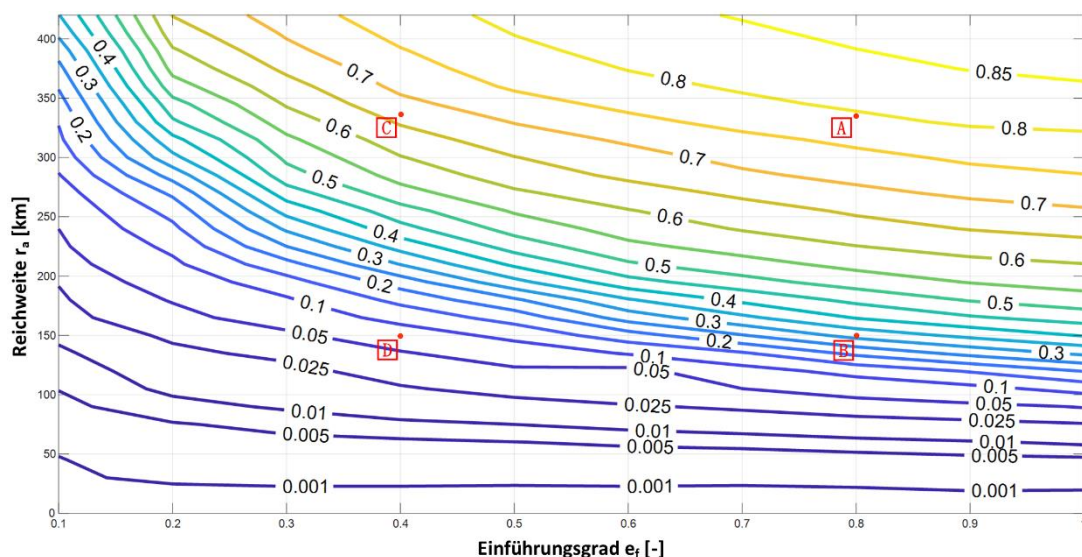


Abbildung 7-31: Mittlerer Anteil an übertragenem ATS und AOC Datenvolumen [-] ($\bar{F}$) [150]

8 Ergebnisdiskussion

Die Diskussion der in Kapitel 7 präsentierten Ergebnisse erfolgt in Kapitel 8.1 in einer zusammenfassenden Übersicht der zentralen Ergebnisse. Anschließend wird in Kapitel 8.2 eine Bewertung der zugrunde liegenden Methode vorgenommen. Eine Einordnung bezüglich Aussagekraft und Anwendbarkeit der präsentierten Ergebnisse findet sich in Kapitel 8.4 und mit Bezug auf den verwendeten Nutzwert in Kapitel 8.5. Anschließend wird in Kapitel 8.2 eine Empfehlung für die Kernauslegungsparameter Kommunikationsreichweite und Datenübertragungsrate vorgenommen.

8.1 Ergebnisübersicht

Als zentrales Ergebnis lässt sich herausstellen, dass durch ein AANET, welches durch die untersuchte Beispieltechnologie eines LDACS Luft-Luft-Datenlinks ermöglicht wird, ein deutlicher Mehrwert im Bereich der Luftfahrt Datenkommunikation erzeugt werden kann. Der hierfür als Maßgabe herangezogene Nutzwert F , welcher die Abdeckung des Datenkommunikationsbedarfs durch das AANET beschreibt, erreicht für die maximale untersuchte Kommunikationsreichweite ($r_a = 420 \text{ km}$) und Ausstattung aller Verkehrsteilnehmer (d.h. $e_f = 1$) Werte von über 85%. Somit könnten je nach Einbindungsart eines LDACS-AANETs in die Multilink-Kommunikationsumgebung ein großer Anteil der Datenkommunikation kostengünstiger, zuverlässiger oder laufzeitoptimiert übertragen werden.

Ausschlaggebend hierbei ist der Kernparameter der Kommunikationsreichweite des Luft-Luft-Datenlinks, r_a . Bei geeigneter Wahl der Reichweite für die Luft-Luft-Kommunikation (z.B. 330 km, Beispielkonfigurationen A und C) lässt sich bereits bei einer geringen Anzahl von mit der Kommunikationstechnologie ausgestatteten Luftverkehrsteilnehmern (d.h. geringem Einführungsgrad e_f) der überwiegende Anteil ihres Kommunikationsbedarfs über das AANET übertragen. Dieser Effekt wird z.B. in [171] aufgrund analytischer Betrachtungen als charakteristisch für mobile ad-hoc Netzwerke beschrieben.

Dies ist von erheblichem Vorteil für die Übertragung der in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse auf andere potentielle Einsatzszenarien, da der Nutzwert des AANETs nicht in erster Linie auf ein hohes Luftverkehrsaufkommen angewiesen ist. So könnte beispielsweise auch im pazifischen ozeanischen Luftraum bei geringerem und stärker verteiltem Verkehrsaufkommen als im Nordatlantik eine signifikante Kommunikationsbedarfsabdeckung erreicht werden. Zudem erhöht dieser Effekt den Nutzwert, welchen die ersten Anwender der Datenlinktechnologie aus derselben ziehen könne.

Bei der Wahl der Kommunikationsreichweite für den Luft-Luft-Datenlink ist ein wie nachfolgend beschrieben ausreichend hoher Wert zu wählen, um auch bei geringen Einführungsgraden bereits einen signifikanten Nutzwert für die ersten Anwender der Technologie zu erzielen und hohe Datenübertragungsraten an Schlüsselstellen des AANETs sowie lange Übertragungsketten zu vermeiden. Welcher Nutzwert für einen Technologieanwender bereits signifikant genug ist, um die Nutzung der Datenlinktechnologie zu motivieren, ist in einer separaten ökonomischen Betrachtung im Detail zu ermitteln. Je nach Kosten für Betrieb und Einrüstung des Datenlinks, sowie des erzielten Kostenvorteils gegenüber der

Nutzung von alternativen Kommunikationstechnologien (z.B. Satelliten-Datenlink), sind hier unterschiedliche Schwellwerte relevant. Bezogen auf die Beispielkonfigurationen sollten die Kommunikationsreichweite von 330 km der Konfigurationen *A* und *C* den 150 km Kommunikationsreichweite der Konfigurationen *B* und *C* vorgezogen werden. In diesem Fall können bereits bei nur 20% ausgestatteten Luftverkehrsteilnehmern bis zu 50% ihres Kommunikationsbedarfs über das AANET übertragen werden. Detailliertere Betrachtungen hierzu werden in Kapitel 8.5 bezüglich des Einflusses des zu erwartenden Ausstattungsgrades e_f und in Kapitel 8.2 zur Auswahl der Kernparameter in Abhängigkeit von anderen Einflussgrößen vorgenommen.

Als Indikatoren für die zu erwartende, mit dem AANET erreichbare Kommunikationsbedarfsabdeckung können die Luftkonnektivität (α) und die Bodenkonnektivität (γ) angesehen werden. Durch die Gewichtung einzelner geographischer Regionen oder zeitlicher Abschnitte mittels Kommunikationsbedarfsprofilen, werden die für die Konnektivität im Maximum erreichten Werte um circa 0,1 herabgesetzt. Bei stärker ausgeprägten zeitlichen und geographischen Heterogenitäten im Kommunikationsbedarfsprofil sind ggf. stärkere Abweichungen zu erwarten.

Die mittlere Anzahl der möglichen Verbindungen mit anderen Luftfahrzeugen steigt erwartungsgemäß mit zunehmender Kommunikationsreichweite r_a und Einführungsgrad e_f und erreicht für das in dieser Arbeit analysierte operationelle Szenario Spitzenwerte einer mittleren Zahl von 22 Luftfahrzeugen in Kommunikationsreichweite. Sofern dies aufgrund des erhöhten Koordinierungsaufwand zwischen den einzelnen Netzwerkknoten im AANET ein Erschwernis für den Aufbau des Kommunikationsnetzes und den weiteren Informationsaustausch darstellen sollte, ist dieses bei der Wahl der Auslegungsreichweite limitierend zu berücksichtigen. Hierbei ist zu beachten, dass die Anzahl der möglichen Verbindungen zu anderen Luftfahrzeugen stark von der Verkehrsdichte und der Verteilung des Luftverkehrs im Luftraum abhängig ist und somit in anderen Lufträumen entsprechend der Variation dieser beiden Parameter von den hier dargestellten Ergebnissen abweichen wird.

Abgesehen von der Motivation einen bestimmten Nutzwert zu erzielen, liefert der Kernauslegungsparameter Datenrate in Form der *Gateway*-Datenrate δ_{GW} einen Anhaltspunkt für die mindestens erforderliche Kommunikationsreichweite r_a . So sind bei der Beispielkonfiguration *C* und in den angrenzenden Wertebereichen für die Kommunikationsreichweite r_a deutlich erhöhte Datenraten zu beobachten, als dies für die Beispielkonfiguration *A* der Fall ist.

Dies ist in Bezug zu setzen zu dem beobachteten Verhalten für die mittlere Anzahl an *Gateways* je *Cluster* mit Bodenkonnektivität GPN' , welche für den Bereich der Beispielkonfiguration *C* einen geringeren Wert als die angrenzenden Gebiete ausweist.

Ein weiterer relevanter Faktor für die Auswahl der Kommunikationsreichweite ist die mittlere Länge der Übertragungskette $\bar{N}_h$, welche ein Indikator für die zu erwartende Übertragungslatenz im AANET ist. $\bar{N}_h$ erreicht die höchsten Werte für Kommunikationsreichweiten r_a um 180 km.

Weiterhin wird die mittlere Verbindungsdauer von der Kommunikationsreichweite beeinflusst. Für die betrachteten Beispielkonfigurationen *A* bis *D* werden hier Werte von 75 bis 105 Minuten zu erwarten, was in beiden Fällen als ausreichender Wert für den Verbindungsaufbau und die Netzwerkstabilität angesehen werden kann.

8.2 Empfehlung für die Wahl der Kernparameter

Die Auswahl der wesentlichen technischen Parameter Reichweite und notwendige Datenrate kann auf der Grundlage der in Kapitel 7.3 präsentierten Ergebnisse erfolgen. Zu berücksichtigen sind hierbei die in Kapitel 8.4 beschriebenen Rahmenbedingungen und Einschränkungen hinsichtlich der mit der vollständig entwickelten und implementierten Kommunikationstechnologie, welche geringere tatsächliche Kommunikationsbedarfsabdeckungen und höhere Datenraten zur Folge haben können.

Die Ergebnisse liefern die Grundlage für eine Verknüpfung eines Mindest- bzw. Zielnutzwertes, welches in diesem Fall die Kommunikationsbedarfsabdeckung ist, mit zentralen Auslegungsparametern für den untersuchten Luftfahrt Datenlink LDACS A2A, der Kommunikationsreichweite und der erforderlichen Datenübertragungsrate. Als Rahmenbedingung ist dabei der Einführungsgrad der Luftverkehrsteilnehmer mit der neuen Kommunikationstechnologie zu berücksichtigen. Hierbei sind insbesondere die Rahmenbedingungen bei der Technologieeinführung zu beachten, welche in Kapitel 2.3 beschrieben werden. Als Stellgröße ist dabei die Kommunikationsreichweite anzusehen, deren Wahl die erreichbare Kommunikationsbedarfsabdeckung und die resultierenden Datenraten bei variierendem Einführungsgrad gemäß Einführungsszenario bedingt. Der Einführungsgrad unterliegt dabei einer durch das Einführungsszenario (siehe Kapitel 2.3) bedingten Dynamik. Durch eine geeignete Wahl der Kommunikationsreichweite können folgende Ziele erreicht werden:

- ❖ Erreichung eines relevanten Nutzwertes F schon bei geringen Einführungsgraden e_f , um die Einrüstung der neuen Technologie bereits für frühzeitige Anwender attraktiv zu gestalten und eine Nutzung in Lufträumen mit geringerer Verkehrsdichte zu ermöglichen;
- ❖ Erreichung eines möglichst hohen Nutzwertes F bei Abschluss der Technologieeinführung und hohen Einführungsgraden e_f , um mit dem AANET eine möglichst zuverlässige Alternative zu bestehenden Kommunikationsmitteln (Satellit, HF) darzustellen;
- ❖ Vermeidung von hohen mittleren Datenraten $\bar{\delta}_{GW}$ an den zentralen Netzknoten des AANETs;
- ❖ Vermeidung von hohen 99-Perzentil-Datenraten $\delta_{0.99,GW}$ an den zentralen Netzknoten des AANETs;
- ❖ Vermeidung ungünstiger Netzwerktopologien mit langen Übertragungsketten ($\bar{N}_h$), kürzeren Verbindungsdauern und geringer Zahl von Gateways pro Cluster mit Bodenkonnektivität (GPC');
- ❖ Vermeidung von hohem Koordinierungsaufwand im AANET aufgrund einer hohen Anzahl von möglichen Kommunikationspartnern in Reichweite ($\bar{N}_c$);

- ❖ Erzielung eines möglichst hohen Kosten-Nutzen-Verhältnisses bei der Vermeidung von hohen Kommunikationsreichweiten mit nur geringer Nutzwertsteigerung.

Die Berücksichtigung der beiden letztgenannten Ziele durch Wahl einer geringeren Kommunikationsreichweite geht mit einer Erleichterung der technologischen Umsetzung einher. Dies steht dabei potentiell in Konkurrenz mit den anderen zuvor genannten Zielen, welche sich wie an den Ergebnissen in Kapitel 7.3 ersichtlich durch Wahl einer möglichst hohen Kommunikationsreichweite erreichen lassen. In [150] wurde hierzu eine Kommunikationsreichweite von mindestens 250 km als geeignet vorgeschlagen, welche die bei geringeren Reichweiten auftretenden Maximalwerte in den Datenübertragungsraten vermeidet und Kommunikationsbedarfsabdeckungen von über 65% bei vollständiger Einführung der Technologie ermöglicht. Nachteilig ist diese Reichweite lediglich hinsichtlich des erzielbaren Mehrwerts für frühzeitige Nutzer. So ist bei einem Einführungsgrad von 0,2 nur eine Kommunikationsbedarfsabdeckung von bis zu 15% durch das AANET erreichbar. Die resultierenden Nutzwerte und Datenraten für ausgewählte Auslegungsreichweiten sind in Tabelle 8-1 aufgeführt. Hierbei wird der in [150] vorgeschlagene Wert für die Auslegungsreichweite jeweils einem höheren und einem niedrigeren Wert gegenübergestellt. Der Einführungsgrad kann dabei auch übertragen werden auf Szenarien mit teilweiser Ausstattung der Luftverkehrsteilnehmer, bei denen z.B. nur die Luftfahrzeugflotte einer einzelnen Fluggesellschaft oder einer einzelnen Luftfahrtallianz ausgestattet werden. Eine Fluggesellschaft, bzw. Luftfahrtallianz, deren Anteil an den Flugbewegungen im nordatlantischen Luftraum bezogen auf das in dieser Arbeit betrachtete Referenzszenario von 2019 beispielsweise bei 20% liegt kann bei einer Datenlinkreichweite von 250 km nur mit einer Kommunikationsbedarfsabdeckung von 15% rechnen. Bei einer Datenlinkreichweite von 350 km werden bei gleicher Anzahl an Flugbewegungen bereits 50% des Kommunikationsbedarfs abgedeckt.

Tabelle 8-1: Auslegungsparameter und Nutzwert

Auslegungsreichweite r_a [km]	Nutzwert F Frühe Nutzer ($e_f = 0,2$) [-]	Nutzwert F fortgeschrittene Einführung ($e_f = 0,8$) [-]	Maximale mittlere Datenrate $\bar{\delta}_{GW}$ [bit/s]	Maximale 99-Perzentil Datenrate $\delta_{0,99,GW}$ [bit/s]
150	0,025-0,05	0,4	2.400	20.000
250	0,15	0,65	1.800	14.000
350	0,5	0,8-0,85	1.400	14.000
420	0,65	0,85-0,9	1.300	14.000

Es wird ersichtlich, dass sich durch eine um 100 km größere Auslegungsreichweiten insbesondere der Nutzwert für die frühesten Nutzer (hier definiert als die ersten 20% der Nutzer) signifikant von 0,15 auf 0,5 steigern lässt. Der Nutzwert bei abgeschlossener Einführung mit einem Restbestand an nicht ausgestatteten Luftverkehrsteilnehmern (hier definiert als $e_f = 0,8$) steigert sich mit jeder Reichweitenerhöhung nach Tabelle 8-1 um 0,15 bis 0,25,

8 Ergebnisdiskussion

wobei der Zuwachs zwischen 150 km und 250 km am höchsten ausfällt. Bei einer Reichweitenmaximierung auf die maximal erreichbare Sichtreichweite von 420 km lassen sich gegenüber der nächstniedrigeren Stufe von 350 km nur noch geringe Zuwächse erreichen. In Anbetracht der potentiellen Schwierigkeiten in der technischen Umsetzung höherer Reichweiten wird daher auf Grundlage der hier dargestellten Ergebnisse eine Auslegungsreichweite von 250 km bis 350 km empfohlen. Die oben aufgeführte Empfehlung aus [150] stellt dabei die zur Erreichung der Nutzwerte notwendige Untergrenze zur Vermeidung von ungünstigen Konnektivitätskonditionen im AANET und daraus resultierender notwendiger Datenübertragungsraten dar. Tatsächlich sollte möglichst die Obergrenze des Auslegungsbereichs angestrebt werden, um einen möglichst hohen Nutzwert F zu erzielen. Bezogen auf die in Tabelle 7-1 aufgeführten Beispielkonfigurationen sind somit die Konfigurationen A und C den Konfigurationen B und D vorzuziehen. Die korrespondierenden Werte für die erforderliche Datenübertragungsrate sind 1.400 bit/s – 1.800 bit/s im Mittel und 14.000 bit/s zur Abdeckung von kurzzeitig auftretenden Übertragungsspitzen (99-Perzentil-Wert).

