

Selbstorganisierende Bord-Bord-Kommunikation für die Luftfahrt

Diplomarbeit am Institut für Telematik
Prof. Dr. M. Zitterbart
Fakultät für Informatik
Universität Karlsruhe (TH)

von

cand. inform.

Juan Cristobal Fries

Betreuer:

Hon.-Prof. Dr. C.-H. Rokitansky

Prof. Dr. M. Zitterbart

Dipl.-Inform. Lars Völker

Tag der Abgabe: 30. Dezember 2006

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Karlsruhe, den 30. Dezember 2006

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Zielsetzung der Arbeit | 1 |
| 1.2 | Gliederung der Arbeit | 2 |
| 2 | Grundlagen | 3 |
| 2.1 | Kommunikation in der Luftfahrt | 3 |
| 2.1.1 | Aufgaben und Funktionen | 3 |
| 2.1.2 | Priorität der Meldungen | 5 |
| 2.1.3 | Kommunikationssysteme | 5 |
| 2.2 | Mobile Ad-hoc-Netze (MANETs) | 9 |
| 2.2.1 | Definitionen und Beispiele | 9 |
| 2.2.2 | Routing | 10 |
| 2.2.3 | Clustering | 12 |
| 2.2.4 | Lokationsdienst | 14 |
| 3 | Analyse | 15 |
| 3.1 | Detaillierte Aufgabenstellung | 15 |
| 3.1.1 | Szenariobeschreibung | 15 |
| 3.1.2 | Bewegungsverhalten | 16 |
| 3.1.3 | Ultrakurzwelle und Radiohorizont | 17 |
| 3.1.4 | Anwendungen für Bord-Bord-Kommunikation | 17 |
| 3.1.5 | Kommunikationsbedarf | 20 |
| 3.2 | Broadband VHF als Basissystem | 20 |
| 3.2.1 | Rahmenstruktur | 21 |
| 3.2.2 | B-VHF Mehrfachzugriff | 22 |
| 3.2.3 | B-VHF Protokolle | 22 |
| 3.2.4 | Prozeduren in B-VHF | 26 |
| 3.3 | Zusammenfassung | 29 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4 | Entwurf | 31 |
| 4.1 | Rahmenwerk | 31 |
| 4.2 | Clusterbildung | 31 |
| 4.2.1 | Cluster-Stabilität | 32 |
| 4.2.2 | Ermittlung der Clusterkriterien | 33 |
| 4.2.3 | Cluster-Eintritt | 34 |
| 4.3 | Streunetzbildung | 35 |
| 4.3.1 | Brückenstationen | 35 |
| 4.3.2 | Initialisierung eines Streunetzes | 38 |
| 4.4 | Pflege des Streunetzes | 40 |
| 4.4.1 | Eintritt von Luftfahrzeugen in das Streunetz | 41 |
| 4.4.2 | Verbindungsübergabe | 42 |
| 4.4.3 | Austritt von Luftfahrzeugen aus dem Streunetz | 43 |
| 4.4.4 | Anbindung an die Bodeninfrastruktur | 44 |
| 4.4.5 | Betrachtung weiterer Problemfälle | 46 |
| 4.4.6 | Koordinierende Kooperation zwischen Leitstationen | 49 |
| 4.5 | Routing | 49 |
| 4.5.1 | Lokales Routing | 49 |
| 4.5.2 | Positionsunterstütztes Geo-Routing | 50 |
| 4.5.3 | Globales Routing | 51 |
| 4.6 | Zusammenfassung | 52 |
| 5 | Implementierung | 53 |
| 5.1 | Simulationsumgebung | 53 |
| 5.2 | Verwendete Bewegungsmodelle | 53 |
| 5.2.1 | LinearAirMobilityModel | 54 |
| 5.2.2 | ConstAirSpeedMobility | 55 |
| 5.3 | Datenstrukturen | 56 |
| 5.3.1 | Pakete | 56 |
| 5.3.2 | Listen | 56 |
| 5.3.3 | Vergleiche | 57 |
| 5.4 | Ablaufplanung und Timer | 58 |
| 5.4.1 | Verteilung der Zeitschlitze | 60 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.5 | Wichtige Prozeduren | 61 |
| 5.5.1 | Berechnung der Cluster-Güte | 63 |
| 5.6 | Parameter | 63 |
| 5.6.1 | Eingabeparameter | 63 |
| 5.6.2 | Ausgabeparameter | 64 |
| 6 | Evaluierung durch Simulation | 77 |
| 6.1 | Szenario 1: Variation der Wahrscheinlichkeit p_L | 77 |
| 6.1.1 | Beschreibung des Szenarios 1 | 77 |
| 6.1.2 | Ergebnisse in Szenario 1 | 79 |
| 6.1.3 | Diskussion der Ergebnisse | 81 |
| 6.2 | Szenario 2: Betrachtung der Clusterstabilität | 83 |
| 6.2.1 | Szenariobeschreibung | 83 |
| 6.2.2 | Vergleich und Diskussion der Ergebnisse in Szenario 2 | 83 |
| 6.2.3 | Variation von α im SQUC-Kriterium | 85 |
| 6.2.4 | Schlussfolgerung | 86 |
| 6.3 | Szenario 3: Auswirkung der Flugbewegung | 86 |
| 6.3.1 | Beschreibung des Szenarios (Flugbewegung) | 86 |
| 6.3.2 | Ergebnisvergleich unterschiedlicher Bewegungsmodelle | 87 |
| 6.4 | Zusammenfassung | 88 |
| 7 | Zusammenfassung und Ausblick | 89 |
| A | Konventionen der Luftfahrt | 91 |
| A.1 | Maßeinheiten und Umrechnungen | 91 |
| A.2 | Abkürzungen | 91 |
| | Literatur | 93 |

1. Einleitung

Der Luftverkehr im europäischen Luftraum (Single European Sky) wird sich laut EUROCONTROL [SSSE⁺05] bis 2020 verdoppeln. Das heutige Kommunikationssystem, das im Wesentlichen auf analoger UKW-Sprachfunktechnik basiert, hat jedoch insbesondere an internationalen Verkehrsflughäfen bereits seine Kapazitätsgrenze erreicht. Um dieses Wachstum bewältigen zu können, muss sich die Flugsicherung zu einem Flugverkehrsmanagement weiterentwickeln, das Aufgaben an Flugbesatzungen übergibt und neue Datendienste zur Kommunikation, Navigation und Flugüberwachung ermöglicht.

So gibt es auch Konzepte, die vorsehen, dass die Piloten den Flugverkehr außerhalb von Nahkontrollbezirken zukünftig selbständig koordinieren. Hierzu müssen Architekturen und Protokolle für ein digitales Kommunikationssystem entwickelt werden, das den digitalen Sprach-/Datenaustausch zwischen verschiedenen Luftfahrzeugen (multicast und point-to-point) erbringt.

Broadband VHF (B-VHF) sieht für die Kommunikation zwischen Luftfahrzeugen die Weiterleitung des Sprach- und Datenverkehrs über Bodenstationen als Relais-Stationen vor. Dies ähnelt der aktuellen Boden-Luft-Kommunikation.

Bei Ausfall einer Bodenstation oder auf Flügen über Ozeane, Polarkappen oder Gebiete mit schwach ausgeprägter Flugsicherung (z. B. Afrika) ist eine Kommunikation über die Bodenstationen als Relais-Stationen nicht mehr möglich. Doch gerade in solchen Fällen ohne Radarführung ist eine dezentrale Bord-Bord-Kommunikation für die sichere Durchführung von Flügen wichtig.

1.1 Zielsetzung der Arbeit

Diese Diplomarbeit soll zur Lösung dieses Problems durch Errichten eines selbstorganisierenden Ad-hoc-Netzes beitragen, in welchem ein Flugzeug zeitweise zum Leit-Luftfahrzeug (master aircraft, MA) erklärt wird und als Relais für die anderen Flugzeug in seiner Nähe fungiert. Dieses Leit-Luftfahrzeug soll die Bodenstation ersetzen und die Sprach- und Datenkommunikation koordinieren. Im Idealfall wird der Kontakt zu einer Bodenstation über die Verbindung mit anderen Luftfahrzeugen aufrechterhalten (multi-hop).

In diesem Zusammenhang ist die Anpassung selbstorganisierender Ad-hoc-Netze an die charakteristischen Anforderungen der Kommunikation in der Luftfahrt von Interesse.

1.2 Gliederung der Arbeit

Das nachfolgende Kapitel gibt eine Einführung in die Grundlagen sowohl der Luftfahrtkommunikation als auch der mobilen Ad-hoc-Netze, die zum Verständnis der Ausführungen notwendig sind.

Kapitel 3 gibt eine Übersicht der Anwendungsmöglichkeiten und der Ansätze, die in Teilen übernommen werden können.

Das Entwurfskapitel beschreibt den eigenen Lösungsansatz und wie er in das bestehende B-VHF-System integriert werden kann.

Im 5. Kapitel wird ausgeführt, wie der Entwurf in der Simulationsumgebung OM-NeT++ implementiert wurde.

Anschließend werden im 6. Kapitel Szenarien definiert und das Protokoll mit verschiedenen Parameterkombinationen in den vorgegebenen Szenarien mittels einer ereignisorientierten Simulation evaluiert.

Die Arbeit schließt mit Kapitel 7, in dem Arbeitsschritte und Ergebnisse zusammengefasst werden. Es wird darauf verwiesen, an welchen Stellen weiterer Forschungsbedarf und Optimierungsmöglichkeiten bestehen.

2. Grundlagen

Dieses Kapitel erläutert die für das weitere Verständnis notwendigen Grundlagen, Definitionen und verwendeten Modelle. Grundlegende Konventionen der Luftfahrt werden im Anhang weiter erläutert.

2.1 Kommunikation in der Luftfahrt

Der folgende Teil beschreibt die Luftfahrtkommunikation mit ihren Aufgaben und Funktionen und verwirklichten oder geplanten Systemen.

2.1.1 Aufgaben und Funktionen

Die Kommunikation in der Luftfahrt dient der Sicherheit des Luftverkehrs und erfolgt als Austausch von Sprache oder Daten im Flugfernmeldedienst.

Die Verordnung über die Betriebsdienste der Flugsicherung (FSBetrV) [Deut01] der Bundesrepublik Deutschland definiert als Aufgabe des Flugfernmeldedienstes die für eine sichere, geordnete und flüssige Abwicklung des Flugverkehrs erforderlichen Flugsicherungsinformationen zu übermitteln (FSBetrV S₂1).

Die Übermittlung der Flugsicherungsinformationen ist als fester Flugfernmeldedienst, beweglicher Flugfernmeldedienst und Fluggrundfunkdienst durchzuführen. Fester Flugfernmeldedienst ist die Nachrichtenübermittlung im festen Flugfernmeldenetz (aeronautical fixed telecommunication network, AFTN). Beweglicher Flugfernmeldedienst (aeronautical mobile service) ist die Nachrichtenübermittlung zwischen Boden- und Luftfunkstellen und zwischen Luftfunkstellen. Fluggrundfunkdienst (aeronautical broadcasting service) ist das Ausstrahlen von Informationen für die Luftfahrt. (FSBetrV S₂2.)

Im folgenden wird der Sprach- und Datenverkehr in der Luftfahrt seiner Funktion nach gemäß [Deut01] in drei Kategorien eingeteilt.

1) Flugverkehrsdienst (ATS)

Flugverkehrskontrolle (air traffic control, ATC) ist die Überwachung und Lenkung der Bewegungen im Luftraum und auf den Rollfeldern von Flugplätzen mit Flugplatzkontrolle zur sicheren, geordneten und flüssigen Abwicklung des Luftverkehrs. Die Flugverkehrskontrolle soll insbesondere Zusammenstöße zwischen Luftfahrzeugen (...) verhindern. Die Flugverkehrskontrolle ist durchzuführen als Flugplatzkontrolle, Anflugkontrolle und Bezirkskontrolle.

Die Verkehrsflussregelung (air traffic flow and capacity management) soll Überlastsituationen bei der Flugverkehrskontrolle verhindern, den Verkehrsablauf möglichst flüssig und wirtschaftlich gestalten und dazu geeignete Maßnahmen der Planung und Steuerung treffen.

Der Fluginformationsdienst (flight information service, FIS) gibt den Führern von Luftfahrzeugen Informationen und Hinweise, die für die sichere, geordnete und flüssige Durchführung von Flügen erforderlich ist.

Ist die Durchführung der Flugverkehrskontrolle auf Grund unzureichender Informationen über den Flugverkehr nach Instrumentenflugregeln in einem Luftraum nicht möglich, kann dort im Rahmen eines erweiterten Fluginformationsdiensts ein Flugverkehrsberatungsdienst (air traffic advisory service) durchgeführt werden. Der Flugsicherung bekannte Luftfahrzeuge, die Flüge nach Instrumentenflugregeln im unkontrollierten Luftraum durchführen, werden untereinander gestaffelt.