Tabelle 8-2: Empfohlener Auslegungsbereich und Konnektivität

Auslegungsreichweite r_a [km]	250	350
Luft-Luft-Konnektivität $1 - \bar{\alpha}_0$ [-]	0,8 – 0,9	0,9 – 0,95
Luft-Boden-Konnektivität $1 - \bar{\gamma}_0$ [-]	0,7 – 0,8	0,85 – 0,9
Verbindungsanzahl $\bar{N}_c$ [-]	4 – 8	6 – 12
Länge der Übertragungskette $\bar{N}_h$ [-]	2,5 – 2,75	2,5
Verbindungsdauer $\bar{D}$ [min]	95	110
Gateways pro Cluster GPC [-]	1 – 2,5	3 – 7
Gateways pro Netzwerkknoten GPN [-]	0,17 – 0,2	0,25
Gateways pro Netzwerkknoten mit Bodenkonnektivität $[GPN']$	0,39 – 0,4	0,4 – 0,41

Die sich bei dieser Reichweitenauswahl ergebenden weiteren Konnektivitätseigenschaften sind in Tabelle 8-2 aufgeführt. Die Werte beziehen sich jeweils auf Einführungsgrade von $e_f = 0,4$ bis $e_f = 0,8$, entsprechend den in den Beispielkonfigurationen gewählten Werten. Hierbei wird deutlich, dass bei dem unteren Wert für die empfohlene Auslegungsreichweite von 250 km gegenüber dem oberen Wert von 350 km bereits ähnliche Werte für die Luft-Luft-Konnektivität und die Luft-Boden-Konnektivität erreicht sowie die Länge der Übertragungskette und der Anzahl der Gateways pro Netzwerkknoten mit Bodenkonnektivität erreicht werden. Deutlichere Unterschiede sind hierbei bei der Verbindungsanzahl zu beobachten, welche sich mit der höheren Reichweite um ca. 50% steigert, während sich die Anzahl der Gateways pro Cluster verdreifacht. Weiterhin sind moderate Steigerungen bei der Verbindungsdauer und der Anzahl der Gateways pro Netzwerkknoten ersichtlich.

Hinsichtlich der hier getroffenen Auslegungsempfehlung ist somit insbesondere für den unteren Reichweitenbereich ab etwa 250 km während der mit geringeren Einführungsgraden verbundenen Einführungsphase der Datenlinktechnologie mit einer potentiell kritisch geringen Anzahl an *Gateways* je *Cluster* zu rechnen. Ist wie in Tabelle 8-2 ausgewiesen im Mittel nur ein *Gateway* pro *Cluster* vorhanden, besteht eine höhere Wahrscheinlichkeit, dass das gesamte *Cluster* aus der Bodenkonnektivität herausfällt. Für den oberen Reichweitenbereich der hier getroffenen Auslegungsempfehlung kommt es hingegen zu einer erhöhten Komplexität des AANETs und einem potentiell erhöhten Koordinierungsaufwand aufgrund der erhöhten Verbindungsanzahl.

8.3 Methodenbewertung

Die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik ermöglicht entsprechend der Zielsetzung aus Kapitel 1.2 die Auswahl wesentlicher Auslegungsparameter für eine Technologie zur Informationsübertragung mittels ad-hoc Netzwerken unter Berücksichtigung des Nutzwertes für den operationellen Betrieb im Lufttransportsystem. Hierbei wird die Lücke zwischen technologischer Systemauslegung und den Anforderungen des operationellen Einsatzszenarios im Datenlink-Entscheidungsrahmen geschlossen, wie in Kapitel 1.3 beschrieben. Das Vorgehen lässt sich dabei im Wesentlichen auf die Abbildung des operationellen Szenarios mittels Kommunikationsbedarfsmodellierung und die Abbildung der Kommunikationstechnologie mittels AANET Konnektivitätsmodellierung aufteilen. Die Ermittlung des Nutzwertes erfolgt dann durch eine Abbildung des Kommunikationsbedarfs auf die Ergebnisse der Konnektivitätsanalyse.

Das Modell zur Ermittlung des operationell bedingten Kommunikationsbedarfs liefert hierbei die Grundlage zur Berücksichtigung von Luftraumorganisation, operationellen Verfahren und Zusammensetzung der Luftverkehrsteilnehmer sowie deren Betreiber. Dies trifft in der hier vorgenommenen Implementierung vorwiegend auf das Modell der ATS-Kommunikation zu, welches die Luftraumstruktur des untersuchten nordatlantischen Luftraums, das Höhenveränderungsverhalten der beteiligten Luftverkehrsteilnehmer und die verfahrensbedingten Anforderungen an die Kommunikation berücksichtigt. Dadurch kann für den untersuchten Luftraum eine charakteristische Verteilung des Kommunikationsbedarfs ermittelt werden und der Einfluss bestimmter Flugverfahren auf den Kommunikationsbedarf ermittelt werden. Im konkreten hier betrachteten operationellen Szenario ist zudem eine teilweise Validierung des Kommunikationsverhaltens bezüglich der betrachteten ozeanischen Kontrollzonen möglich. Dies stellt einen deutlichen Mehrwert gegenüber den bisher bekannten Methoden dar (vgl. z.B. Tabelle 6-3). Die resultierende heterogene Verteilung des Kommunikationsbedarfs mit Bildung lokaler Schwerpunkte aufgrund der operationellen Randbedingungen ist eine Grundvoraussetzung für die Bewertungsfähigkeit des Nutzwertes eines AANETs mit seiner zeitlich und geographisch variierenden Kommunikationsabdeckung.

Die Konnektivitätsmodellierung ermöglicht die Betrachtung und Bewertung des AANETs und der zugrunde liegenden Datenlinktechnologie anhand von aggregierten Kennziffern für die Konnektivität im durch die Kernparameter aufgespannten Variationsraum. Notwendige Rahmendaten aus dem Lufttransportsystem sind die Flugbewegungen und die

8 Ergebnisdiskussion

Bodeninfrastruktur für die Datenkommunikation. Somit wird eine Ermittlung der verfügbaren Fähigkeiten des Systemverbundes aus vernetzten Luftfahrzeugen im AANET entsprechend dem in Kapitel 1.3 möglich. Weiterhin bietet die Konnektivitätsmodellierung die Grundlage für die Betrachtung weiterer AANET-Eigenschaften und den sich daraus ergebenden Anforderungen an die Datenlinktechnologie. So können die hier gewonnenen Informationen für die Mittelwerte der *Cluster*-Größen, Übertragungskettenlänge, Verbindungsdauer und Verbindungsanzahl als Startindikatoren für die weitere Ausgestaltung der Datenlinktechnologie hinsichtlich Netzwerk- und Übertragungsprotokollen sowie physikalischer Auslegung sein. Die Konnektivitätsmodellierung stellt somit ebenfalls einen wesentlichen Mehrwert für die systematische Charakterisierung von AANETs im Allgemeinen dar und ist im Speziellen eine weitere Grundvoraussetzung für die Nutzwertanalyse von AANETs und der zugrunde liegenden Datenlinktechnologie im Speziellen.

Die Methode zur Ermittlung des Nutzwertes mittels Abbildung des Kommunikationsbedarfs auf die AANET-Konnektivität stellt schließlich den Lückenschluss zwischen operationellen Anforderungen und technischen Fähigkeiten des untersuchten technischen Systemverbundes dar. Anhand des Nutzwertes kann eine Aussage über die Wirksamkeit und den Mehrwert der verwendeten Beispieltechnologie getroffen werden und die Signifikanz einzelner Kernauslegungsparameter identifiziert werden. Wird der Nutzwert mit Anforderungen belegt, etwa um einen unter betrieblichen und ökonomischen Aspekten sinnvollen Zielbereich für den Nutzwert zu identifizieren, können auf Basis der Kernauslegungsparameter konkrete Fähigkeitsanforderungen an die untersuchte Datenlinktechnologie identifiziert werden.

Das Zusammenspiel der drei Einzelmethoden von Modellierung des Kommunikationsbedarfs, Konnektivitätsmodellierung und Ermittlung eines übergreifenden Nutzwertes erscheint besonders geeignet für die initiale Auslegung von Luft-Luft-Datenlinks im AANET-Verbund. Die Technologie des LDACS Luft-Luft-Datenlinks dient hierbei als relevante Referenztechnologie. Anhand der Ergebnisse ist eine Eingrenzung der sinnvollen Bereiche für Kernauslegungsparameter, wie Reichweite und Datenübertragungsrate möglich. Dies geschieht unter Berücksichtigung des damit erreichbaren Nutzwertes des Systems innerhalb des beabsichtigten operationellen Anwendungsfalles. Denkbar wäre ebenfalls ein Vergleich des Nutzwertes einer Auswahl aus verschiedenen Kandidatentechnologien, welche auf die gleichen Anwendungsfälle im gleichen operationellen Szenario abzielen. Des Weiteren kann die Methode potentiell die Anpassung der Kernauslegungsparameter über den weiteren Auslegungsprozess hinaus begleiten und sobald weitere technische Detaillierungen etwa zu Latenzzeiten und notwendiger minimaler Verbindungsdauer verfügbar sind, Auswirkungen auf den Nutzwert sichtbar machen. Je nach Art der weiteren technischen Detaillierung der damit verbundenen Parameter sind jedoch mehr oder weniger tiefgreifende Anpassungen an der Konnektivitätsmodellierung und an der Nutzwertermittlung notwendig.

8.4 Ergebniseinordnung

Die Aussagekraft und Anwendbarkeit der vorgestellten Ergebnisse und der zugrunde liegenden Methodik ist

- ❖ gebunden an die durch das operationelle Szenario definierte Region und
- ❖ bezogen auf die untersuchten Anwendungsfälle sowie
- ❖ relevant für die initiale Auslegung der untersuchten Technologie.

Die räumliche Einschränkung der Aussagekraft ist dadurch bedingt, dass die Konnektivität in einem ad-hoc Netzwerk mit mobilen Netzwerkknoten stark von den Bewegungsmustern derselben abhängt. In ozeanischen und abgelegenen Lufträumen, in denen solche ad-hoc Netzwerke gemäß Überlegungen in Kapitel 5 aufgrund der fehlenden Bodeninfrastruktur von besonderem Nutzen sind, sind die Bewegungsmuster der Luftverkehrsteilnehmer durch angrenzende Regionen mit hohem Luftverkehrsaufkommen und zugehöriger Nachfrage sowie der Kommunikationsinfrastruktur in den Randzonen geprägt. Die Ergebnisse, welche in dieser Arbeit für den nordatlantischen Luftraum ermittelt wurden, lassen sich somit nicht direkt auf andere ozeanische oder abgelegene Lufträume übertragen.

Weiterhin ist die Aussagekraft der Ergebnisse bezüglich des Kommunikationsbedarfs (Kapitel 7.2) und der Kommunikationsbedarfsabdeckung (Kapitel 7.3) auf die untersuchten Anwendungsfälle (Kapitel 4) beschränkt. Die hier berücksichtigten Anwendungsfälle ATS und AOC beschreiben jeweils die anhand bestimmter Kriterien ausgelösten Einzelanwendungen, welche die Übertragung von einer begrenzten Anzahl an Informationspaketen mit vordefinierten Datengrößen beinhaltet. Eine Variation der Einzelanwendungen resultiert zwingenderweise in veränderten Verteilungen des Kommunikationsbedarfs und veränderten Datenübertragungsraten und hat Auswirkungen auf die Kommunikationsbedarfsabdeckung. Für den Anwendungsfall ATS wurde hierzu wie beschrieben ein neues Kommunikationsbedarfsmodell entwickelt und anhand vorhandener aufgezeichneter Daten für das betrachtete Szenario validiert. Der Anwendungsfall AOC hingegen beruht auf einem bestehenden, in mehreren vorhergehenden Arbeiten verwendeten Modell, welches zwar von den relevanten Interessensparteien EUROCONTROL und FAA entwickelt wurde, jedoch mangels verfügbarer Vergleichsdaten keine weitere Validierung zulässt. Daher besteht insbesondere bei dem AOC-Kommunikationsbedarf eine Restunsicherheit bezüglich der Genauigkeit in der Abbildung des tatsächlich vorhandenen Kommunikationsbedarfs.

Hinsichtlich der Einordnung der vorgestellten Ergebnisse sind weiterhin die Annahmen, Abgrenzungen und Vereinfachungen bei der physikalischen Modellierung des Informationsaustausches im AANET zu berücksichtigen.

Wie in Kapitel 6 angesprochen berücksichtigt die Modellierung nur die Anwendungsdaten der untersuchten Kommunikationsanwendungen. Der Datenüberhang, welcher z.B. für den Netzzugriff und Verbindungsaufbau, die Koordinierung der Datenübertragung, die physikalische Datenübertragung und bei Bedarf der Verschlüsselung von Daten erforderlich ist, bleibt bei der Betrachtung außer Acht. Sofern bereits eine detailliertere Systemauslegung des AANETs vorliegt und eine genauere Abschätzung des Datenüberhanges möglich ist (z.B. Datenüberhang von 10% aufgrund von Verschlüsselung [110]), kann dieser auf die Ergebniswerte angewendet werden. Abhängig von der Wahl der Übertragungsprotokolle für Netzwerkzugriff und Datentransport ist dieser Datenüberhang starken Schwankungen unterlegen [105]. Hierzu sind ggf. weitere Kenngrößen der einzelnen Szenarien zu berücksichtigen, wie z.B. die Dauer von Verbindungen oder Kennwerte für die Netzwerktopologien.

8 Ergebnisdiskussion

Durch eine Berücksichtigung des Datenüberhanges würden die in den Ergebnissen erfassten Datenübertragungsraten entsprechend höher ausfallen.

Weiterhin vernachlässigt die Modellierung wie in Kapitel 6 beschrieben die Effekte von Latenzzeiten bei der Datenübertragung und nimmt eine vereinfachte für alle Informationsübertragungen konstante Latenzzeit an. Ursachen für die Latenzzeit ist z.B. aus der Methode des Netzzugriffes und die Anzahl der Luftfahrzeuge in Kommunikationsreichweite, wie in [102] dargestellt. In diesem Zusammenhang ist auch zu erwarten, dass die Größe der einzelnen AANET-Cluster und die Länge der Übertragungsketten einen wesentlichen Einfluss auf die Übertragungslatenz haben. [107] nimmt hierfür als Richtwert für weitere Untersuchungen eine Verzögerung der Übertragung von 0,871 s pro Netzwerkknoten in der Übertragungskette an. In [110] wurde darüber hinaus gezeigt, dass zusätzlich die Verschlüsselung der Kommunikation die Latenzzeiten um 8%-9% steigern kann. Die in Kapitel 7 dargestellten Ergebnisse können somit die reale erreichbaren Werte hinsichtlich der übertragenen Informationsmenge übertreffen, da einzelne Informationsübertragungen aufgrund der tatsächlich auftretenden Latenzen aus dem Abdeckungszeitfenster des AANETs herausfallen würden. Dies hätte eine geringere erreichte Kommunikationsbedarfsabdeckung und geringere Datenübertragungsraten zur Folge.

Ein weiterer möglicher einschränkender Effekt kann die physikalische Unmöglichkeit, bzw. starke Einschränkung des Aufbaus einer einzelnen Datenlinkverbindung durch hohe Relativgeschwindigkeit der beiden Kommunikationspartner und stark variierenden Sichtwinkel sein. Durch die Reduzierung der teilnehmenden Kommunikationspartner im untersuchten Szenario auf Luftfahrzeuge, welche sich entweder ausschließlich in westlicher oder ausschließlich in östlicher Richtung durch das Referenzszenario bewegen, entfällt dieser Effekt im Untersuchungsfall jedoch weitgehend.

In ähnlicher Weise wirken sich physikalische Einschränkungen in der Datenübertragung aus, wie etwa atmosphärische Effekte, Reflektionen an der Meeresoberfläche, Einschränkungen im Abdeckungsbereich der Kommunikationsantennen (vgl. [109, 172]). Durch die Annahme idealer Konnektivitätsbedingungen innerhalb eines zylinderförmigen Volumens um die einzelnen Netzwerkknoten des AANETs werden diese Effekte vernachlässigt. Bei einer realen Implementierung ist aufgrund dieser Einschränkungen mit einem erhöhten Datenaufkommen zur Vermeidung von Übermittlungsfehlern oder einer reduzierten Kommunikationsbedarfsabdeckung zu rechnen. Dies kann dazu führen, dass die Abdeckung des Kommunikationsbedarfs in den hier dargestellten Ergebnissen in Einzelfällen zu hoch eingeschätzt wird und die Datenübertragungsrate zu gering.

Die in diesem Kapitel zuvor genannten Einschränkungen und Vereinfachungen im implementierten Model werden vor dem Hintergrund der Nutzwertanalyse als vertretbar angesehen, sind jedoch mit Hinblick auf die Interpretation der in den Kapiteln 8.1 und 8.2 aufgeführten Ergebnisse zu Nutzwert und Kernausslegungsparametern zu berücksichtigen.

8.5 Einordnung Nutzwert

Der verwendete Nutzwert F gibt zunächst Aufschluss darüber, zu welchem Anteil Datenlinkkommunikation der Anwendungsfälle ATS und AOC über das durch den LDACS-

Datenlink aufgespannte ad-hoc Netzwerk übertragen werden kann. Der Nutzwert ist unter Berücksichtigung der in Kapitel 8.4 aufgeführten Einschränkungen zu sehen, welche sich durch Modellierungstiefe und -breite ergeben. In diesem Zusammenhang stellt der hier dargestellte Nutzwert F eine theoretische Obergrenze dar, welche nur durch eine ideale Technologieauslegung erreicht werden kann.

Ein möglichst hoher Nutzwert F , wie in Kapitel 7.3.3 aufgezeigt, ist das Einstiegskriterium, welches die prinzipielle Machbarkeit und Sinnhaftigkeit eines durch LDACS Luft-Luft-Datenlinks aufgespannten ad-hoc Netzwerkes anzeigt. Für die Einordnung des Nutzwertes muss in einem auf den hier beschriebenen Ergebnissen aufsetzenden Schritt auch das Zusammenspiel bzw. die Konkurrenz mit bestehenden Technologien für die Datenkommunikation in abgelegenen Lufträumen betrachtet werden. Dies betrifft vor allem die Satellitenkommunikation über die Konstellationen Iridium und Inmarsat. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die untersuchte Technologie LDACS Luft-Luft-Datenlink die konventionelle Satellitenkommunikation nicht vollständig ersetzen kann. Da die Kommunikationsabdeckung von der jeweiligen Verkehrssituation und dem resultierenden Vernetzungspotential der Verkehrsteilnehmer abhängig ist, kann entsprechend den in Kapitel 7 vorgestellten Ergebnissen keine vollständige Abdeckung des Kommunikationsbedarfs erreicht werden. Im Zusammenspiel mit der Satellitenkommunikation ist daher in jedem Fall von einer Koexistenz beider Systeme vorzugsweise im Rahmen einer Multi-Link Umgebung auszugehen, in welcher situationsabhängig und automatisiert für jede Art von Kommunikation das am besten geeignetste Kommunikationsmittel ausgewählt wird. Der hier dargestellte Nutzwert F kann also potentiell gemindert werden, wenn für einen Teil des Datenkommunikationsbedarfs eine Übertragung mittels Satellitenkommunikation lokal und zeitlich bessere Konditionen für die Datenübertragung bietet. Durch einen solchen Einsatz des LDACS Luft-Luft-Datenlink im Verbund mit Satellitenkommunikation innerhalb einer Multi-Link Umgebung wird zudem die Störfestigkeit der Kommunikation erhöht. Der LDACS Luft-Luft-Datenlink bietet eine Redundanz im Falle von Störungen der Satellitenkommunikation, wie sie u.a. für den in dieser Arbeit betrachteten Nordatlantik immer wieder auftreten [137–145].

Ein wesentlicher Mehrwert gegenüber der bestehenden Satellitenkommunikation wird neben der somit erzeugten Redundanz der Kommunikationsmittel jedoch erst erzeugt, wenn die Datenkommunikation über den LDACS-Datenlink auch hinsichtlich Leistungs- und ökonomischen Kriterien Vorteile bietet. Leistungskriterien betreffen beispielsweise Latenzzeiten und die Zuverlässigkeit der Übertragung. Unter ökonomischen Kriterien sind die Kosten für die Systemeintrüstung, den laufenden Betrieb und insbesondere für die Datenübertragung zu verstehen. Über beide Kriterien können mit dem in dieser Arbeit analysierten Nutzwert F keine direkten Aussagen getroffen werden. Jedoch zeigt der Nutzwert F das hohe theoretische Potential auf, welches sich bei geeigneter Auslegung der untersuchten Datenlinktechnologie bietet. Eine initiale Technologieauslegung auf Basis der in Kapitel 8.2 identifizierten Auslegungsparameter, welche eine erste Leistungsabschätzung zulässt sowie erste ökonomischen Betrachtungen hinsichtlich der Betriebskosten kann die Grundlage für eine qualifizierte Bewertung des Nutzwertes der neuartigen Datenlinktechnologie gegenüber bestehender Satellitenkommunikation bilden. Eine Diskussion möglicher

8 Ergebnisdiskussion

Vorteile einer Kombination aus LDACS Luft-Luft-Datenlink und Satellitenkommunikation wird z.B. in [90] vorgenommen. Hier wird durch die kombinierte Nutzung beider Kommunikationsmedien mittels gleichzeitiger oder alternativer Nutzung eine Verbesserung von Paketverlustrate, Datendurchsatz und Übertragungsdauer erreicht. Insbesondere bei der Paketverlustrate und dem Datendurchsatz können durch die Nutzung des Luft-Luft-Datenlinks Verbesserungen gegenüber der ausschließlichen Nutzung von Satellitenkommunikation erreicht werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die in dieser Arbeit präsentierte Methodik nimmt im Anschluss an die eingehende Zielformulierung eine Umfeldanalyse der beteiligten Parteien, Akteure und des technologischen Umfeldes vor. Weiterhin erfolgt in diesem Schritt die Auswahl und Vorstellung der für die Untersuchung verwendeten Technologie des LDACS Luft-Luft-Datenlinks. Diese ermöglicht als Neuerung im Lufttransportsystem eine Vernetzung der Luftverkehrsteilnehmer untereinander und damit die Bildung von ad-hoc Netzwerken für Luftfahrtanwendungen (AANETs). Auf dieser Grundlage und unter Berücksichtigung der Stärken der untersuchten Datenlinktechnologie werden die Datenkommunikation zwischen Luftverkehrsteilnehmer und Flugsicherung (ATS) und Fluggesellschaft (AOC) als repräsentative Anwendungsfälle identifiziert, welche mittels Nutzwertes hinsichtlich ihres Erfüllungsgrades messbar sind. Zudem wird ein operationelles Konzept aufgestellt, welches einen räumlichen und zeitlichen Rahmen für die Anwendungsfälle sowie relevante Randbedingungen definiert. Hierbei wurde der nordatlantische Luftraum als relevantes räumliches Umfeld für die Nutzung der Datenlinktechnologie zur Bildung von AANETs sowie ein besonders verkehrsreicher Tag in 2019 als zeitlicher Rahmen gewählt. Weitere operationelle und technische Rahmenbedingungen sind gegeben durch die dortige Luftraumstruktur sowie die Funkabdeckung durch Bodenstationen in den Randzonen und im Simulationsbereich enthaltenen Landmassen. Die anschließende Modellierung teilt sich auf in die einzelnen Aspekte Datenkommunikationsbedarf, dynamische Konnektivität des AANETs und Kommunikationsbedarfsabdeckung durch das AANET. Bei der Modellierung des Datenkommunikationsbedarfs wird für den Anwendungsfall AOC ein bestehendes Modell für das ausgewählte operationelle Szenario adaptiert, während für den Anwendungsfall ATS ein neues Modell auf der Basis von technischen Standards, operationellen Verfahren und der aufgezeichneten ATS-Datenkommunikation für die nordatlantischen ozeanischen Lufträume erarbeitet wird. Die Modellierung der Konnektivität ermittelt für jeden Luftverkehrsteilnehmer die Zeiträume in denen eine direkte oder indirekte Konnektivität zu einer oder mehreren Bodenstationen besteht und identifiziert Verbünde aus vernetzten Luftfahrzeugen (*Cluster*). Dies geschieht unter Variation der Datenlinkreichweite bis hin zur geometrisch bedingten maximalen Sichtreichweite und der Anzahl und Verteilung der am Netzwerk teilnehmenden Luftverkehrsteilnehmer. Die Modellierung der Kommunikationsbedarfsabdeckung durch die Konnektivität, welche von der untersuchten Datenlinktechnologie ermöglicht wird, betrachtet dabei die *Cluster* über die einzelnen Zeitschritte hinweg und ermittelt das Datenkommunikationsaufkommen sowohl in Bezug auf die einzelnen *Cluster* als auch in Bezug auf die Luft-Boden-Netzwerkknoten (*Gateways*) innerhalb des AANETs. Hierbei werden neben dem zuvor identifizierten Nutzwert der Kommunikationsbedarfsabdeckung auch die resultierenden Datenübertragungsraten ermittelt, sowohl innerhalb der *Cluster* als auch an den Netzwerkknoten, welche die *Cluster* an die Bodeninfrastruktur anbinden. Letztere stellen neben der Datenlinkreichweite einen wesentlichen Auslegungsparameter dar, deren Auswahl durch die hier präsentierte Methodik in Hinblick auf den erreichbaren Nutzwert ermöglicht werden soll.

Als Ergebnisse dieser Arbeit, der vorgestellten Methodik und der konkreten Anwendung an der Beispieltechnologie LDACS Luft-Luft-Datenlink lassen sich wesentliche Erkenntnisse

9 Zusammenfassung und Ausblick

zur Eignung dieser Technologie für den Einsatz im konkreten Anwendungsszenario, prinzipielle Effekte für die Nutzung von ad-hoc Netzwerken für die Luftfahrtdatenkommunikation, das operationell abgeleitete Datenkommunikationsmodell für die Flugführungskommunikation (ATS) und ein grundlegendes Vorgehen für die Bewertung von Flugführungsavionik festhalten.

- ❖ Bezüglich der Eignung des LDACS Luft-Luft-Datenlinks mit der Fähigkeit zur Bildung von AANETs für die Luftfahrtdatenkommunikation lässt sich auf Grundlage der in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse ein ausgewiesenes hohes Potential für die Abdeckung des Datenkommunikationsbedarfs für ATS und AOC feststellen. Bei einer Maximierung der Reichweite auf die bei Flughöhen beider Kommunikationspartner oberhalb von 8.500 ft realisierbare maximale Sichtreichweite von 420 km lässt sich im untersuchten operationellen Konzept für den Nordatlantik unter Annahme von Idealbedingungen für die Übertragung im Netzwerk eine Kommunikationsbedarfsabdeckung von über 85% erreichen. Dieser Wert wird bei Berücksichtigung der konkreten Auslegung des LDACS Luft-Luft-Datenlinks unter anderem aufgrund von Übertragungslatenzen, Verzögerungszeiten für den Netzaufbau und Übertragungsverlusten ggf. geringer ausfallen.
- ❖ Weiterhin zeigen die Ergebnisse auf, wie ein geringerer Einführungsgrad der Luftverkehrsteilnehmer durch eine höhere Reichweite des Datenlinks kompensiert werden kann und ermöglichen somit die geeignete Reichweitenauswahl unter Berücksichtigung von Übergangszeiten für die Einführung der neuen Technologie und Steigerung des Nutzens auch für die frühesten Anwender. Dies ist von hohem Interesse, da diese Übergangszeiten aufgrund der Erfahrung aus vergleichbaren Technologieeinführungen durchaus zehn bis 15 Jahre betragen können. Analog zu analytischen Betrachtungen von [171] ist dabei zu beobachten, dass durch die Auswahl einer höheren Reichweite geringere Einführungsgrade in Bezug auf den erreichbaren Nutzwert überkompensiert werden können. Die Reichweite hat prinzipiell einen höheren Einfluss als die Anzahl der verfügbaren Netzwerkknöten. Dieser Effekt ist sehr vorteilhaft für die Technologieeinführung als auch für den Einsatz des AANETs in anderen operationellen Szenarien mit geringerer Verkehrsdichte.
- ❖ Eine weitere Erkenntnis bezüglich der Reichweitenauswahl, welche sich aus den Ergebnissen ergibt, ist der Effekt, dass nach einem Bereich von Reichweiten bis ca. 150 km, welche nur einen geringen Nutzwert aufweisen, und einem Bereich bis ca. 250 km mit starker Steigerung des Nutzwertes aber hohen Datenübertragungsraten ein Reichweitenbereich von 250 km bis zur Maximalreichweite 420 km anschließt in dem wesentliche Konnektivitätsparameter weitestgehend stabil sind, der Nutzwert weiterhin moderat steigt und die zu erwartende Datenübertragungsrate abnimmt. Letzterer ist daher besonders attraktiv für die Auslegung des Datenlinks. Da die Betrachtung ohne Nutzung spezifischer Eigenschaften des LDACS-Datenlinks erfolgt ist, können diese Betrachtungen auf vergleichbare Technologien zur Bildung von AANETs im untersuchten operationellen Szenario für die Anwendungsfälle ATS und AOC übertragen werden. Je nach Verkehrsdichte im betrachteten Luftraum gehen jedoch zu hohe Reichweiten mit einer hohen Anzahl an möglichen Kommunikationspartnern für jeden einzelnen

Luftverkehrsteilnehmer einher, was ggf. zu technischen Einschränkungen in der Nutzbarkeit des LDACS-Datenlinks führt.

- ❖ Hinsichtlich des Datenkommunikationsbedarfs im nordatlantischen ozeanischen Luftraum wurde für die beiden untersuchten Anwendungsfälle ATS und AOC eine starke Heterogenität sowohl in räumlicher als auch in zeitlicher Dimension aufgezeigt. Dies ist vor dem Hintergrund der ebenfalls räumlich und zeitlich dynamischen Netzwerkabdeckung eines AANETs von besonderer Bedeutung und unterstreicht die Bedeutung einer hinsichtlich dieser Aspekte möglichst realitätsnahen Modellierung des Datenkommunikationsbedarfs.
- ❖ Grundsätzlich wurde mit der verwendeten Methodik, anhand von operationell abgeleiteten Anwendungsfällen in einem relevanten operationellem Konzept die Korrelation von Nutzwert und grundlegenden Auslegungsparametern herzustellen, eine Möglichkeit aufgezeigt, Technologien der Flugführungsavionik im übergeordneten Kontext des Lufttransportsystems zu betrachten und die Lücke zwischen fachtechnischer Technologie- und Systemauslegung und übergeordneten Fähigkeitsanforderungen des Lufttransportsystems zu schließen.

Für das Erreichen der oben genannten Ergebnisse wurden in der vorliegenden Arbeit verschiedene Innovationsgrade umgesetzt, welche auch in vergleichbaren Betrachtungen einen Mehrwert darstellen können. Die Innovationsgrade betreffen insbesondere das Modell für die Datenkommunikationsnachfrage sowie die angewandte Methodik hinsichtlich Nutzwertes und Kernauslegungsparametern.

- ❖ Es wurde ein dynamisches an operationelle Rahmenbedingungen des Luftraums und des einzelnen Fluges gekoppeltes Datenkommunikationsnachfragemodell für den Anwendungsfall ATS erstellt. Dieses ist in der hier präsentierten Definition relevant für den nordatlantischen Luftraum mit Schwerpunkt auf die durch das organisierte Flugpfadsystem (OTS) geprägten zentralen Lufträume Gander (CZQX) und Shanwick (EGGX). Das Modell berücksichtigt sowohl aufgeprägte Anforderungen des Luftraums und der Flugsicherung, wie Übergaben an den Luftraumgrenzen und Berichtsintervalle für die Positions- und Statusmeldung, als auch flugleistungsabhängige Kommunikationserfordernisse, wie die Freigabeanfragen für Änderungen der Flughöhe zur Optimierung des Treibstoffverbrauchs. Unter Anpassung an die z.B. durch Betriebsvorschriften vorgegebenen Kommunikationserfordernisse anderer Lufträume, lässt sich dieses Modell auch auf andere relevante Einsatzszenarien in vergleichbaren ozeanischen oder abgelegenen Lufträumen anwenden.
- ❖ Eine Besonderheit der Modells für die Datenkommunikationsnachfrage im Anwendungsfall ATS gegenüber vergleichbaren Modellen ist, dass dieses aus Betriebsvorschriften für den betrachteten Luftraum und technischen Standards abgeleitet ist und mit verfügbaren Informationen zum Datenkommunikationsaufkommen für den Referenzluftraum validiert werden konnte. Dieser Weg wurde gewählt, da kein Nachfragemodell gefunden wurde, welches die oben genannten Einflüsse von Anforderungen der Flugsicherung, Luftraumgeometrie und des einzelnen Fluges berücksichtigt.
- ❖ Zudem wurde im Rahmen der entwickelten Methodik unter Nutzung von realen Flugplandaten und Luftraumgeometrien sowie aus aktueller Bodeninfrastruktur

9 Zusammenfassung und Ausblick

abgeleiteten Annahmen für die bodengebundene Kommunikationsinfrastruktur ein möglichst realistisches operationelles Szenario als Bewertungsgrundlage für die Nutzwertanalyse des durch LDACS aufgespannten AANET verwendet. Die Nutzung eines solchen, weitestgehend auf Realdaten in der genannten Kombination basierenden operationellen Szenarios für die Bewertung eines AANETs ist aus den hier referenzierten, vergleichbaren Arbeiten nicht bekannt.

- ❖ Gleiches gilt für die Bewertungsmethode für die dynamische Netzwerkabdeckung durch das AANET in Verbindung mit operationell abgeleiteten Modellen für den Kommunikationsbedarf mit dem am Systemnutzer orientiertem Nutzwert der Kommunikationsbedarfsabdeckung als Maßzahl.
- ❖ Als wesentlicher Innovationsgrad der Arbeit im Vergleich mit dem Autor bekannten, hier referenzierten Arbeiten aus dem gleichen Themenumfeld wird weiterhin angesehen, dass mithilfe der vorgestellten Methodik eine gezielte Auswahl von Kernaussageparametern für die untersuchte Flugführungstechnologie mit direktem Rückschluss auf den erreichbaren Nutzwert ermöglicht wird. Ebenfalls können weitere für die technische Auslegung des Datenlinks relevante Konnektivitätsparameter initial abgeschätzt werden.

Bekannte Einschränkungen und Schwachpunkte in der dargestellten Methodik resultieren im Wesentlichen aus der fehlenden Verfügbarkeit von Daten für Anteile des Kommunikationsbedarfs und des Luftverkehrs sowie der weiteren Berücksichtigung von spezifischen Charakteristika der untersuchten Technologie LDACS Luft-Luft-Datenlink.