Der Flugalarmdienst (alerting service) benachrichtigt die für die Durchführung des Such- und Rettungsdienstes für Luftfahrzeuge zuständigen Stellen über den notwendigen Einsatz des Such- und Rettungsdienstes und unterstützt diese Stellen.

Der Flugberatungsdienst (aeronautical information service, AIS) umfasst die Sammlung, Auswertung und Bekanntmachung der Nachrichten, die für eine sichere, geordnete und flüssige Durchführung von Flügen notwendig ist; die Entgegennahme, Prüfung und Weiterleitung von Flugplänen; die Beratung der Luftfahrzeugführer bei der Flugvorbereitung.

2) Flugbetriebskontrolle (AOC)

Die Flugbetriebskontrolle (aeronautical operational control, AOC) sichert den Benutzern des Luftraums einen kontinuierlich effizienten Betrieb. Sie erfolgt als Austausch von Sprache oder Daten zwischen Luftfahrzeugen und Kontrollzentren, Luftfahrtbetrieben oder Flughafenpersonal.

Es erfolgen Meldungen über Flugbetriebsplanänderungen, Wartung, außerplanmäßigen Landungen, dringend benötigte Luftfahrzeugteile und Material sowie Anweisungen an Luftfahrzeughalter über Änderungen der Erfordernisse für Fluggäste und Besatzung.

Die Sprachkommunikation erfolgt hierbei entweder in Form einer selektiven Punkt-zu-Punkt-Verbindung zur Verständigung der Flugbesatzung mit dem Flugbetriebszentrum oder in Form eines Rundrufs zwischen Flugbesatzungen, insbesondere über Ozeanen oder abgelegenen Regionen.

Meldungen und Berichte über NOTAMs¹, Wetter, Position, Flugstatus, Treibstoffstatus, Triebwerksleistung, Flugplan, Flugbuch, Wartung, Bordbuch, Software-Updates und andere werden in Datenform übermittelt.

3) Fluggastkommunikation (APC)

Die Fluggastkommunikation (aeronautical passenger communication, APC) dient ausschließlich der Unterhaltung der Passagiere an Bord eines Flugzeugs. Diese können während eines Fluges E-Mails senden und empfangen, telefonieren oder Unterhaltungsmedien herunterladen.

2.1.2 Priorität der Meldungen

Für die Vorrangbehandlung ist die in [dNfL06] angegebene Reihenfolge der aufgeführten im beweglichen Flugfunkdienst zulässigen Meldungen maßgebend.

1. Notmeldungen („Mayday“)
2. Dringlichkeitsmeldungen („Pan Pan“)
3. Peilfunkmeldungen („request assistance“)
4. Flugsicherheitsmeldungen
5. Wettermeldungen
6. Flugbetriebsmeldungen
7. Staatstelegramme²

2.1.3 Kommunikationssysteme

Analoger Sprechfunk (DSB-AM)

Die vorgenannten Flugsicherungsinformationen werden heute noch überwiegend im Sprechfunk übertragen, der in [dNfL06] geregelt ist. Für den Flugfunkverkehr hat die ICAO weltweit das UKW-Kanalband 118 MHz – 136,975 MHz (VHF COM / AM(R)S COM) festgelegt, das in 25 kHz bzw. 8.33 kHz Abständen unterteilt ist. Dieses wird derzeit ausschließlich für amplitudenmodulierten Sprechfunk verwendet. Die hier verwendete Modulation (Double Side-Band Amplitude Modulation, DSB-AM) wurde in der Zeit des Zweiten Weltkriegs entwickelt und nutzt die Frequenzbänder aus heutiger Sicht sehr ineffizient und bietet nur eine geringe analoge Sprachqualität. Um eine knappe, unmissverständliche und einheitliche Übermittlungsform zu erzielen, sind definierte Redewendungen und sog. Sprechgruppen zu verwenden. Der Empfang von Meldungen ist in jedem Falle zu bestätigen. Im Sprechfunkverkehr auftretende unbekannte oder unklare Bezeichnungen sind durch Rückfragen zu klären, ehe die Meldung bestätigt wird.

Für gewöhnlich findet der Funkverkehr zwischen einer Bodenstation und Luftfunkstelle statt. Daher sind die meisten Frequenzen den Bodenstationen zugeteilt. Die

| Frequenz | Verwendung |
|-------------|--|
| 121,500 MHz | Internationale Notfrequenz, Hörbereitschaft |
| 122,750 MHz | Allgemeine Luftfahrt / Fläche |
| 122,775 MHz | Flugschau, Flugvorführungen |
| 123,025 MHz | Helikopter / Drehflügler |
| 123,450 MHz | Verkehrsluftfahrt über Ozeanen (inoffiziell) |

Tabelle 2.1: UKW-Frequenzen für Bord-Bord-Sprechfunkverkehr [Jepp06])

heute eher selten verwendeten Frequenzen für den Sprechfunkverkehr zwischen Luftfahrzeugen werden in Tabelle 2.1 aufgelistet.

Um auch Daten übermitteln zu können, wurden Techniken zum Datenfunk eingeführt, die u. a. auch Frequenzen aus dem UKW-Flugfunkspektrum nutzen.

Aircraft Communications Addressing and Reporting System (ACARS)

Das Aircraft Communications Addressing and Reporting System (ACARS) verwendet den Kanal 131,55 MHz für die Übertragung von Daten in Bord-Boden-Richtung. Das ACARS-Protokoll ist zeichenorientiert, auf eine Länge von 220 Zeichen pro Übertragung begrenzt, hat eine Datenrate von 2,4 kbit/s und zum Zugriff auf die Kanäle wird ein stop-n-wait-Verfahren benutzt. ACARS wurde in den 70-er Jahren entwickelt und ist nach heutigen Maßstäben ein langsames System.

Mode S Transponder / Universal Access Transceiver (UAT)

Eigene Frequenzen verwenden die Übertragungstechniken, die für automatische Positionsmeldungen (s. ADS-B) vorgesehen sind. Dies sind ATC Mode S Transponder (deutsch: Sekundärradar-Antwortgerät) und Universal Access Transceiver (UAT). Diese wurden eingeführt, um die am Boden gesammelten Radardaten anzureichern. Mode S empfängt auf Frequenz 1030 MHz und antwortet auf 1090 MHz. Es soll überwiegend in Verkehrsflugzeuge eingebaut werden. UAT ist für den Einbau in Flugzeugen der Allgemeinen Luftfahrt vorgesehen und verwendet einen 1–1,5 MHz-Kanal im 978 MHz-Bereich.

Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS)

Das erste System, das eine direkte Datenübertragung zwischen Luftfahrzeugen ermöglichte [MoSe02], war das Kollisionswarnsystem Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS), das Ende der 80-er Jahre zunächst in den USA eingeführt wurde und heute in den Versionen TCAS I–III existiert. TCAS fragt die Transponder anderer Flugzeuge im umgebenden Luftraum ab und ermittelt aus deren Antworten ein Lagebild. Das System errechnet, ob und wann mit einer Kollision mit einem Flugzeug zu rechnen ist und gibt einen Verkehrshinweis oder eine Ausweichempfehlung aus. Die Piloten müssen das Ausweichmanöver selbst durchführen. Viele TCAS-Computer können mehrere Flugzeuge gleichzeitig verfolgen und für mehrere gleichzeitige Bedrohungen eine kombinierte Ausweichempfehlung generieren. Dabei können aber nur Flugzeuge im einstelligen bis geringen zweistelligen Bereich beachtet

¹Notices for Airmen: kurzfristige bzw. dringliche Informationen

²Meldungen, die von an Bord eines Luftfahrzeugs befindlichen Staatsoberhäuptern oder diesen gleichgestellten Personen übermittelt werden. Heutzutage nicht mehr üblich.

werden. Der Beobachtungsradius liegt maximal bei 40 NM horizontal (in Flugrichtung) und +/- 8.700 Fuß vertikal. Das System funktioniert nur, wenn gefährlich werdende Flugzeuge einen Mode C oder Mode S Transponder haben.

VHF Data Link (VDL)

VHF Data Link (VDL) Mode 1 ging aus dem oben beschriebenen ACARS hervor. Um Datenraten bis 31,5 kbit/s (20 kbit/s Nutzdaten) zu ermöglichen wurde VDL Mode 2 entwickelt, welches auch die Datenübertragung sicherheitskritischer Meldungen der Flugsicherung (Controller Pilot Data Link Communication, CPDLC) ermöglichte. Es verwendet p-persistentes CSMA als Zugriffsverfahren und weist bei hohem Verkehrsaufkommen sehr lange Kanalzugriffszeiten auf. VDL Mode 3 erlaubt zwar (theoretisch) parallele Übertragung von analoger Sprache und Daten mittels Mehrfachzugriff durch Zeitmultiplex (Time Division Multiple Access, TDMA), wird in Europa jedoch nicht eingeführt werden. VDL Mode 4 Direkte Bord-Bord- und Boden-Bord-Datenkommunikation wird erstmalig mit VDL Mode 4 realisiert. Der Medienzugriff erfolgt über einen sog. selbstorganisierenden Mehrfachzugriff durch Zeitmultiplex (STDMA), in dem implizit in den Nutzdaten den anderen Teilnehmern mitgeteilt wird, in welchen Zeitschlitzten des nächsten Zyklus die nächsten Kanalzugriffe erfolgen werden. Je nach Implementierung der Modulation bietet VDL-4 eine Kanaldatenrate von 19,2 kbit/s (GFSK für geringere Stöempfindlichkeit) oder 31,5 kbit/s (D8PSK). Es verwendet das 1090 MHz Signal des Mode S Transponders.

Im Vergleich der verschiedenen Modi [Flic01], überzeugt Mode 4 durch verschiedene Vorzüge. Obwohl die Datenübertragungsrate geringer ist als bei Mode 2 und 3, so sind die funktechnischen Eigenschaften durch die GFSK-Modulierung deutlich besser. Die Verwendung von STDMA ermöglicht erst den von Bodenstationen unabhängigen Betrieb. Ein weiterer Vorteil von TDMA bzw. STDMA ist die hohe Verfügbarkeit und die Fähigkeit Isochronität (konstante Datenraten innerhalb genau definierter Zeitspannen) zu garantieren. Nicht intergiert in diesen Mode wurde die Sprachkommunikation. Es stellte sich jedoch heraus, dass VDL Mode 4 aufgrund von Interferenzen nicht störungsfrei mit DSB-AM, VDL Mode 2 und 3 betrieben werden kann. VDL-4 müsste sich daher den Übertragungskanal 1090 MHz mit Mode S teilen. EUROCONTROL und die FAA haben sich gegen die Einführung dieser Technik im Flugfunk ausgesprochen.

Project 34 / MESA

MESA (Mobility for Emergency and Safety Applications) [NAaS05] wurde als Behördenfunk zur Übertragung sicherheitskritischer Meldungen konzipiert und an die Bedürfnisse der Luftfahrt adaptiert. Es verwendet eine 12,5 kHz Boden-Bord- und Bord-Bord-Kommunikation und unterstützt Dienstgüte (QoS), Authentifizierung und Integrität. Es erlaubt eine Breitbandübertragung bis 2 Mbit/s. Die Latenz liegt im mittleren Bereich (250–400 ms). MESA bietet keine Abdeckung über Ozeanen oder Polarregionen. In den USA wurde eine Variante unter dem Namen Project 34 entwickelt.

ATENAA

ATENAA (Advanced TEchnologies for Networking in Aeronautical Applications) ist ein Forschungsprojekt, das MANET-Routingprotokolle für die Luftfahrt über Ka-Band-Satellitenfunk und optischen Richtfunk untersucht. ATENAA führt Ad-hoc

Routing Protocol for Aeronautical Mobile Ad-Hoc Networks (ARPAM) [IYKA⁺06] ein, das reaktives AODV und proaktives Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF) [Ogie04] kombiniert und auch geographische Informationen nutzt. Die MAC-Schicht informiert die Netzwerkschicht eine gewisse Zeit lang darüber, dass ein alter Pfad nicht mehr verfügbar ist. Der Sender startet dann eine Prozedur zur Pfadpflege. Die Verfasser geben jedoch zu Bedenken, dass ihre Implementierung noch nicht ausgereift ist. Ein persönliches Gespräch ergab, dass die entwickelte MAC-Schicht noch nicht leistungsfähig genug ist. Daher konnte in der Simulation nur ein Netz mit zwölf Teilnehmern getestet werden.