- ❖ Aufgrund der fehlenden Verfügbarkeit von tatsächlichen Nachfragecharakteristika für die Kommunikation im Anwendungsfall AOC, musste für diesen Anwendungsfall auf ein bestehendes, bereits vor über 15 Jahren verfasstes Modell für die Datenkommunikationsnachfrage zurückgegriffen werden, welches nicht weiter anhand realer Daten validiert werden konnte. Dieses Modell weist in seiner Ausprägung für ozeanische und abgelegene Lufträume die Eigenschaft auf, dass der Datenkommunikationsbedarf sowohl in Hinblick auf die Anzahl der Einzelnachrichten als auch hinsichtlich des Datenvolumens stark von einer einzelnen Anwendung abhängt. Die konkrete, tatsächliche Ausprägung und Nutzungshäufigkeit dieser Anwendung kann somit die Datenkommunikationsnachfrage wesentlich beeinflussen. Weiterhin berücksichtigt die verwendete AOC-Modellierung nicht die Unterschiede in den Kommunikationsnachfrageprofilen, welche unter anderem abhängig sind von der betreibenden Fluggesellschaft und dem Flugzeugmuster. Da sich unter Berücksichtigung dieser Unterschiede jedoch eine Vielzahl an Variationen der AOC-Kommunikationsnachfrage ergeben, welche ihrerseits zu validieren wären, erscheint jedoch die Zusammenfassung und Abstraktion in einem AOC-Kommunikationsmodell sinnvoll.
- ❖ Weiteres Verbesserungspotential besteht in der Nutzung von aufgezeichneten Flugdaten (z.B. ADS-B Daten), welche die tatsächlich geflogene Flugroute abbilden gegenüber dem in dieser Arbeit verfolgten Ansatz der Modellierung des Luftverkehrsaufkommens auf der Basis von Flugplandaten und Großkreisen mit optimiertem Höhenprofil. Durch die Verwendung solcher aufgezeichneten Flugdaten ließe sich eine noch realitätsnähere Modellierung der Kommunikationsabdeckung des AANETs im Nordatlantik erreichen,

da Abweichungen vom Flugplan oder der idealen Flugroute miterfasst wären. Ebenfalls wäre es hierdurch möglich etwa Kursabweichungen aufgrund von Wetterereignissen als Auslöser für entsprechende Kommunikationsereignisse zu identifizieren und auch die Genauigkeit der Kommunikationsbedarfsmodellierung zu erhöhen. Die Nutzung von aufgezeichneten ADS-B Daten setzt allerdings eine umfangreiche Aufbereitung dieser qualitativ sehr heterogenen Daten voraus, mit der Gefahr, dass etwa relevante einzelne Flüge aufgrund geringer Aufzeichnungsqualität herausgefiltert werden oder aufgrund der noch variierenden, satellitenbasierten ADS-B Abdeckung und Nutzung im Nordatlantik von vorneherein nicht enthalten sind.

- ❖ In der in dieser Arbeit vorgestellten Methodik und ihrer Anwendung zur Ermittlung des Nutzwertes einer neuartigen Datenlinktechnologie für die Luftfahrt Datenkommunikation bleiben spezifische Charakteristika der untersuchten Technologie unberücksichtigt, da diese im initialen Auslegungs- und Evaluierungsschritt nicht zur Verfügung stehen. Die Aussagekraft der Ergebnisse hinsichtlich des tatsächlich erreichbaren Nutzwertes und der zu erwartenden Datenübertragungsraten lassen sich durch die Berücksichtigung der spezifischen Charakteristika in einer weiteren Iteration der Untersuchungsmethodik jedoch weiter steigern. Diese Charakteristika umfassen zum Beispiel die Verbindungswahrscheinlichkeiten, Latenzen zum Aufbau von Verbindungen und zur Datenübertragung, Datenüberhang aufgrund von Übertragungsprotokollen oder Einschränkungen in Netzwerkaufbau und Datenübertragung aufgrund physikalischer Rahmenbedingungen welche aus der Relativbewegung der Luftfahrzeuge oder der Betriebsumgebung resultieren. Eine graduelle Berücksichtigung dieser Charakteristika würde z.B. die Auswirkung der Auswahl verschiedener Übertragungsprotokolle oder Netzwerklogiken auf den Nutzwert aufzeigen und könnte auch in Detailfragen der System- und Technologieauslegung als Entscheidungshilfe dienen. Voraussetzung ist jedoch, dass die einzelnen Charakteristika sich hinreichend abstrahieren und auf wenige aus der Modellierung der Flugbewegungen ableitbare Parameter reduzieren lassen. Für die Analyse und Optimierung stark gekoppelter einzelner Charakteristika sind in jedem Fall spezialisierte Simulationsmodelle zu verwenden, welche die Datenlinkimplementierung detailliert abbilden. Eine solche detaillierte Abbildung ist in der hier präsentierten Methodik nicht vorgesehen.

Die hier vorgestellten Arbeiten bieten die Grundlage für eine Vielzahl an weiterführenden Untersuchungen, welche sich mit der Anwendbarkeit in anderen operationellen Szenarien, anderen Anwendungsfällen, Aufnahme von technischen Charakteristika und der Berücksichtigung von weiteren Technologien beschäftigen.

- ❖ Nachdem in dieser Arbeit ein potenziell hoher Nutzwert der untersuchten Datenlinktechnologie für den nordatlantischen Luftraum aufgezeigt wurde, wäre die Untersuchung ähnlicher ozeanischer oder abgelegener Lufträume von Interesse, um die Relevanz dieser Technologie für die Luftfahrt Datenkommunikation weiter zu untermauern und eine globale Relevanz aufzuzeigen. Von Interesse wären zum Beispiel der pazifische Luftraum mit seinen hochfrequentierten Flugkorridoren oder kontinentale Lufträume mit geringer Bodeninfrastruktur wie etwa Afrika oder Nordasien. Die

9 Zusammenfassung und Ausblick

vorgestellte Methodik und Modellierung ließe sich unter Anpassung des operationellen Konzepts und des ATS-Kommunikationsbedarfsmodells übertragen.

- ❖ Im nächsten Schritt ließe sich mit der vorgestellten Methodik untersuchen, inwieweit sich durch die Nutzung von AANETs die Bodeninfrastruktur in kontinentalen Lufträumen mit mittlerem bis hohem Verkehrsaufkommen reduzieren lässt. Hierbei wäre neben der Anpassung des operationellen Konzepts auch eine Anpassung der Kommunikationsbedarfsmodelle auf ein kontinentales Umfeld notwendig. Zudem müssten weitere Aspekte hinsichtlich Sicherheit, Luftraumstruktur und Anforderungen für An- und Abflug und angrenzende Flugphasen berücksichtigt werden.
- ❖ Ausgehend vom hier präsentierten operationellen Konzept oder den oben genannten Adaptionen können neue Anwendungsfälle betrachtet werden, nachdem die in dieser Arbeit berücksichtigten Anwendungsfälle lediglich bereits bestehende Anwendungen für Luft-Boden-Kommunikation adressieren. Neben weiteren, neuen Luft-Boden-Anwendungen sind besonders Anwendungsfälle von Interesse, welche eine direkte Kommunikation zwischen zwei Luftverkehrsteilnehmern erfordern und somit direkt Nutzen aus der durch die untersuchte Technologie eingebrachte neue Fähigkeit zur Luft-Luft-Kommunikation nutzen. Diese Anwendungen kämen ohne AANET aus und wären auch für kontinentale Lufträume mit Bodeninfrastruktur relevant. Mögliche Anwendungsfälle zwischen Luftfahrzeug und einer Partei am Boden wären etwa ein vernetzter Flugdatenschreiber (*Online Black Box*), digitaler Sprechfunk oder Frachtkommunikation [75]. Potentielle Anwendungsfälle mit Neuheitswert unter Nutzung von direkter Luft-Luft-Kommunikation wären etwa Funktionen zur sicheren und kontrollierten Reduzierung des Abstandes zwischen zwei Luftfahrzeugen, etwa im Rahmen der regulären Separation, beim losen oder aerodynamischen Formationsflug oder bei Adaption von Flugzeugschlepp und Luftbetankung für die zivile Luftfahrt [75].
- ❖ Die Berücksichtigung von weiteren Technologieeigenschaften wie maximaler Verbindungsanzahl je Netzwerkknotten, Mindestverbindungsdauer, Latenzzeiten, Datenüberhang ermöglicht es zum einen Stärken und Schwächen der untersuchten Technologie stärker herauszustellen und weitere Auslegungsentscheidungen unter Berücksichtigung ihrer Auswirkungen auf den erreichbaren Nutzwert zu treffen und zum anderen verschiedene Technologien zu vergleichen. Wie zuvor angesprochen ist dazu jedoch Voraussetzung, dass die einzelnen Technologieeigenschaften in geeigneter Weise abstrahiert werden können.
- ❖ Weiterhin von Interesse ist die Betrachtung von Multi-Link-Umgebungen, welche verschiedene Datenkommunikationstechnologien kombinieren um Vorteile in der Datenübertragung bei Latenzen, Datenrate oder Zuverlässigkeit zu erreichen und ggf. Kostenvorteile zu erzielen. Hierbei bietet sich z.B. die Kombination mit Satellitenkommunikation an. Da AANETs aufgrund ihrer Abhängigkeit von der Anzahl und Verteilung von als Netzwerkknotten dienenden Luftverkehrsteilnehmern keine gesicherte Kommunikationsabdeckung garantieren können, ist in jedem Fall von einer Koexistenz der untersuchten LDACS-Technologie und Satellitenkommunikation auszugehen. Die Kombination beider Technologien um einzelne Schwächen auszugleichen und die kombinierten Vorteile beider Technologien zu nutzen liegt daher nahe. In diesem Fall ist ggf.

ein stärker an der Übertragungsleistung und Übertragungs- und Ausfallsicherheit orientierter Nutzwert zu wählen, da durch die Nutzung von Satellitenkommunikation von einer räumlich definierten Kommunikationsbedarfsabdeckung nahe 100% auszugehen ist.

- ❖ Schließlich lassen sich mit der dargestellten Methodik auch Fälle mit anderen Technologien und anderen Anwendungsfällen betrachten. Ein Beispiel hierfür wäre zum Beispiel die Bereitstellung von Passagierdatenkommunikation (Internet, Telefonie) mittels optischen Richtfunks. Die fortlaufende Entwicklung dieser Technologie hinsichtlich Übertragungsleistung und Reichweite [28, 173] lässt eine mögliche Anwendung für datenintensive Anwendungsfälle, wie der immer stärker nachgefragten Bereitstellung von Internetfunktionalitäten für die Flugpassagiere [74] vorteilhaft erscheinen. Da die Konnektivitätsanalyse zusätzlich zur Anzahl und Verteilung der Luftverkehrsteilnehmer für die Richtfunktechnologie stark abhängig wäre von der jeweiligen relativen Positionierung, Lage und Bewegung zweier Kommunikationspartner zueinander, erscheint eine Nutzwertanalyse auf Grundlage der operationellen Anforderungen im Lufttransportsystem sinnvoll. In diesem Fall wäre ein eigenes Modell für den Kommunikationsbedarf für die Passagierdatenkommunikation zu erstellen und das operationelle Konzept hinsichtlich der nutzbaren Bodeninfrastruktur anzupassen.

10 Literaturverzeichnis

- [1] Dray, L. 2013. An analysis of the impact of aircraft lifecycles on aviation emissions mitigation policies. *Journal of Air Transport Management* 28. Elsevier, Amsterdam, 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2012.12.012>.
- [2] Flühr, H. 2022. Avionik und Flugsicherungstechnik. Einführung in Kommunikationstechnik, Navigation, Surveillance. Springer, Berlin Heidelberg. 978-3-662-64823-0.
- [3] Ben Mahmoud, M. S. 2014. Aeronautical air-ground data link communications. Focus networks and telecommunications series. ISTE Ltd Hoboken NJ John Wiley and Sons Inc, London. 9781119006954.
- [4] Deutsches Institut für Normung. 2005. *Navigation - Begriffe, Abkürzungen, Formelzeichen, graphische Symbole*. DIN 13312:2005-02. DIN Media GmbH, Berlin. <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-13312/76436783>. Zuletzt geprüft am 16.01.2025.
- [5] Deutsches Institut für Normung (DIN), Normenstelle Luftfahrt. 1990. *Luft- und Raumfahrt : Begriffe, Größen und Formelzeichen der Flugmechanik; Teil 1 : Bewegung des Luftfahrzeuges gegenüber der Luft*. ISO 1151-1:1988 modifiziert, DIN 9300-1. <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-9300-1/1608582>. Zuletzt geprüft am 12.11.2024.
- [6] Binns, C. 2019. Aircraft systems. Instruments, communications, navigation, and control. John Wiley & Sons Inc, Hoboken, NJ. 978-1-119-25986-2.
- [7] ICAO. 2023. Performance-based Navigation (PBN) Manual. Fifth Edition. Doc 9613. International Civil Aviation Organization, Montréal, Quebec. 978-92-9275-221-7.
- [8] SESAR Joint Undertaking. 2015. VDL Mode 2 capacity and performance analysis.
- [9] Fistas, N. 2011. Future aeronautical communications: The data link component. In *Future aeronautical communications*, S. Plass, Ed. IntechOpen, London. <https://doi.org/10.5772/29899>.
- [10] SESAR Joint Undertaking. 2020. European ATM master plan. Digitalising Europe's aviation infrastructure : executive view. 2020 Edition. Publications Office of the European Union, Luxembourg. 978-92-9216-134-7.
- [11] Sabatini, R., Roy, A., Blasch, E., Kramer, K. A., Fasano, G., Majid, I., Crespillo, O. G., Brown, D. A., and Ogan Major, R. 2020. Avionics systems panel research and innovation perspectives. *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.* 35, 12, 58–72. <https://doi.org/10.1109/MAES.2020.3033475>.
- [12] ICAO. Global Air Navigation Plan. ICAO GANP Portal. <https://www4.icao.int/ganp-portal/>. Zuletzt geprüft am 09.07.2021.
- [13] FAA. 2021. NextGen Annual Report 2021. Federal Aviation Administration, Washington.

- [14] Post, J. 2021. The next generation air transportation system of the United States: Vision, accomplishments, and future directions. *Engineering* 7, 4. Elsevier, Amsterdam, 427–430. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.05.026>.
- [15] Laskowski, J. 2017. Key technological solutions from the SESAR programme to improve air traffic safety. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport (SJSUT.ST)* 94. Faculty of Transport and Aviation Engineering of Silesian University of Technology, Katowice, 99–110. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2017.94.10>.
- [16] Motyka, A. and Njoya, E. T. 2020. Single European Sky: The progress so far. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 12. Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial - Instituto de Aeronáutica e Espaço, São José dos Campos. <https://doi.org/10.5028/jatm.v12.1175>.
- [17] Schnell, M., Epple, U., Shutin, D., and Schneckenburger, N. 2014. LDACS: future aeronautical communications for air-traffic management. *IEEE Communications Magazine* 52, 5. IEEE, Piscataway NJ, 104–110. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6815900>.
- [18] Morris, A. T. and Goode, P. W. 2003. The aeronautical data link: Decision framework for architecture analysis. In *2003 Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference (ICNS) Proceedings*. NASA John H. Glenn Research Center, Cleveland, Ohio.
- [19] Hirst, M. 2011. The air transport system. Woodhead Publishing, Cambridge. 978-1-84569-522-4.
- [20] Schmitt, D. and Gollnick, V. 2016. Air transport system. Springer, Wien. 978-3-7091-1879-5.
- [21] Janic, M. 2000. Air transport system analysis and modelling. CRC Press, Boca Raton, FL. 978-1-482-28754-7.
- [22] Wittmer, A. and Bieger, T. 2021. Fundamentals and structure of aviation systems. In *Aviation systems*, A. Wittmer, T. Bieger and R. Müller, Eds. Classroom Companion: Business. Springer International Publishing, Cham, 39–78. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79549-8_2.
- [23] Ghosh, R. and Terekhov, I. 2015. Future passenger air traffic modelling: trend analysis of the passenger air travel demand network. In *53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia. <https://doi.org/10.2514/6.2015-1642>.
- [24] Morris, A. T. and Goode, P. W. 2002. The aeronautical data link: Taxonomy, architectural analysis, and optimization. In *Proceedings. The 21st Digital Avionics Systems Conference*. IEEE, Piscataway, NJ, 3B2-1-3B2-13. <https://doi.org/10.1109/DASC.2002.1067938>.