Broadband VHF (B-VHF)

Einen anderen Ansatz verfolgt Broadband VHF (B-VHF), das Interferenzen mit Hilfe einer zentralen Ressourcenverteilung vermeidet. Die Synchronisation und die Kanalzugriffskontrolle erfolgt durch die Bodenstationen. B-VHF garantiert Dienstgüte und integriert den Datenfunk mit digitaler Sprache. In Aufwärtsrichtung (Forward Link) wird ein Mehrfachzugriffsverfahren durch Codemultiplex basierend auf Mehrträgerübertragungstechnik (Multi-Carrier Code Division Multiple Access) MC-CDMA) angewandt, in Abwärtsrichtung (Reverse Link) ein Mehrfachzugriffsverfahren mit orthogonalen Unterträgern (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA). Die maximale Datenübertragungsrate beträgt laut [NAaS05] 1–3 Mbit/s je MHz. Forward Link (FL) und Reverse Link (RL) sind als TDMA-Zeitschlitze abgebildet. Luftfahrzeuge senden ausschließlich über den Reverse Link und können nur über den Forward Link empfangen. Um sicherzustellen, dass keine Meldung verloren geht, empfängt die Bodenstation auf dem Reverse Link und sendet auf dem Forward Link. Für Bord-Bord-Kommunikation fungiert die Bodenstation als Relais zur Weiterleitung an andere Luftfahrzeuge (s. Abbildung 2.1). Dieses Verfahren ist darauf angewiesen, dass eine Funkstelle existiert, die abgehende Sendungen in einem folgenden Empfangsfenster an die Empfänger weiterleitet.

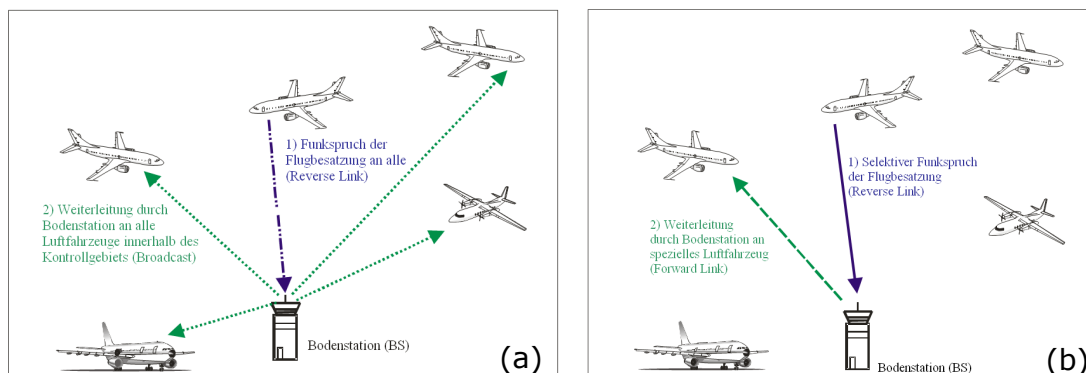


Abbildung 2.1: Weiterleitung der Bord-Bord-Kommunikation durch Bodenstation für Rundruf (a) und selektiven Ruf (b).

Zusammenfassung: Keines der zuvor genannten Kommunikationssysteme unterstützt bereits multi-hop-Paketweiterleitung im UKW.

Satellitenkommunikation (SATCOM)

Aufgrund ihrer fast globalen Reichweite greift man auch auf Satellitensysteme zurück. Bei Ausfall der Sprechfunkverbindung sind Bezirkskontrollstellen über eine sa-

tellitengestützte Bord-Sende/Empfangsanlage für den Typ INMARSAT die Bezirkskontrollstellen erreichbar [dNfL06]. Speziell für die Luftfahrt hat Thrane & Thrane (Dänemark) Empfangsgeräte der Reihe „Aero“ entwickelt, die das Senden und Empfangen von Sprache und Daten ermöglichen. Diese dienen v. a. der Übermittlung von Flugbetriebsmeldungen und dem Kommunikationsbedarf der Fluggäste. Diesen Ansatz verfolgen auch Anbieter wie z. B. ARINC und Connexion by Boeing.

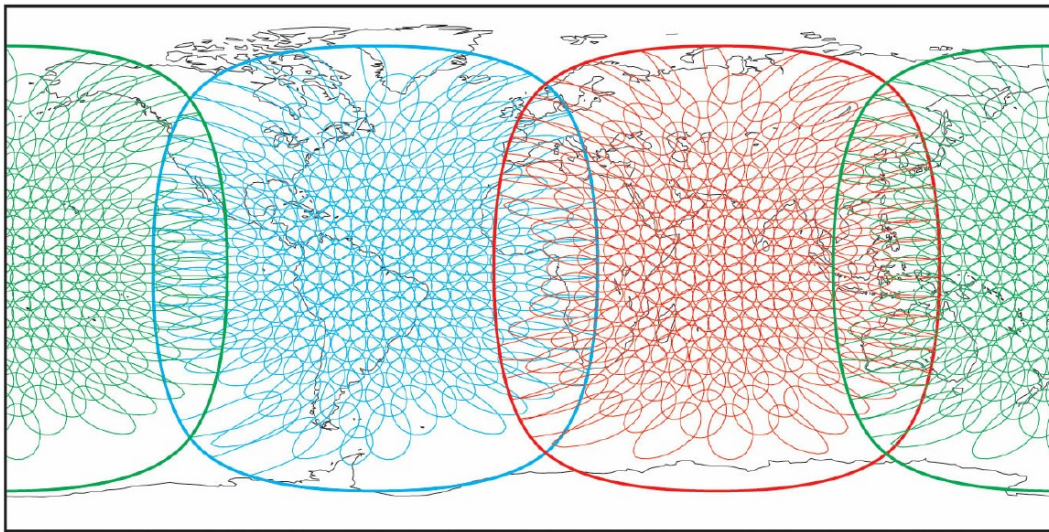


Abbildung 2.2: Abdeckungsgebiet der INMARSAT-Satelliten

Durch die geostationäre Position der Satelliten bedingt, werden die Breitengrade über 80° (Nord und Süd) nicht mehr abgedeckt (s. Abbildung 2.2). In der Nähe der Polarkappen ist kein Empfang möglich, so dass Flüge über den Polarregionen diesen Dienst nicht nutzen können. Es ergeben sich außerdem Schwierigkeiten aus der Flughöhe und der Ausrichtung der Antenne in Kurvenflügen, für die hier auf [MoSe02] und [Rich01] verwiesen sei.

2.2 Mobile Ad-hoc-Netze (MANETs)

2.2.1 Definitionen und Beispiele

Nun werden einige Grundlagen mobiler Ad-hoc-Netze betrachtet, wie sie in [Schi03] dargestellt wurden.

Ad-hoc-Netze kommen ohne jegliche Infrastruktur aus, insbesondere ohne eine ausgezeichnete Basisstation, welche den Medienzugriff zentral steuert. Diese Netzvariante erlaubt die spontane, nicht vorab geplante Kommunikation zwischen mobilen Endgeräten, wobei einige oder alle Endgeräte auch Daten von anderen Endgeräten weiterleiten können.

Beispiel: *Bluetooth* ist ein typisches Ad-hoc-Netz zur spontanen Kommunikation zwischen verschiedenen Endgeräten. Jedes Gerät kann im Prinzip mit einem anderen kommunizieren, wobei die Geräte immer ein Piconetz mit maximal acht Teilnehmern bilden. Die Kommunikation zwischen Piconetzen geschieht über Geräte, welche zwischen den verschiedenen Netzen hin- und herspringen.

Das lateinische „ad hoc“ bedeutet im Wortsinn „zu diesem Zweck“ und meint meist etwas Vorübergehendes. Im Gegensatz zu einem Ad-hoc-Netz benötigt ein *Infrastrukturnetz* eine vorausgehende Planung, um nämlich eine Basisstation mit zugehörigem Anschluss an ein Festnetz bereitzustellen. Weiterhin kann die Infrastruktur Dienste zur Namensauflösung, Weiterleitung von Daten, Authentifizierung usw. bereitstellen.

Beispiel: Alle großen drahtlosen Netze sind Infrastrukturnetze. So benötigt GSM ein Funk subsystem, ein Vermittlungssystem, diverse Datenbanken und Übergänge zu anderen Festnetzen.

Ein *Mobilgerät* kann in der Rolle eines Endsystems oder Zwischensystems auftreten. Wesentliches Merkmal ist die Mobilität des Systems, welche je nach Anwendung unterschiedlich definiert werden kann.

Beispiel: Mobile Zwischensysteme könnten sich an Bord eines Flugzeugs befinden, um dort die Kommunikation zwischen den Passagieren und mit den Bodenstationen zu koordinieren.

Der drahtlose Zugang zu einem Festnetz geschieht von einem Mobilgerät aus gesehen immer über eine *Basisstation* (typisches Infrastrukturnetz). Die Basisstation stellt den Übergang vom leitungsgebundenen in das drahtlose Netz dar. In dieser Einheit ist zumindest die Bitübertragungsschicht vorhanden, welche die Signale modulieren bzw. demodulieren muss. Weiterhin ist sehr oft auch die Sicherungsschicht in der Basisschicht implementiert, welche den Medienzugriff steuert.

2.2.2 Routing

Flache Ad-hoc-Wegwahl (proaktiv / reaktiv)

Flache Ad-hoc-Wegwahl verwendet für das Routing in ganzen Netzen immer das gleiche Verfahren. Diese unterteilen sich weiter in proaktive und reaktive Verfahren.

Proaktive Routingverfahren bestimmen die zu verwendenden Pfade zwischen zwei Knoten bereits bevor diese tatsächlich benötigt werden. Hierfür werden Routinginformationen aller Knoten in das ganze Netz geflutet und in Routingtabellen gepflegt.

Vorteil: Sie können gewisse Dienstgütegarantien in Bezug auf die Verbindungsaufbaudauer, Verzögerung oder andere zeitkritische Parameter abgeben. Solange sich die Topologie nicht zu schnell verändert, reflektieren die Wegwahltabellen die aktuelle Topologie mit hinreichender Genauigkeit. Aus diesem Grund sind gewisse Weiterleitungscharakteristika (Verzögerung, Bandbreite usw.) eines bestimmten Pfades zwischen einem Sender und einem Empfänger bereits vor dem Senden eines Pakets bekannt.

Nachteil: Unnötiger Mehraufwand bei nur leicht belasteten Netzen. Unabhängig davon, ob eine Datenübertragung stattfindet, oder nicht, werden die Tabellen für die Wegwahl aktualisiert. Dies verursacht eine Menge an unnötigem Verkehr und belastet die Energiereserven mobiler Geräte.

Im Gegensatz zu den proaktiven Verfahren bestimmen *empfindliche* Routingverfahren für mobile Ad-hoc-Netze die benötigten Pfade zwischen zwei Knoten erst, wenn diese tatsächlich benötigt werden. Unnötiger Overhead wird somit vermieden.

Ein klarer Vorteil reaktiver Protokolle liegt in der Skalierbarkeit, solange nur ein geringer Verkehr im Netz ist und sich die Mobilität der Knoten in Grenzen hält

Nachteile: Die initiale Verzögerung, verursacht durch die Suche nach einem Pfad, kann insbesondere die Leistungsfähigkeit interaktiver Anwendungen massiv beeinflussen. Auch ist die Qualität eines Pfades in diesem Fall nicht von vornherein bekannt. Zudem ist das Vorhalten von Pfaden, ein Mechanismus, der auch von proaktiven Protokollen genutzt wird, wenig sinnvoll in Situationen hoher Mobilität, da die Pfade sich zu schnell ändern.

Hybrides Routing

Hybrides Routing ist eine Mischung aus reaktiver oder proaktiver Wegewahl. Es kombiniert die Stärken beider Wegewahlverfahren, indem es je nach Mobilität und Aktivität (evtl. dynamisch oder für gewisse Bereiche) das geeignetere Verfahren wählt. Gleichzeitig reduziert es deren Nachteile. Beispiele: Mobility-Based Framework for Adaptive Clustering [McZn99], Zone Routing Protocol (ZRP), Terminodes Routing

Hierarchisches Routing

Im hierarchischen Routing erfolgt eine Unterteilung in Gruppen/Cluster (horizontal) und/oder Zonen bzw. Ebenen (vertikal), um auch große Netze handhaben zu können und skalierbar zu machen. Einige Beispiele sind Multicluster [GeTs95], CBRP, HSR, CGSR, ZRP, LANMAR, Terminode Routing

Positionsunterstützte Ad-hoc-Wegewahl

Positionsbasierte Routingverfahren nutzen Informationen über die geographischen Positionen der Knoten.

Um das Wissen so aktuell wie möglich zu halten (siehe ASAS, Kollisionsvermeidung etc.) ist ein proaktives Routingprotokoll zumindest im lokalen Bereich am sinnvollsten. Die nach [HoXG02] und [MaWH01] zusammengestellte Liste führt Routingprotokolle mit ihren Vor- und Nachteilen auf, die in Betracht kämen.