10 Literaturverzeichnis

- [25] ICAO. 2015. Manual on the Aeronautical Telecommunication Network (ATN) using Internet Protocol Suite (IPS) standards and protocols. 2nd Edition. Doc 9896. International Civil Aviation Organization, Montréal, Quebec. 978-92-9249-876-4.
- [26] ICAO. 2016. Manual on detailed technical specifications for the Aeronautical Telecommunication Network (ATN) using ISO/OSI standards and protocols. 2nd Edition. Doc 9880. International Civil Aviation Organization, Montréal, Quebec. 978-92-9258-142-8.
- [27] EUROCONTROL. 1998. ISA Project. IPv6 - Satellite - ATMode for ATN. Air Traffic Requirements.
- [28] Tagliaferri, D. and Capsoni, C. 2017. High - speed wireless infrared uplink scheme for airplane passengers' communications. *Electronics Letters* 53, 13. The Institution of Engineering and Technology, Stevenage Hertfordshire, 887–888. <https://doi.org/10.1049/el.2017.0929>.
- [29] Thakurta, M. B., Das, K., and Biswas, K. 2022. Aeronautical communications. *Journal of Intelligent Computing and Mathematics*. Four Dimensions Publishing Group, Albany NY, 17–26. <https://doi.org/10.55571/jicm.2022.04013>.
- [30] Stacey, D. 2007. Aeronautical radio communication systems and networks. J. Wiley, Chichester, West Sussex, England, Hoboken, NJ. 9780470035108.
- [31] Zeng, D., Giles, S. L., and Phillips, B. 2019. Re-envisioning air/ground communications for aviation. In *2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. IEEE, Piscataway, NJ. <https://doi.org/10.1109/dasc43569.2019.9081750>.
- [32] Kubera, B. and Ehammer, M. 2013. A survey of multilink concepts for aeronautical data link communications. In *2013 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*. IEEE, Piscataway NJ, 1–12. <https://doi.org/10.1109/ICNSurv.2013.6548512>.
- [33] Özmen, S., Hamzaoui, R., and Chen, F. 2024. Survey of IP-based air-to-ground data link communication technologies. *Journal of Air Transport Management* 116. Elsevier, Amsterdam, 102579. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102579>.
- [34] Ilčev, S. D. 2017. Global mobile satellite communications theory. Springer International Publishing, Cham. 978-3-319-39169-4.
- [35] van Wambeke, N. and Gineste, M. 2011. The role of satellite systems in future aeronautical communications. In *Future aeronautical communications*, S. Plass, Ed. IntechOpen, London. <https://doi.org/10.5772/36150>.
- [36] Kodheli, O., Lagunas, E., Maturo, N., Sharma, S. K., Shankar, B., Montoya, J. F. M., Duncan, J. C. M., Spano, D., Chatzinotas, S., Kisseleff, S., Querol, J., Lei, L., Vu, T. X., and Goussetis, G. 2021. Satellite communications in the new space era: A survey and future challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 23, 1. IEEE, Piscataway NJ, 70–109. <https://doi.org/10.1109/comst.2020.3028247>.

- [37] Mensen, H. 2014. *Moderne Flugsicherung*. Springer, Berlin, Heidelberg. 978-3-642-54293-0.
- [38] Teunissen, P. J. G. and Montenbruck, O., Eds. 2017. *Springer handbook of global navigation satellite systems*. Springer Handbooks. Springer International Publishing, Cham.
- [39] Osechas, O. and Berz, G. 2016. Improving the availability of LDACS-based APNT with air-to-air ranging. In *2016 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*. IEEE, Piscataway, NJ, 91–99.
<https://doi.org/10.1109/PLANS.2016.7479687>.
- [40] Zampieri, G., McGraw, G., Osechas, O., Weaver, B., Meurer, M., and Kalyanaraman, S. 2022. LDACS navigation system design considerations. In *Proceedings of the 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2022)*. ION GNSS+, The International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. Institute of Navigation, Manassas VA, 261–275. <https://doi.org/10.33012/2022.18411>.
- [41] Strohmeier, M., Schafer, M., Lenders, V., and Martinovic, I. 2014. Realities and challenges of nextgen air traffic management: The case of ADS-B. *IEEE Communications Magazine* 52, 5. IEEE, Piscataway NJ, 111–118.
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6815901>.
- [42] Kuchar, J. K. and Drumm, A. C. 2007. The traffic alert and collision avoidance system. *Lincoln Laboratory Journal* 16, 2. Massachusetts Institute of Technology, Lexington MA, 277–296.
- [43] Kochenderfer, M. J., Holland, J. E., and Chryssanthacopoulos, J. P. 2012. Next generation airborne collision avoidance system. *Lincoln Laboratory Journal* 19, 1. Massachusetts Institute of Technology, Lexington MA, 17–33.
- [44] Zolfaghari, A., Hinze, N., Trani, A., and Post, J. 2023. Evaluating benefits of reduced separation minima for North Atlantic traffic through computer simulations. In *AIAA AVIATION 2023 Forum*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia. <https://doi.org/10.2514/6.2023-4106>.
- [45] Dolan, J., Garcia, M. A., and Sirigu, G. 2023. Aireon space based aircraft position validation and multilateration solution. In *2023 IEEE/AIAA 42nd Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. IEEE, Piscataway, NJ.
<https://doi.org/10.1109/dasc58513.2023.10311332>.
- [46] Ghosh, R., Schilling, T., and Wicke, K. 2017. Theoretical framework of systems design for the air transportation system including an inherently quantitative philosophy of scenario development. *Journal of Air Transport Management* 58. Elsevier, Amsterdam, 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.09.007>.

10 Literaturverzeichnis

- [47] Ilčev, S. D. 2013. Global aeronautical communications, navigation and surveillance. AIAA education series. AIAA American Inst. of Aeronautics and Astronautics, Reston, Va. 1624101941.
- [48] ICAO. 2006. Convention on International Civil Aviation. Doc 7300/9. 9th Edition, Montréal, Quebec. 92-9194-754-7.
- [49] ICAO. 2010. Annex 6 Part 1. Operation of Aircraft: International Commercial Air Transport - Aeroplanes. 9th Edition, Montréal, Quebec. 978-92-9231-536-8.
- [50] Florio, F. de. 2016. Airworthiness. An introduction to aircraft certification and operations. Butterworth-Heinemann, Oxford. 978-0-08-100888-1.
- [51] ICAO. 2009. Review of the Classification and Definitions used for Civil Aviation Activities. Tenth Session of the Statistics Division. Working Paper. International Civil Aviation Organization, Montréal, Quebec.
- [52] FAA. 2024. General Aviation and Part 135 Activity Surveys - CY 2019. https://www.faa.gov/data_research/aviation_data_statistics/general_aviation/cy2019. Zuletzt geprüft am 05.04.2024.
- [53] National Transportation Safety Board. 2019. NTSB US Civil Aviation Accident Statistics. <https://www.nts.gov/safety/data/Pages/AviationDataStats2019.aspx>. Zuletzt geprüft am 05.04.2024.
- [54] Oestergaard, J. K. 2019. An overview of the U.S. commercial aircraft fleet. <https://dsm.forecastinternational.com/2019/10/01/an-overview-of-the-u-s-commercial-aircraft-fleet-2/>. Zuletzt geprüft am 05.04.2024.
- [55] Bureau of Transportation Statistics. 2022. Air carrier financial : Schedule B-43 inventory. <https://www.transtats.bts.gov/>. Zuletzt geprüft am 05.04.2024.
- [56] ICAO EUR-NAT Office. 2019. Application of Separation Minima - North Atlantic Region (NAT ASM). NAT Doc 008. 1st Edition - Amendment 9. ICAO - European and North Atlantic (EUR/NAT) Office, Neuilly sur Seine.
- [57] EUROCONTROL and FAA. Communications Operating Concept and Requirements for the Future Radio System. COCR Version 2.0 2007.
- [58] Airbus. 2004. Getting to grips with datalink. STL 945.3173/04. Airbus SAS - Flight Operations Support.
- [59] Kerr, R. B. 1995. Data communications management for the Boeing 777 airplane. In *14th DASC Digital Avionics Systems Conference AIAAIEEE. 5-9 November 1995, Cambridge, Massachusetts*. Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE Order Dept. [distributor], New York, Piscataway NJ, 51–56. <https://doi.org/10.1109/DASC.1995.482805>.
- [60] SESAR Joint Undertaking. 2016. VDL Mode 2 measurement, analysis and simulation campaign.

- [61] Lee, T. and Nakicenovic, N. 1990. Technology life cycles and business decisions. In *Life cycles and long waves*, T. Vaško, Ed. Lecture notes in economics and mathematical systems 340. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, 1–18.
- [62] Christensen, C. M. 1992. Exploring the limits of the technology S - curve. Part II: Architectural technologies. *Production and Operations Management* 1, 4. John Wiley & Sons, Ltd, 358–366. <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.1992.tb00002.x>.
- [63] Moore, M. 2010. Aviation frontiers: On-demand aircraft. In *10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia. <https://doi.org/10.2514/6.2010-9343>.
- [64] Liu, L. 2023. Model-based technology roadmapping of sustainable aviation technologies. Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA.
- [65] ICAO EUR-NAT Office. 2024. Data Link Performance and Equipage Report 2023. ICAO - European and North Atlantic (EUR/NAT) Office, Neuilly sur Seine.
- [66] Sun, J., Olive, X., Strohmeier, M., Schafer, M., Martinovic, I., and Lenders, V. 2021. OpenSky report 2021: Insights on ADS-B mandate and fleet deployment in times of crisis. In *2021 IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. IEEE, Piscataway, NJ, 1–10. <https://doi.org/10.1109/DASC52595.2021.9594361>.
- [67] Common Taxonomy Team. 2013. Phase of Flight. Definitions and Usage Notes. International Civil Aviation Organization, Montréal, Quebec.
- [68] Lawless, C. 2020. Assembling airspace: The Single European Sky and contested transnationalities of European air traffic management. *Social studies of science* 50, 4. Sage Publications, London, 680–704. <https://doi.org/10.1177/0306312720920704>.
- [69] Mihetec, T., Jakšić, Z., and Steiner, S. 2011. Air space management procedures in Europe. In *14th International Conference on Transport Science ICTS, 2011. Maritime, Transport and Logistics, Conference Proceedings*. University of Ljubljana, Faculty of Maritime Studies and Transport, Portorož, Slovenien.
- [70] Will, A. and Vance, S. M. 2022. Aviation organization strategy development in national airspace modernization. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*. Embry-Riddle Aeronautical University, Daytona Beach FL. <https://doi.org/10.15394/ijaaa.2022.1700>.
- [71] Deutsche Flugsicherung. 2023. Sicherer Sichtflug. Tipps und Informationen zum sicheren Fliegen in Deutschland. <https://dfs.de/homepage/de/medien/publikationen/sicherer-sichtflug.pdf?cid=ic0>. Zuletzt geprüft am 24.10.2024.
- [72] Greenleaf, W. and Wichgers, J. 2019. Why advanced VDL provides viable way forward. In *2019 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*. IEEE, Piscataway NJ, 1–9. <https://doi.org/10.1109/ICNSURV.2019.8735388>.

10 Literaturverzeichnis

- [73] ICAO EUR-NAT Office. 2021. North Atlantic Operations and Airspace Manual. NAT Doc 007. V.2021-2 (Applicable from July 2021). ICAO - European and North Atlantic (EUR/NAT) Office, Neuilly sur Seine.
- [74] Deloitte. 2018. Fasten your seatbelts: in-flight connectivity takes off. Deloitte, London.
- [75] Marks, T., Hillebrecht, A., and Bellido-Manganell, M. A. 2024. Applications and challenges for future airborne ad-hoc communication networks in ORP airspaces using the L-Band. In *34rd Congress of the International Council of the Aeronautical Societies*.
- [76] Zhang, J., Chen, T., Zhong, S., Wang, J., Zhang, W., Zuo, X., Maunder, R. G., and Hanzo, L. 2019. Aeronautical ad hoc networking for the internet-above-the-clouds. *Proceedings of the IEEE* 107, 5. IEEE, Piscataway NJ, 868–911. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2019.2909694>.
- [77] EUROCAE. 2018. Minimum Operational Performance Standard for an Airborne VDL Mode-2 Sstem Operating in the Frequency Range 118-136.975 MHz. ED-92.
- [78] Bellido-Manganell, M. A. 2018. Design approach of a future air-to-air data link. In *2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. IEEE, Piscataway, NJ, 1–9. <https://doi.org/10.1109/DASC.2018.8569594>.
- [79] Berdermann, J., Kriegel, M., Banyś, D., Heymann, F., Hoque, M. M., Wilken, V., Borries, C., Heßelbarth, A., and Jakowski, N. 2018. Ionospheric Response to the X9.3 Flare on 6 September 2017 and Its Implication for Navigation Services Over Europe. *Space Weather* 16, 10, 1604–1615. <https://doi.org/10.1029/2018SW001933>.
- [80] Berdermann, J. and Schmölter, E. 2023. Impact of space weather on navigation and communication services used in aviation. In *19th European Space Weather Week*.
- [81] Verma, A. S., Jaiswal, A. K., Kumar, M., Nigam, G., and Srivastava, S. K. 2013. Measurement of reliability and availability of satellite communication links: Progress and challenges. In *2013 International Conference on Intelligent Systems and Signal Processing (ISSP 2013)*. Vallabh Vidyanagar, Anand (Gujarat), India, 1-2 March 2013. IEEE, Piscataway NJ, 268–271. <https://doi.org/10.1109/ISSP.2013.6526916>.
- [82] Salim, S., Moustafa, N., and Reisslein, M. 2024. Cybersecurity of Satellite Communications Systems: A Comprehensive Survey of the Space, Ground, and Links Segments. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 1. <https://doi.org/10.1109/COMST.2024.3408277>.
- [83] Casaril, F. and Galletta, L. 2024. Securing SatCom user segment: A study on cybersecurity challenges in view of IRIS. *Computers & Security* 140, 103799. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2024.103799>.
- [84] Bögl, T. 2022. IntAirNet - Inter Aircraft Network; Vernetztes Fliegen ohne Infrastruktur : Schlussbericht : Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2019 bis 31.03.2022

- kostenneutral verlängert bis 31.08.2022. Rohde und Schwarz.
<https://doi.org/10.2314/KXP:1871005620>.
- [85] Hampel, J. 2022. IAN - IntAirNet - Inter Aircraft Network - Vernetztes Fliegen ohne Infrastruktur : Schlussbericht IntAirNet : Luftfahrtforschungsprogramm 2018-2022 (LuFo V 3. Aufruf) : Laufzeit des Projektes: 01.01.2019-31.08.2022.
<https://doi.org/10.2314/KXP:1868796108>.
 - [86] Marks, T., Bellido Manganell, M. A., and Hillebrecht, A. Teilvorhaben des DLR im Verbundvorhaben IntAirNet (Inter Aircraft Network) : Schlussbericht. *Teilvorhaben des DLR im Verbundvorhaben IntAirNet (Inter Aircraft Network)*.
<https://doi.org/10.2314/KXP:1869560507>.
 - [87] Rossbach, A. 2022. LDACS-basierte Kommunikation für Luftverkehrsteilnehmer der General Aviation : Teilvorhaben der f.u.n.k.e. AVIONICS GmbH im Verbundprojekt: Inter Aircraft Network - Vernetztes Fliegen ohne Infrastruktur : IntAirNet : ein Verbundvorhaben, gefördert über die Fördermaßnahme Luftfahrtforschungsprogramm V-3 des BMWI : Schlußbericht : Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2019-31.03.2022 (verlängert bis 31.08.2022). IntAirNet Schlussbericht. f.u.n.k.e. AVIONICS GmbH.
<https://doi.org/10.2314/KXP:1870342534>.
 - [88] Schneider, O. and Grzebellus, M. 2022. IntAirNet - Regulatorisches Umfeld für ein vernetztes Fliegen ohne Infrastruktur : Schlussbericht : Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2019-30.08.2022. NavCert GmbH. <https://doi.org/10.2314/KXP:1867607352>.
 - [89] Tichy, S. 2022. IntAirNet - Inter Aircraft Network: Vernetztes Fliegen ohne Infrastruktur : Schlussbericht : Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2019 bis 31.03.2022 -> kostenneutral verlängert bis 31.08.2022. BPS - Bögl & Partner Systemtechnik GmbH.
<https://doi.org/10.2314/KXP:1870127536>.
 - [90] Timm-Giel, A., Ahmed Eltayeb Ahmed, M., Elsner, R., Fuger, K., Lindner, S., and Stolpmann, D. 2022. Inter Aircraft Network (IntAirNet): Vernetztes Fliegen ohne Infrastruktur. Schlussbericht 20V1708F. Institut für Kommunikationsnetze, Technische Universität Hamburg, Am Schwarzenberg-Campus 3, 21073 Hamburg.
<https://doi.org/10.2314/KXP:1865754285>.
 - [91] Bellido-Manganell, M. A. and Schnell, M. 2019. Towards modern air-to-air communications: The LDACS A2A mode. In *2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. IEEE, Piscataway, NJ, 1–10.
<https://doi.org/10.1109/DASC43569.2019.9081678>.
 - [92] Toh, C.-K. 1997. Wireless ATM and ad-hoc networks. Protocols and architectures. Kluwer Academic, Boston. 978-0-792-39822-6.
 - [93] Medina, D. 2011. Geographic load share routing in the airborne internet. Dissertation, Paris Lodron Universität, Salzburg.

- [94] Sakhaee, E., Jamalipour, A., and Kato, N. 2006. Aeronautical ad hoc networks. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2006. WCNC 2006*. IEEE, Piscataway NJ, 246–251. <https://doi.org/10.1109/WCNC.2006.1683472>.
- [95] Tu Dac Ho, Shigeru Shimamoto. 2009. Mobile ad-hoc network based relaying data system for oceanic flight routes in aeronautical communications. *International journal of Computer Networks & Communications*. AIRCC Publishing Corporation, Chennai.
- [96] Vey, Q., Pirovano, A., Radzik, J., and Garcia, F. 2014. Aeronautical ad-hoc network for civil aviation. In *Communication Technologies for Vehicles*, D. Hutchison, T. Kanade, J. Kittler, J. M. Kleinberg, A. Kobsa, F. Mattern, J. C. Mitchell, M. Naor, O. Nierstrasz, C. Pandu Rangan, B. Steffen, D. Terzopoulos, D. Tygar, G. Weikum, A. Sikora, M. Berbineau, A. Vinel, M. Jonsson, A. Pirovano and M. Aguado, Eds. Lecture Notes in Computer Science. Springer International Publishing, Cham, 81–93. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06644-8_8.
- [97] Gräupl, T., Rihacek, C., Haindl, B., and Parrod, Q. 2019. LDACS A/G Specification. SESAR2020 – PJ14-02-01.
- [98] International Telecommunication Union. 1994. Open systems interconnection - model and notation. Data networks and open system communications. ITU-T Recommendation X.200.
- [99] Bilen, T., Ahmadi, H., Canberk, B., and Duong, T. Q. 2022. Aeronautical networks for in-flight connectivity: A tutorial of the state-of-the-art and survey of research challenges. *IEEE Access* 10. IEEE, Piscataway NJ, 20053–20079. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3151658>.
- [100] Haas, E. 2002. Aeronautical channel modeling. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 51, 2. IEEE, Piscataway NJ, 254–264. <https://doi.org/10.1109/25.994803>.
- [101] Gräupl, T., Ehammer, M., and Zwettler, S. 2011. L-DACS1 air-to-air data-link protocol design and performance. In *2011 Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference (ICNS) Proceedings*. IEEE, Piscataway, NJ, B3-1-B3-14. <https://doi.org/10.1109/ICNSURV.2011.5935262>.
- [102] Lindner, S., Fuger, K., Ahmed, M. A. E., and Timm-Giel, A. 2024. Multi-channel self-organized TDMA for future aeronautical mobile ad-hoc networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. IEEE, Piscataway NJ, 1–15. <https://doi.org/10.1109/tvt.2024.3380316>.
- [103] Jansen, L. J., Mäurer, N., Ewert, T., Gräupl, T., and Schmitt, C. 2023. Improving the lifespan of LDACS air-to-air multi-hop connections by heading direction. In *2023 IEEE/AIAA 42nd Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. IEEE, Piscataway, NJ, 1–7. <https://doi.org/10.1109/DASC58513.2023.10311259>.