- *Terminode Routing* ist proaktiv, bietet eine gute Skalierbarkeit aber unterstützt keine Gruppenmobilität. Durch die Verwendung von Positionsdaten sind Vorhersagen über zukünftige Position möglich.
- *DREAM* ist proaktiv und bietet Direction Forwarding. Es produziert jedoch viel Overhead, wenn das Netz wächst und ist daher nicht gut skalierbar.
- *LANMAR* bietet eine sehr gute Skalierbarkeit, jedoch nur bei Gruppenmobilität. Individueller Verkehr wird zwar unterstützt, skaliert aber nicht.
- *GeoLANMAR* verwendet Geo-Position-Daten aber nur für Gruppenmobilität. Damit ist es nur für Flottenverbände geeignet.
- *OLSR* ist proaktiv, skaliert aber nicht für spärlich verteilte Netzteilnehmer.
- *AODV* ist reaktiv, aber sehr langsam in der Netzerkundung.
- *LAR* arbeitet lokationsbasiert, aber ist bedarfsorientiert (reaktiv).
- *GeoCast* unterstützt keine Mobilität.

- *GPSR* enthält einen worst case (Schleifen mit sehr langen Pfaden).

Bewegungsvorhersage in drahtlosen Netzen:

- LET/RET (Link/Route Expiration Time) wählt stabilste Routen [SuLG00]. Es verwendet keine geographischen Positionsdaten.
- FBG (Forward to Best Gateway) bestimmt best gateway (am lokalen Rand) [AlJM05]. Auch dieses verwendet keine geographischen Positionsdaten.
- AODV-RRS (Reliable Route Selection): berücksichtigt (nur) eigene Bewegungsrichtung zur Ermittlung einer stabilen Zone und einer caution zone [Ilya02]. Routing-Updates aus der caution zone werden nicht übernommen.
- PLBQR (Predictive location-based QoS Routing Protocol) [MuMa04] berücksichtigt Mobilität und Paketausbreitung bei Eintreffen eines Pakets. Dabei werden auch die Positionsdaten berücksichtigt.

2.2.3 Clustering

Als einen Cluster bezeichnet [Perk98] eine Gruppe von Knoten in naher Umgebung, die typischerweise alle innerhalb der Reichweite der anderen sind. Da in der Literatur verschieden „der Cluster“ oder „das Cluster“ geschrieben wird, sei hier erwähnt, dass in dieser Arbeit durchgängig „der Cluster“ verwendet wird. Dies wird auch im Duden [Dude04] empfohlen. Bei Clusterbildung wird i. d. R. ein Knoten zum Clusterrepräsentanten (Clusterhead oder Clusterleader) ernannt. Die übrigen Knoten werden Cluster-Mitglieder genannt. Cluster-Knoten heißen Nachbarn, wenn sie sich ohne die Hilfe einer weiterleitenden Station erreichen können. Ein weiterleitender Knoten vermittelt Datenpakete von einem Nachbarn an einen anderen Nachbarn. Eine Nachbarschaft umfasst alle Cluster-Knoten, die auf demselben Link Daten empfangen, die von einem Knoten gesendet werden. Einen Nachbar, der zur Paketweiterleitung in eine bestimmte Richtung berufen wurde, bezeichnet man als nächsten Hop.

Cluster werden in mobilen Ad-hoc-Netzen bevorzugt eingesetzt, um stabiles, skalierbares, zuverlässiges und effizientes Routing zu ermöglichen. Es kann auch nur zur Kanalzugriffsverwaltung [GeTs95] verwendet werden. In Multicluster koordiniert der Cluster-Führer die Verwendung der TDMA-Schlitze. Um Interferenzen innerhalb eines Clusters zu verhindern, wird der Zugriff außerdem durch CDMA geregelt. Der Austausch mit benachbarten Clustern erfolgt über sog. Repeater, die Mitglieder der Cluster sind, zwischen denen vermittelt werden soll. Multicluster hat zwar eine höhere Verzögerungszeit als MACA/PR, ermöglicht jedoch durch die Code-Trennung höhere Bandbreiten als MACA/PR.

Passives Clustering kommt nahezu ohne zusätzlichen Protokoll-Overhead aus und ist nicht vom Routingprotokoll abhängig. Es wird nur bestehender Daten- und Kontrollverkehr zum Clustering ausgenutzt. Es ist jedoch beschränkt auf 1-Hop-Cluster und hat eine Verzögerung im Aufbau der Kontrollstruktur.

Die Link-Cluster Architektur von Baker und Ephremides beschreibt die Kommunikation mittels Clusterheads und Gateways, die disjunkte oder überlappende Cluster

miteinander verbinden. Ein Gateway ist gewöhnlicher Knoten in mindestens einem Clustern und darf selbst kein Clusterhead sein. Zwei disjunkte Cluster können auch über zwei Gateways miteinander verbunden sein. Die Kommunikation zwischen gewöhnlichen Knoten erfolgt immer über mindestens zwei Hops (das sind der Clusterhead und evtl. das Gateway).

Einen sehr guten Überblick über Cluster-Verfahren findet man in [Weni04]. Dort werden Cluster-Kriterien wie Knoten-ID, Konnektivitätsgrad, Gewicht, Zeit, Topologieinformationen und Mobilität erwähnt.

So verwendet das (α, t) -ClusterFramework Vorhersagen über die Knotenmobilität als Clustering-Kriterium, um möglichst stabile Cluster zu bilden. Dazu werden Cluster gebildet, in denen alle Wege zwischen den Cluster-Mitgliedern noch eine Zeitspanne t mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit α existieren. Als Basis dienen die von einem proaktiven Routingprotokoll verbreiteten Topologieinformationen. Um Vorhersagen über die Mobilität machen zu können, wird u. a. die Geschwindigkeit der Knoten als Parameter benötigt. Die Größe der gebildeten Cluster ist abhängig von der Knotenmobilität. Im statischen Fall ist das gesamte Netz ein Cluster. Ein Knoten, der sich schnell bewegt und keine stabilen Pfade zu anderen Knoten besitzt, kann alleine einen Cluster bilden. Das (α, t) -Clustering funktioniert jedoch nur mit zufälliger Mobilität und berücksichtigt keine gesicherten Bewegungsdaten.