- [104] Zheng, B., Zhuo, K., Zhang, H., and Wu, H.-X. 2022. A novel airborne greedy geographic routing protocol for flying ad hoc networks. *Wireless Networks*. Springer, Heidelberg, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11276-022-03030-9>.
- [105] Fuger, K., Petersen, C., and Timm-Giel, A. 2022. AODV-LD: Link duration based routing for multi-hop aircraft-to-ground communication. In *2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring)*. IEEE, Piscataway, NJ, 1–5. <https://doi.org/10.1109/VTC2022-Spring54318.2022.9860831>.
- [106] Hillebrecht, A., Marks, T., and Gollnick, V. 2023. An aeronautical data communication demand model for the North Atlantic oceanic airspace. *CEAS Aeronautical Journal* 14, 2. Springer, Heidelberg, 553–567. <https://doi.org/10.1007/s13272-023-00651-4>.
- [107] Jansen, L. J., Mäurer, N., and Gräupl, T. 2022. Secure point-to-point long-distance multi-hop connections in a dense airplane mesh-network using LDACS. In *2022 IEEE/AIAA 41st Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. IEEE, Piscataway, NJ, 1–10. <https://doi.org/10.1109/DASC55683.2022.9925813>.
- [108] Mäurer, N., Gräupl, T., and Schmitt, C. 2023. L-band digital aeronautical communications system (LDACS). RFC 9372. IETF, Fremont, CA, USA.
- [109] Bellido-Manganell, M. A., Graupl, T., Heirich, O., Maurer, N., Filip-Dhaubhadel, A., Mielke, D. M., Schalk, L. M., Becker, D., Schneckenburger, N., and Schnell, M. 2022. LDACS flight trials: Demonstration and performance analysis of the future aeronautical communications system. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 58, 1, 615–634. <https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3111722>.
- [110] Mäurer, N. 2023. Secure communications in next generation digital aeronautical datalinks. *Dr. Hut Verlag*.
- [111] Bellido-Manganell, M. A. and Schnell, M. 2021. Feasibility of the frequency planning for LDACS air-to-air communications in the L-band. In *2021 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS) Proceedings*. IEEE, Piscataway, NJ, 1–14. <https://doi.org/10.1109/ICNS52807.2021.9441623>.
- [112] Kopyto, D., Lindner, S., Schulz, L., Stolpmann, D., Bauch, G., and Timm-Giel, A. 2022. Deep learning-based dynamic spectrum access for coexistence of aeronautical communication systems. In *2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall)*. IEEE, Piscataway, NJ, 1–5. <https://doi.org/10.1109/VTC2022-Fall57202.2022.10012932>.
- [113] Lindner, S., Stolpmann, D., and Timm-Giel, A. 2021. Time- and frequency-domain dynamic spectrum access: Learning cyclic medium access patterns in partially observable environments. Conference on Networked Systems 2021. *Electronic Communications of the EASST*, 80. European Association of Software Science and Technology. <https://doi.org/10.14279/tuj.eceasst.80.1164.1122>.

10 Literaturverzeichnis

- [114] Bellido-Manganell, M. A., Fiebig, U.-C., and Walter, M. 2022. Aircraft-to-aircraft channel measurements in the VHF/UHF band: Analysis of the line-of-sight and lake-reflected channel components. In *2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall)*. IEEE, Piscataway, NJ, 1–7. <https://doi.org/10.1109/VTC2022-Fall57202.2022.10012832>.
- [115] ICAO. 2006. Manual on Required Communication Performance (RCP). 9869. 1st Edition. International Civil Aviation Organization, Montréal, Quebec.
- [116] ICAO. 2012. Satellite Voice Guidance Material. 1st Edition. International Civil Aviation Organization, Montréal, Quebec.
- [117] ICAO. 2013. Global Operational Data Link Document. 2nd Edition. International Civil Aviation Organization, Montréal, Quebec.
- [118] ICAO. 2017. Global operational data link (GOLD) manual. First Edition. Doc 10037. International Civil Aviation Organization, Montréal, Quebec. 978-92-9258-192-3.
- [119] EUROCAE. 2011. Safety and Performance Standard for Air Traffic Data Link Services in Oceanic and Remote Airspace. ED-122 Change 1. Oceanic SPR Standard.
- [120] EUROCAE. 2016. Safety and Performance Requirements Standard for Baseline 2 ATS Data Communications. ED-228A. Baseline 2 SPR Standard.
- [121] EUROCAE. 2007. Safety and Performance Standard for Air Traffic Data Link Services in Oceanic and Remote Airspace. ED-122. Oceanic SPR Standard.
- [122] ICAO. 2018. Finalization of LDACS draft SARPs. Second Meeting DCIWG (Data Commun. Infrastructure Work. Group), Montréal, Quebec.
- [123] ICAO. 2016. Procedures for Air Navigation Services - Air Traffic Management (PANS-ATM). 16th Edition. Doc 4444, Montréal, Quebec. 978-92-9258-081-0.
- [124] Garcia, M. A., Stafford, J., Minnix, J., and Dolan, J. 2015. Aireon space based ADS-B performance model. In *2015 Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference (ICNS) Proceedings*. IEEE, Piscataway, NJ, C2-1-C2-10. <https://doi.org/10.1109/ICNSURV.2015.7121219>.
- [125] EUROCAE. 2004. Safety and Performance Requirements Standard for Air Traffic Data Link Services in Continental Airspace. ED-120. Continental SPR Standard.
- [126] EUROCAE. 2007. Safety and Performance Requirements Standard for Air Traffic Data Link Services in Continental Airspace. ED120 Change 1. Continental SPR Standard.
- [127] EUROCAE. 2007. Safety and Performance Requirements Standard for Air Traffic Data Link Services in Continental Airspace. ED-120 Change 2. Continental SPR Standard_.
- [128] EUROCAE. 2019. Safety and Performance Requirements Standard for Air Traffic Data Link Services in Continental Airspace. ED-120 Change 3. Continental SPR Standard.

- [129] Kerczewski, R. J., Budinger, J. M., and Gilbert, T. J. 2008. Technology assessment results of the EUROCONTROL/FAA future communications study. In *2008 IEEE Aerospace Conference*. IEEE, Piscataway, NJ, 1–13.
<https://doi.org/10.1109/AERO.2008.4526376>.
- [130] Yang, J., Sun, K., He, H., Jiang, X., and Chen, S. 2022. Dynamic virtual topology aided networking and routing for aeronautical ad-hoc networks. *IEEE Transactions on Communications* 70, 7. IEEE, Piscataway NJ, 4702–4716.
<https://doi.org/10.1109/TCOMM.2022.3177599>.
- [131] Izadi, A., Hinze, N., and Trani, A. A. 2019. Validating simulations of oceanic flights using data link communication messages. In *2019 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*. IEEE, Piscataway NJ, 1–12.
<https://doi.org/10.1109/ICNSURV.2019.8735264>.
- [132] Plass, S. 2012. Seamless networking for aeronautical communications: One major aspect of the SANDRA concept. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 27, 9. IEEE, Piscataway NJ, 21–27. <https://doi.org/10.1109/MAES.2012.6366089>.
- [133] EUROCONTROL. 2023. Seven year forecast 2023-2029. Forecast update spring 2023.
- [134] Airbus. 2023. Global market forecast 2023. Airbus, Toulouse.
- [135] Rodionova, O., Sbihi, M., Delahaye, D., and Mongeau, M. 2014. North Atlantic aircraft trajectory optimization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 15, 5. IEEE, Piscataway NJ, 2202–2212. <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2312315>.
- [136] Dhief, I. 2018. Optimization of aircraft trajectories over the North Atlantic airspace. Dissertation, Université Paul Sabatier (Toulouse 3).
- [137] ICAO EUR-NAT Office. 2015. Data Link Performance and Equipage Report 2014. ICAO - European and North Atlantic (EUR/NAT) Office, Neuilly sur Seine.
- [138] ICAO EUR-NAT Office. 2016. Data Link Performance and Equipage Report 2015. ICAO - European and North Atlantic (EUR/NAT) Office, Neuilly sur Seine.
- [139] ICAO EUR-NAT Office. 2017. Data Link Performance and Equipage Report 2016. ICAO - European and North Atlantic (EUR/NAT) Office, Neuilly sur Seine.
- [140] ICAO EUR-NAT Office. 2018. Data Link Performance and Equipage Report 2017. ICAO - European and North Atlantic (EUR/NAT) Office, Neuilly sur Seine.
- [141] ICAO EUR-NAT Office. 2019. Data Link Performance and Equipage Report 2018. ICAO - European and North Atlantic (EUR/NAT) Office, Neuilly sur Seine.
- [142] ICAO EUR-NAT Office. 2020. Data Link Performance and Equipage Report 2019. ICAO - European and North Atlantic (EUR/NAT) Office, Neuilly sur Seine.
- [143] ICAO EUR-NAT Office. 2021. Data Link Performance and Equipage Report 2020. ICAO - European and North Atlantic (EUR/NAT) Office, Neuilly sur Seine.

- [144] ICAO EUR-NAT Office. 2022. Data Link Performance and Equipage Report 2021. ICAO - European and North Atlantic (EUR/NAT) Office, Neuilly sur Seine.
- [145] ICAO EUR-NAT Office. 2023. Data Link Performance and Equipage Report 2022. ICAO - European and North Atlantic (EUR/NAT) Office, Neuilly sur Seine.
- [146] ICAO EUR-NAT Office. 2019. NAT Traffic and Fleet Forecast. NAT Traffic Demand Forecast Methodology and Projection 2018-2038. NAT SPG/55 Conclusion 55/15. ICAO - European and North Atlantic (EUR/NAT) Office, Neuilly sur Seine.
- [147] ICAO EUR-NAT Office. 2020. 2019 Annual Safety Report. North Atlantic Systems Planning Group. ICAO - European and North Atlantic (EUR/NAT) Office, Neuilly sur Seine.
- [148] Linke, F. 2014. Trajectory Calculation Module (TCM) - Tool description and validation. Technischer Bericht. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
- [149] Pawlovicz, R. 2020. M-Map: A mapping package for MATLAB.
- [150] Hillebrecht, A., Marks, T., and Gollnick, V. 2022. Assessment of real-time data transmission via ad-hoc communication networks in the North Atlantic oceanic airspace. In *33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Societies*.
- [151] Marks, T. and Hillebrecht, A. 2022. Cluster structure and gateway availability of ad-hoc communication networks in the North Atlantic airspace. In *33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Societies*.
- [152] Marks, T., Hillebrecht, A., and Linke, F. 2023. Modeling air-to-air communication networks in the North Atlantic region. *CEAS Aeronautical Journal* 14, 2. Springer, Heidelberg, 569–589. <https://doi.org/10.1007/s13272-023-00656-z>.
- [153] Sabre Airline Solutions. 2020. Sabre AirVision Market Intelligence. www.sabreairlinesolutions.com. Zuletzt geprüft am 14.07.2023.
- [154] EUROCONTROL. 2014. User manual for the Base of Aircraft Data (BADA). Revision 3.12. EUROCONTROL.
- [155] International Air Transport Association. 2019. Air passenger market analysis.
- [156] Gräupl, T. and Mäurer, N. 2019. An air traffic management data traffic pattern for aeronautical communication system evaluations. In *2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. IEEE, Piscataway NJ, 1–6. <https://doi.org/10.1109/DASC43569.2019.9081745>.
- [157] Gräupl, T. 2017. FACTS2: Extended simulation framework for ATM communication demand analysis of Europe. In *2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC 2017)*. IEEE, Piscataway, NJ, 1–8. <https://doi.org/10.1109/DASC.2017.8102053>.
- [158] Ehammer, M., Gräupl, T., and Polo, E. 2011. AeroMACS data traffic model. In *2011 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS 2011)*. IEEE, Piscataway, NJ, G5-1-G5-10. <https://doi.org/10.1109/ICNSURV.2011.5935282>.

- [159] Mori, R. 2014. Refined collision risk model for oceanic flight under longitudinal distance-based separation in ADS-C environment. *Journal of Navigation* 67, 5. Cambridge University Press, Cambridge, 845–868.
<https://doi.org/10.1017/S0373463314000162>.
- [160] Alam, A. S., Hu, Y.-F., Pillai, P., Xu, K., and Baddoo, J. 2017. Optimal datalink selection for future aeronautical telecommunication networks. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 53, 5. IEEE, Piscataway NJ, 2502–2515.
<https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2701918>.
- [161] Ayaz, S., Hoffmann, F., Epple, U., German, R., and Dressler, F. 2012. Performance evaluation of network mobility handover over future aeronautical data link. *Computer Communications* 35, 3. Elsevier, Amsterdam, 334–343.
<https://doi.org/10.1016/j.comcom.2011.10.008>.
- [162] Bartoli, G., Fantacci, R., and Marabissi, D. 2013. AeroMACS: A new perspective for mobile airport communications and services. *IEEE Wireless Communications* 20, 6. IEEE, Piscataway NJ, 44–50. <https://doi.org/10.1109/MWC.2013.6704473>.
- [163] Depoorter, D. G., Raissouni, O., Garriga, E. T., and Lucke, O. 2016. The across testbed for the future aeronautical data communications. In *Integrated Communications, Navigation, and Surveillance Conference 2016. (ICNS 2016)*. IEEE, Piscataway, NJ, 7D1-1-7D1-13. <https://doi.org/10.1109/ICNSURV.2016.7486375>.
- [164] Erturk, M. C., Haque, J., and Arslan, H. 2010. Challenges of aeronautical data networks. In *2010 IEEE Aerospace Conference*. IEEE, Piscataway NJ, 1–7.
<https://doi.org/10.1109/AERO.2010.5446920>.
- [165] Morlet, C., Ehammer, M., Gräupl, T., and Rokitansky, C.-H. 2010. Characterisation of the data link communication air traffic for the European airspace. In *2010 IEEE/AIAA 29th Digital Avionics Systems Conference (DASC 2010)*. IEEE, Piscataway NJ, 3.C.2-1-3.C.2-13. <https://doi.org/10.1109/DASC.2010.5655376>.
- [166] World Meteorological Organization. 2003. Aircraft meteorological data relay (AMDAR) reference manual. WMO no. 958. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva Switzerland. 92-63-10958-3.
- [167] Hoff, A., Drüe, C., Sonnabend, H.-R., and T. Hauf. 2014. Verkehrsflugzeuge als meteorologische Beobachtungssysteme. *Promet* 39, 1/2. Selbstverl. des Deutschen Wetterdienst, Offenbach, 104–116.
- [168] Hoff, A., Drüe, C., and Sonnabend, H.-R. 2013. Messphysik und Datenverarbeitung der Verkehrsflugzeuge als meteorologischer Sensorträger. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 241. Selbstverl. des Deutschen Wetterdienst, Offenbach. 978-3-88148-468-8.
- [169] Oberkamp, W. L. and Roy, C. J. 2010. Verification and validation in scientific computing. Cambridge University Press, New York. 978-0-521-11360-1.

10 Literaturverzeichnis

- [170] ICAO EUR-NAT Office. 2020. NAT Region Aeronautical Radio Stations 2019. Data Consolidation Report. ICAO - European and North Atlantic (EUR/NAT) Office, Neuilly sur Seine.
- [171] Vieira, L. F. M., Almiron, M. G., and Loureiro, A. A. F. 2011. 3D MANETs: Link probability, node degree, network coverage and applications. In *2011 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. IEEE, Piscataway NJ, 2042–2047. <https://doi.org/10.1109/WCNC.2011.5779443>.
- [172] Jamal, H., Matolak, D. W., and Sun, R. 2015. Comparison of L-DACS and FBMC performance in over-water air-ground channels. In *2015 IEEE/AIAA 34th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. IEEE, Piscataway NJ, 2D6-1-2D6-9. <https://doi.org/10.1109/DASC.2015.7311376>.
- [173] Horst, Y., Bitachon, B. I., Kulmer, L., Brun, J., Blatter, T., Conan, J.-M., Montmerle-Bonnefois, A., Montri, J., Sorrente, B., Lim, C. B., Védrenne, N., Matter, D., Pommaré, L., Baeuerle, B., and Leuthold, J. 2023. Tbit/s line-rate satellite feeder links enabled by coherent modulation and full-adaptive optics. *Light, science & applications* 12, 153. Springer, Heidelberg. <https://doi.org/10.1038/s41377-023-01201-7>.

A. Anhang

Tabelle A-10-1: Flugphasendefinition nach CICTT, ICAO [67]

Flugphase nach CICTT / ICAO Taxonomie	Beschreibung	Aggregierte Flugphase für Nutzwertanalyse
Standing (STD)	<i>Prior to pushback or taxi, or after arrival, at the gate, ramp, or parking area, while the aircraft is stationary.</i>	Bodenoperation
Pushback/Towing (PBT)	<i>Aircraft is moving in the gate, ramp, or parking area, assisted by a tow vehicle (tug).</i>	
Taxi (TXI)	<i>The aircraft is moving on the aerodrome surface under its own power prior to takeoff or after landing.</i>	
Takeoff (TOF)	<i>From the application of takeoff power, through rotation and to an altitude of 35 feet above runway elevation.</i>	
Initial Climb (ICL)	<i>From the end of the Takeoff subphase to the first prescribed power reduction, or until reaching 1,000 feet above runway elevation or the VFR pattern, whichever comes first.</i>	An- und Abflug
En-route (ENR)	<i>Instrument Flight Rules (IFR): From completion of Initial Climb through cruise altitude and completion of controlled descent to the Initial Approach Fix (IAF). Visual Flight Rules (VFR): From completion of Initial Climb through cruise and controlled descent to the VFR pattern altitude or 1,000 feet above runway elevation, whichever comes first.</i>	Streckenflug (kontinental)
Approach (APR)	<i>Instrument Flight Rules (IFR): From the Initial Approach Fix (IAF) to the beginning of the landing flare. Visual Flight Rules (VFR): From the point of VFR pattern entry, or 1,000 feet above the runway elevation, to the beginning of the landing flare.</i>	An- und Abflug
Landing (LDG)	<i>From the beginning of the landing flare until aircraft exits the landing runway, comes to a stop on the runway, or when power is applied for takeoff in the case of a touch-and-go landing.</i>	
Emergency Descent (EMG)	<i>A controlled descent during any airborne phase in response to a perceived emergency situation.</i>	nicht relevant
Maneuvering (MNV)	<i>Low altitude/aerobatic flight operations.</i>	
Uncontrolled Descent (UND)	<i>A descent during any airborne phase in which the aircraft does not sustain controlled flight.</i>	
Post-Impact (PIM)	<i>Any of that portion of the flight which occurs after impact with a person, object, obstacle or terrain.</i>	
Unknown (UNK)	<i>Phase of flight is not discernible from the information available.</i>	

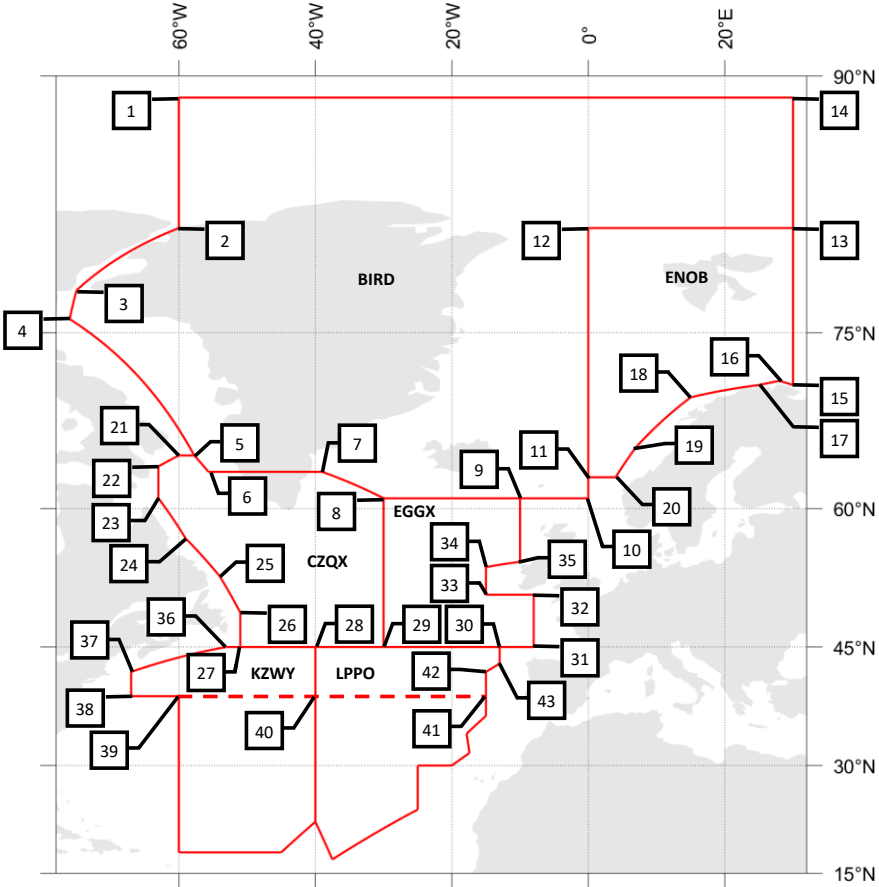


Abbildung A-1: Definition der OCA im Simulationsbereich

Tabelle A-10-2: Koordinaten der OCA-Eckpunkte

Eckpunkt	Breitengrad	Längengrad	Eckpunkt	Breitengrad	Längengrad
1	89°00'00"N	60°00'00"W	23	61°00'00"N	63°00'00"W
2	82°00'00"N	60°00'00"W	24	57°00'00"N	59°00'00"W
3	78°00'00"N	75°00'00"W	25	53°00'00"N	54°00'00"W
4	76°00'00"N	76°00'00"W	26	49°00'00"N	51°00'00"W
5	65°00'00"N	57°45'00"W	27	45°00'00"N	51°00'00"W
6	63°30'00"N	55°40'00"W	28	45°00'00"N	40°00'00"W
7	63°30'00"N	39°00'00"W	29	45°00'00"N	30°00'00"W
8	61°00'00"N	30°00'00"W	30	45°00'00"N	13°00'00"W
9	61°00'00"N	10°00'00"W	31	45°00'00"N	08°00'00"W
10	61°00'00"N	00°00'00"W	32	51°00'00"N	08°00'00"W
11	63°00'00"N	00°00'00"W	33	51°00'00"N	15°00'00"W
12	82°00'00"N	00°00'00"W	34	54°00'00"N	15°00'00"W
13	82°00'00"N	30°00'00"E	35	54°34'00"N	10°00'00"W
14	89°00'00"N	30°00'00"E	36	45°00'00"N	53°00'00"W
15	71°00'00"N	30°00'00"E	37	42°00'00"N	67°00'00"W
16	71°20'00"N	28°00'00"E	38	39°00'00"N	67°00'00"W
17	71°20'00"N	25°00'00"E	39	39°00'00"N	60°00'00"W
18	70°00'00"N	15°00'00"E	40	39°00'00"N	40°00'00"W
19	65°45'00"N	07°00'00"E	41	39°00'00"N	15°00'00"W
20	63°00'00"N	04°00'00"E	42	42°00'00"N	15°00'00"W
21	65°00'00"N	60°00'00"W	43	43°00'00"N	13°00'00"W
22	64°00'00"N	63°00'00"W			

Tabelle A-10-3: Übersicht der verwendeten VHF-Bodenstationen

Bezeichner	Land	Stadt	Längengrad [°]	Breitengrad [°]	Höhe [ft]
FAE	Denmark	Torshavn	62,0200	-6,8200	85
SYU	United Kingdom	Stornoway	58,2000	-6,3200	8
SNN	Ireland	Shannon	52,6800	-8,9200	14
BES	France	Brest	48,4300	-4,4200	99
LCG	Spain	La Coruna	43,3000	-8,3700	100
LIS	Portugal	Lisbon	38,7700	-9,1200	114
KEF	Iceland	Keflavik (Torbjorn)	63,9850	-22,6050	52
VEY	Iceland	Hafell	63,4433	-18,8667	99
SMA	Portugal	Santa Maria	36,9739	-25,1711	94
BDA	Bermudas	Bermuda	32,3642	-64,6786	5
YQY	Nova Scotia	Sydney	46,6167	-60,0492	62
YHZ	Nova Scotia	Halifax (Int)	44,8808	-63,5092	145
BOS	Massachusetts	Boston	42,3642	-71,0057	6
YHO	Newfoundland and Labrador	Hopedale	55,4488	-60,2281	14
YAY	Newfoundland and Labrador	St. Anthony	51,3919	-56,0831	33
YYT	Newfoundland and Labrador	St. Johns	47,6186	-52,7525	141
CNP	Greenland	Nerlerit Inaat	70,7431	-22,6506	14
KUS	Greenland	Kulusuk	65,5736	-37,1236	36
UAK	Greenland	Narsarsuaq	61,1608	-45,5256	34
GOH	Greenland	Nuuk	64,1903	-51,6736	86
JHS	Greenland	Sisimiut	66,9514	-53,7294	10
JEG	Greenland	Aasiaat	68,7219	-52,7847	23
YFB	Nunavut	Iqaluit	63,7569	-68,5561	34
FLW	Portugal	Flores	39,4553	-31,1314	34
FNC	Portugal	Funchal	32,6978	-16,7744	59
ALF	Norway	Alta	69,9761	23,3717	3
TOS	Norway	Tromsø	69,6814	18,9178	10
EVE	Norway	Narvik/Evenes	68,4913	16,6781	26
BOO	Norway	Bodø	67,2692	14,3653	13
TRD	Norway	Trondheim	63,4576	10,9243	17
AES	Norway	Ålesund	62,5625	61,1972	21
YVP	Quebec	Kuujuaq	58,0950	-68,4222	40
YKL	Ontario	Schefferville	54,8053	-66,8053	521
YWK	Newfoundland and Labrador	Wabush	52,9228	-66,8647	551
YYR	Newfoundland and Labrador	Goose Bay	53,3192	-60,4258	49
YIF	Quebec	Saint-Augustin	51,2100	-58,6575	6
YDF	Newfoundland and Labrador	Deer Lake	49,2092	-57,3944	22
YQX	Newfoundland and Labrador	Gander	48,9369	-54,5681	151
YYG	Prince Edward Island	Charlottetown	46,2892	-63,1153	48
YQM	New Brunswick	Moncton	46,1161	-64,6786	71
YSJ	New Brunswick	Saint John	45,3158	-65,8900	109
BGR	Maine	Bangor	44,8072	-68,8281	59
PWM	Maine	Portland	43,6461	-70,3092	23
BED	Massachusetts	Bedford	42,4700	-71,2889	40
PVD	Rhode Island	Providence	41,7239	-71,4283	17
BDL	Connecticut	Windsor Locks	41,9392	-72,6833	53
JFK	New York	New York	40,6397	-73,7789	4

Geographische Verteilung der AOC-Einzelanwendungen

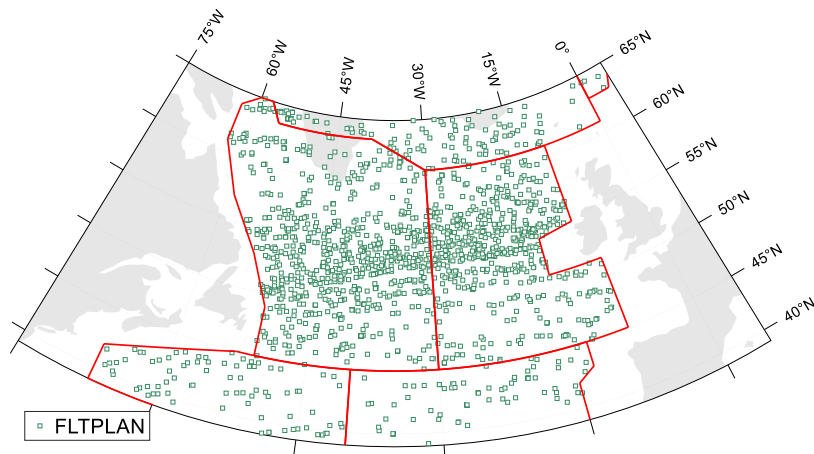


Abbildung A-2: Geographische Verteilung der FLTPLAN-Anwendung

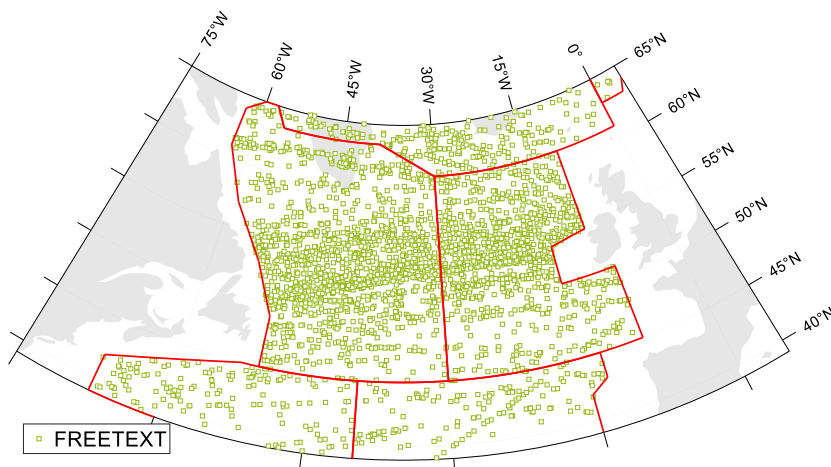


Abbildung A-3: Geographische Verteilung der FREETEXT-Anwendung

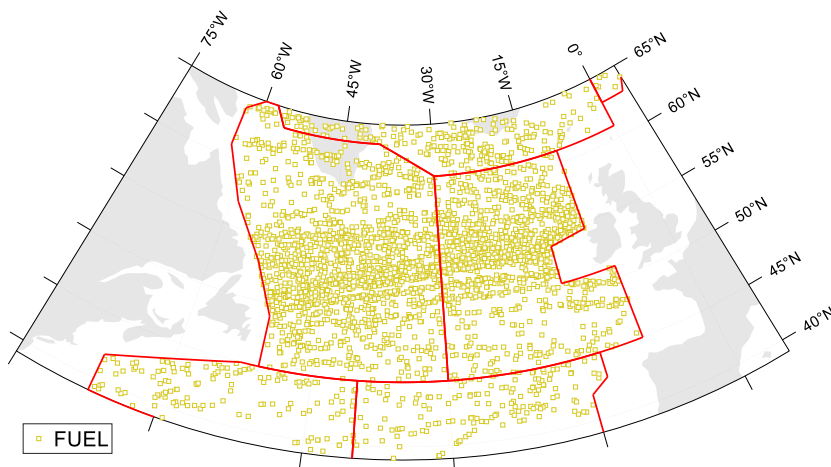


Abbildung A-4: Geographische Verteilung der FUEL-Anwendung

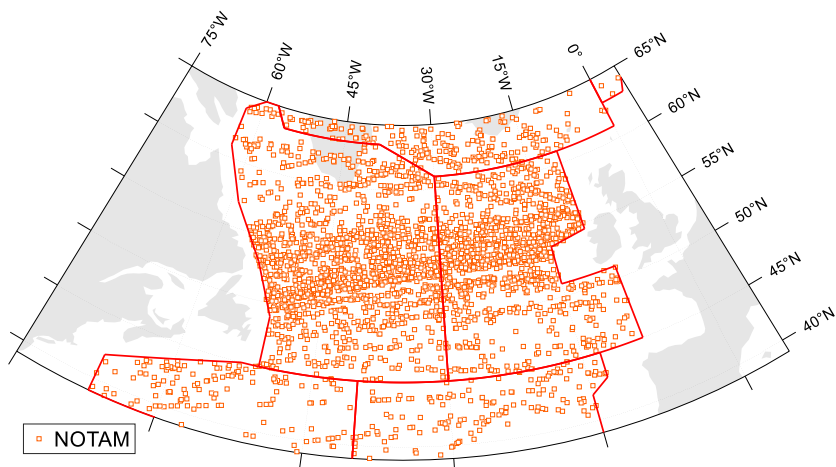


Abbildung A-5: Geographische Verteilung der NOTAM-Anwendung

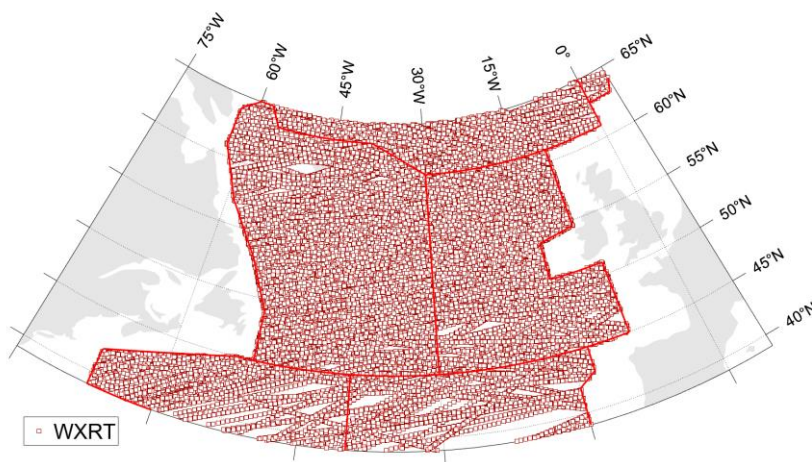


Abbildung A-6: Geographische Verteilung der WXRT-Anwendung

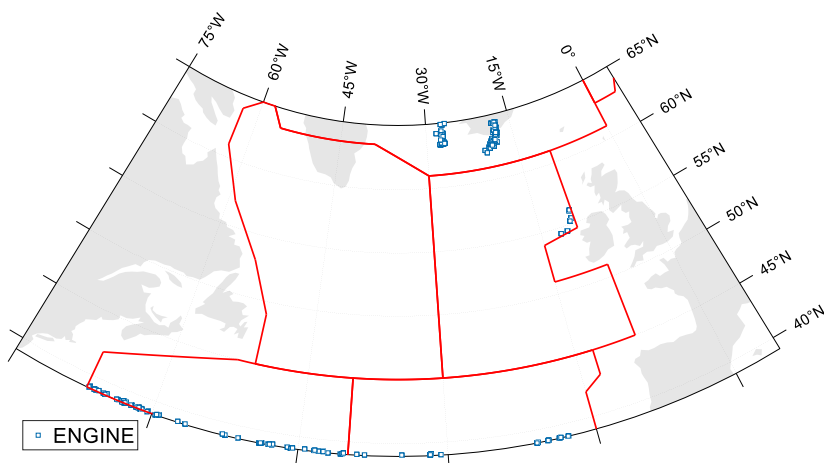


Abbildung A-7: Geographische Verteilung der ENGINE-Anwendung

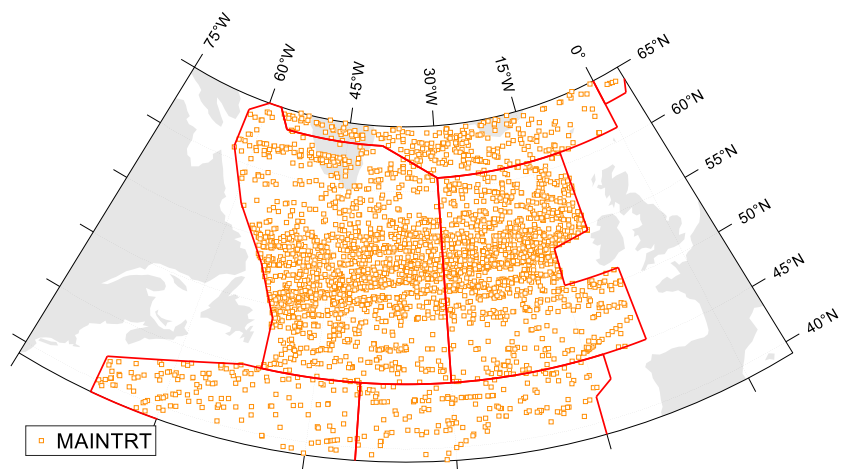


Abbildung A-8: Geographische Verteilung der MAINTRT-Anwendung

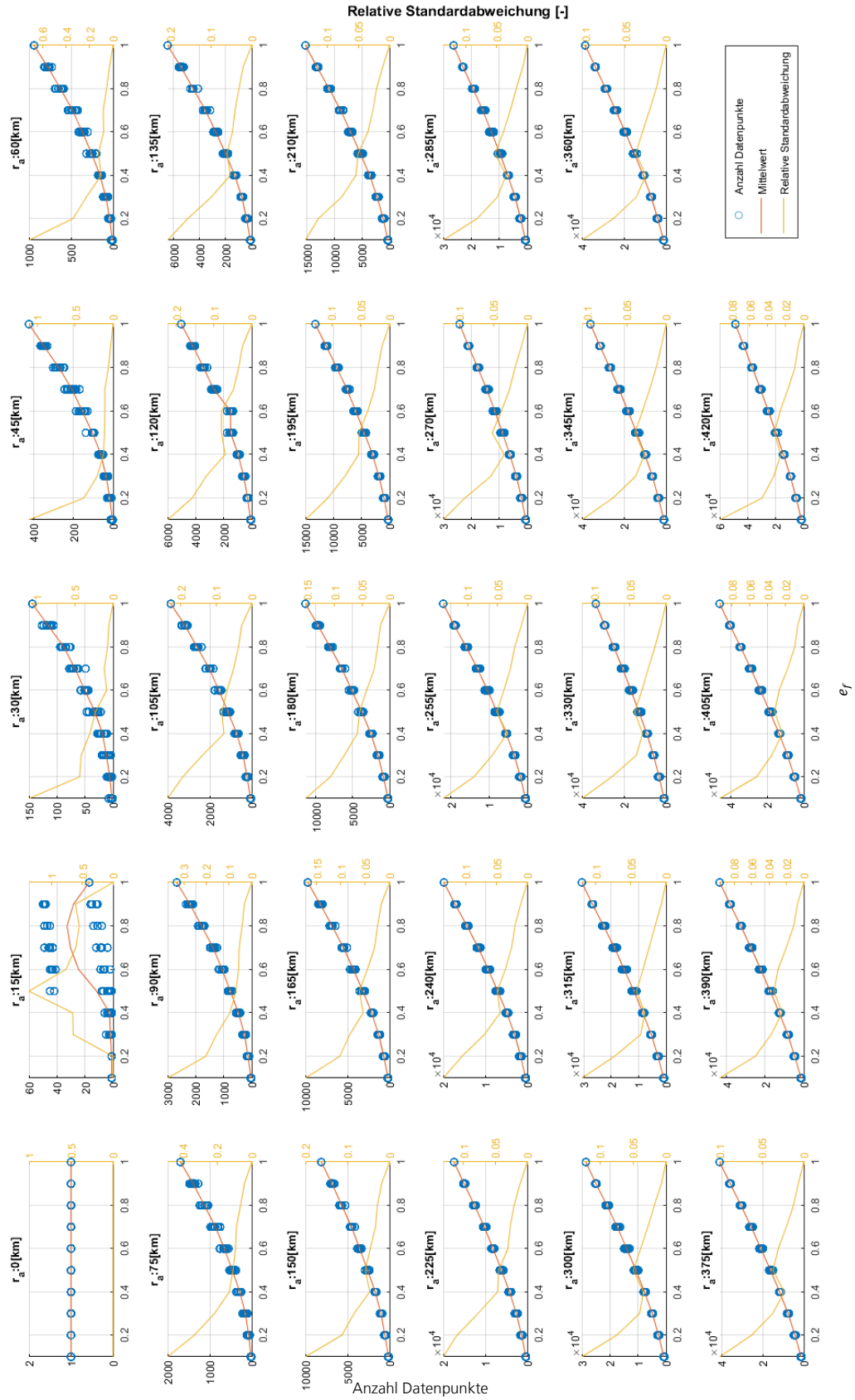


Abbildung A-9: Anzahl Datenpunkte für δ_{GW} und Standardabweichung

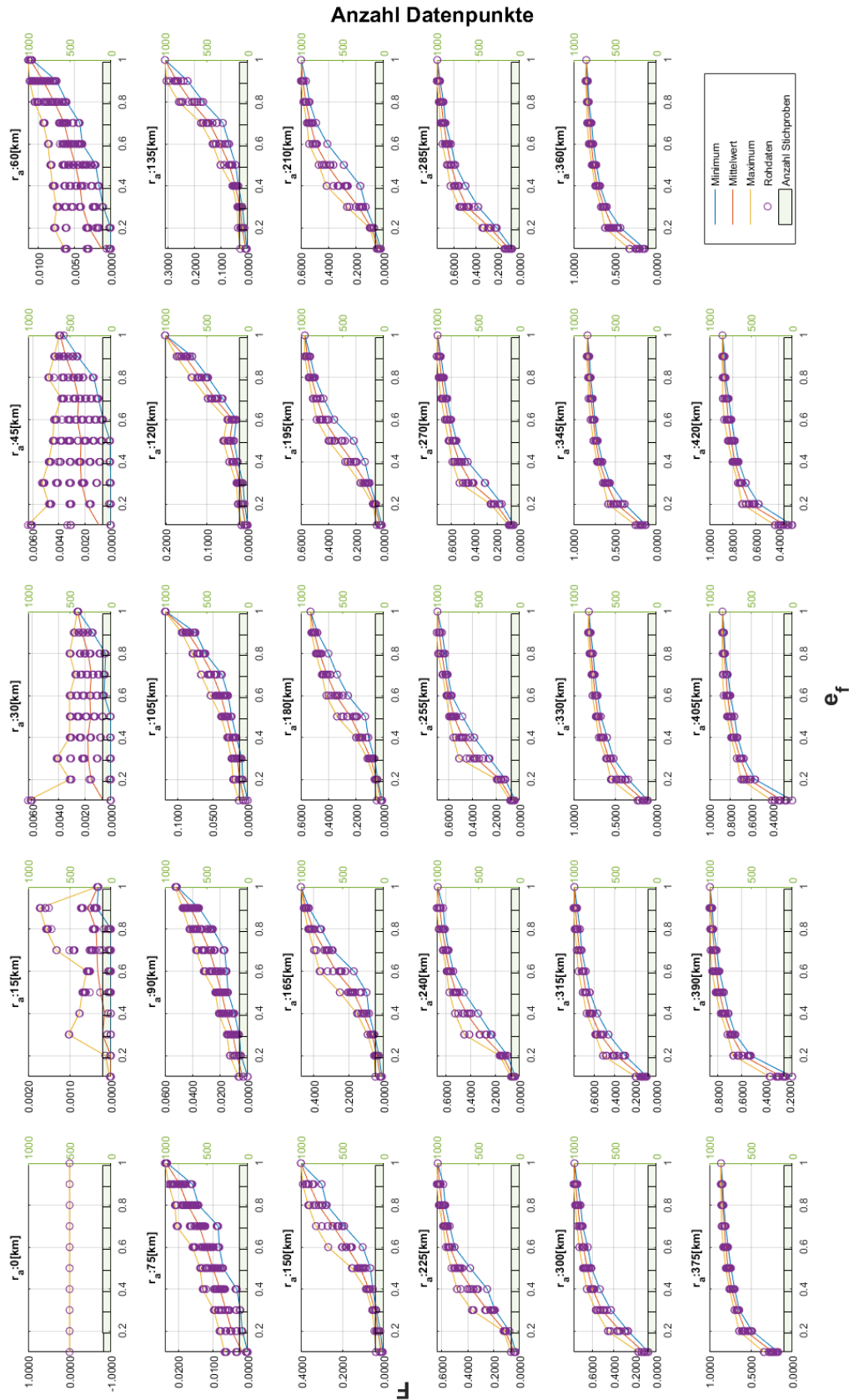
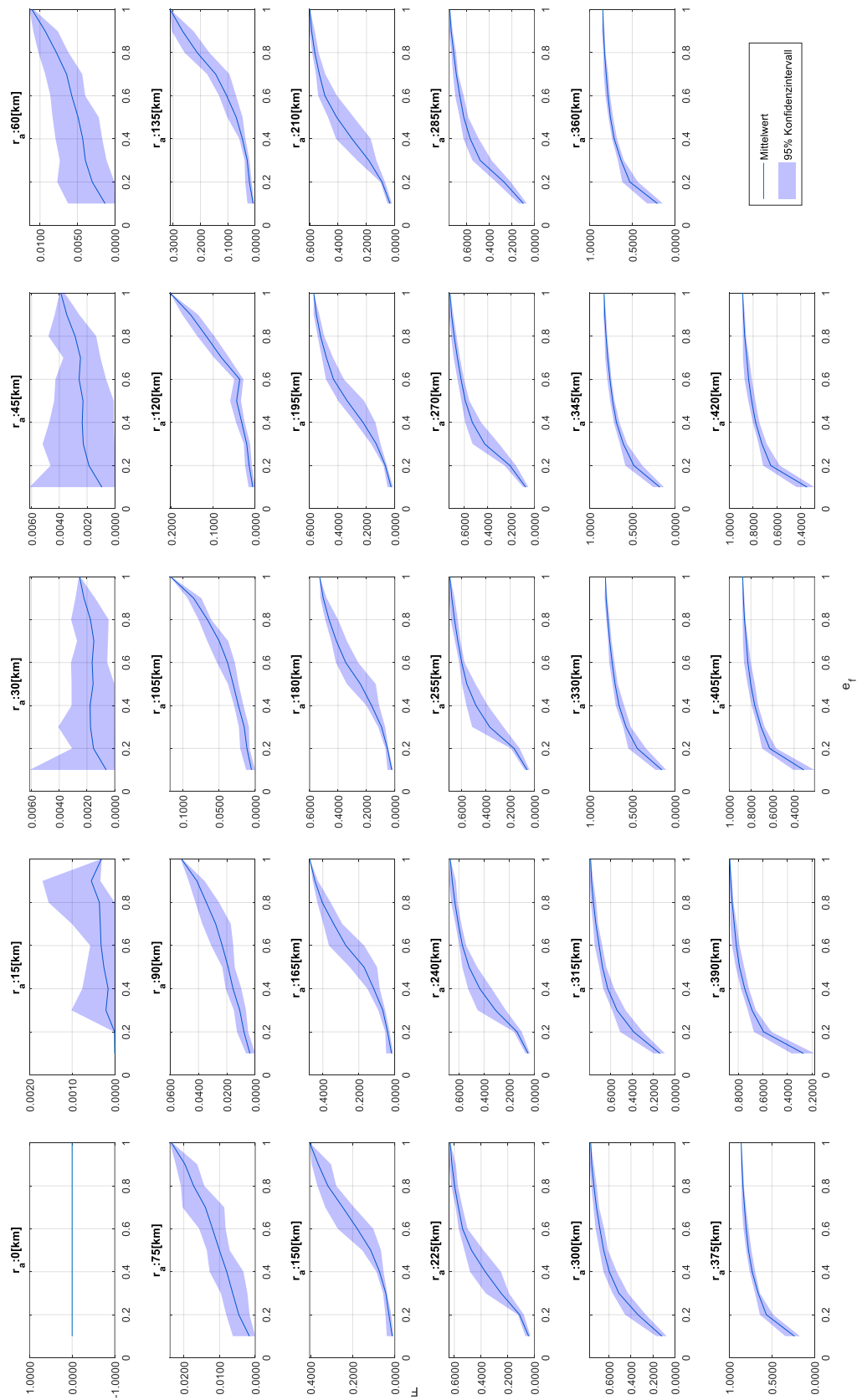


Abbildung A-10: Anzahl der Datenpunkte für F mit Extremwerten und Standardabweichung

Abbildung A-11: Mittelwert und Konfidenzintervall der Kommunikationsbedarfsabdeckung F

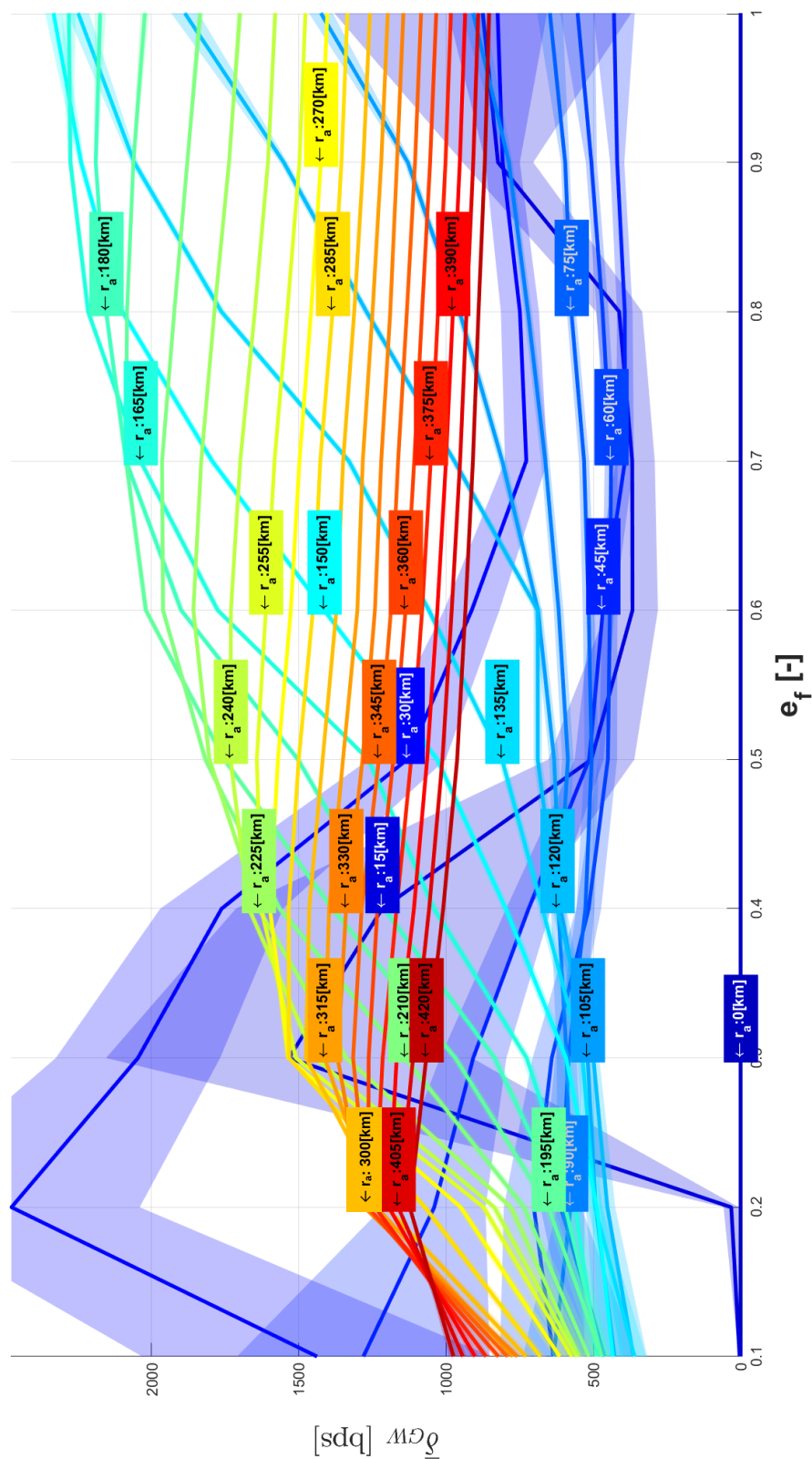


Abbildung A-12: Mittelwert und Konfidenzintervall der Gateway-Datenrate δ_{GW}