Bluetooth

Ein einfaches Clustering wird in Bluetooth verwendet. Eine Leitstation und maximal sieben Folgestationen bildet ein Piconetz. Im TDD-Verfahren sind die geraden Zeitschlitze der Leitstation vorbehalten, die die Folgestationen ruft. In den ungeraden Schlitzen antworten die Folgestationen, wenn sie im vorangegangenen Schlitz dazu von der Leitstation aufgefordert werden. Bluetooth greift per Frequenzsprungverfahren (FH-CMDA) auf die Funkkanäle zu. Hierzu ist eine vollständige Synchronisation der Stationen innerhalb der Piconetze erforderlich. In jedem Piconetz wird eine einheitliche Frequenzsprungfolge eingehalten, die bei Aufbau auf Basis der Adresse der Leitstation festgelegt wurde.

Im Zuge der Recherche für diese Arbeit stellte sich heraus, dass einige Ansätze zur Streunetzbildung mit Modifikationen übernommen und zur Lösung des Problems beitragen können.

Ein Bluetooth Streunetz (Scatternet) verbindet mehrere Bluetooth Piconetze miteinander und ermöglicht die Kommunikation über ein Piconetz hinaus. Hierzu kann eine Folgestation abwechselnd Mitglied mehrerer Piconetze werden und sich mit diesen synchronisieren. Hierbei muss beachtet werden, dass eine Station zu einem gewissen Zeitpunkt nur in einem Piconetz erreichbar ist. Wenn nun eine Leitstation versucht eine Folgestation zu erreichen, die im aktuellen Zeitschlitz auf ein anderes Piconetz synchronisiert ist, führt dies zur Verschwendung von Ressourcen. Die Spezifikation zu Bluetooth erwähnt die konzeptuelle Möglichkeit von Streunetzen, definiert jedoch keine Methoden. Aktuelle Ansätze zur Streunetzbildung sind: BTCP, TFP, TFP+, BlueRing, FSS (Flexible Scatternet-wide Scheduling), SHAPER, Blue-tree, Bluenet, GOSS (Gateway-oriented scatternet scheduling), BlueStars und andere.

FSS (Flexible Scatternet-wide Scheduling) aus [ZhCa02] stellt einen Scheduling- und einen adaptiven „Switch-Table“-Algorithmus auf. Das Scheduling regeln die Leitsta-

tionen. Die Bridges entscheiden eigenständig (mittels Switch-Table) über ihre zeitliche Zugehörigkeit in Piconetzen und informieren die Leitstationen darüber. Die Leitstationen versorgen die „Bridges“ mit den nötigen Informationen über benötigte Ressourcen. FSS berücksichtigt, behandelt und vermeidet Brückenkonflikte, unterstützt multi-hop slave/slave scheduling (kein master/slave). Jedes Piconetz darf höchstens zwei Brücken enthalten. Das Scheduling ist nicht global optimal, weil Brücken selbständig entscheiden dürfen. Das Problem der Erstellung eines optimalen streunetzweiten Scheduling (Ablaufplanung) ist NP-vollständig. In [MiMi03b] werden Rendezvous-Punkte eingeführt, die leicht zusammenstoßen können, wenn das Bewegungsverhalten sehr veränderlich ist. Daher wird häufig pseudo-zufällige Berechnung der Rendezvous-Punkte bevorzugt. Man kann auf Rendezvous-Punkte aber auch gänzlich verzichten, da die Nachteile die mit ihnen gewonnenen Vorteile wieder aufheben.

Vielversprechend sind auch BlueStars mit BlueConstellation [BaPe02] (Multihop Scatternet Formation) und dezentralisierte Optimierung mit [JGKB05]. BlueStars garantiert Verbundenheit des Streunetzes aller Piconetze, verwendet Gewichtung aber bietet laut [PeMS04] keine Selbstheilung oder inkrementellen Neuzugang von Knoten. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass Bluetooth unter kostenminimierenden Gesichtspunkten entwickelt wurden. Die nötigen Chips sollen bei Endpreisen um 1 Euro liegen. Die Lösungen für Bluetooth können oder müssen nicht unverändert für die Luftfahrtkommunikation übernommen werden, da dort ganz andere Budgetanforderungen gelten, die komplexere Systeme erlauben.

2.2.4 Lokationsdienst

In positionsbasierten Routingverfahren erfolgt die Wegewahl anhand der (geographischen) Position des gewünschten Knotens. Ist dieses Wissen jedoch nicht bekannt, muss anhand einer eindeutigen Kennung die Position dieses Knotens ermittelt werden. Lokationsdienste pflegen Daten über Kennungen und Position, so dass Anfragen bezüglich einer ungefähren Position eines Knotens beantwortet werden können. [Ilya02] beschreibt die Arten und verschiedene Ansätze von Lokationsdiensten. Die Entwicklung eines effizienten verteilten Lokationsdienstes für die Luftfahrt soll hier nicht weiter verfolgt werden, weil davon ausgegangen werden kann, dass in den typischen Anwendungsfällen diese Daten in Teilen der Infrastruktur gesammelt und bereitgehalten werden. Zur Vereinfachung werden die geographischen Daten in einer zentralen Tabelle gesammelt.

3. Analyse

In diesem Kapitel werden das zu lösende Problem sowie die Anforderungen und die Randbedingungen der Lösung beschrieben. Im Anschluss folgt ein Überblick über bereits existierende Lösungen und Ansätze.

3.1 Detaillierte Aufgabenstellung

Es soll ein selbstorganisierendes Verfahren für Bord-Bord-Kommunikation entwickelt werden, das ohne die Existenz von Bodenfunkstellen auskommt. Dazu soll ein Ad-hoc-Netz errichtet werden, in welchem ein Flugzeug zeitweise zur Leit-Luftfunkstelle (master aircraft, MA) erklärt wird und als Vermittlungsstelle für die anderen Flugzeug in seiner Nähe fungiert. Dieses Leit-Luftfahrzeug soll die Bodenstation ersetzen und die Sprach- und Datenkommunikation vermitteln. Im Idealfall wird der Kontakt zu einer Bodenstation über die Verbindung mit anderen Luftfahrzeugen aufrechterhalten (multi-hop).

Hierbei soll berücksichtigt werden, dass die Luftfunkstellen alle zum gleichen Zeitpunkt entweder senden oder empfangen. Ein Abweichen für eine dedizierte Luftfunkstelle von dieser Regel kann nur zur Umkehrung führen. Es braucht nur der Fall berücksichtigt zu werden, dass keine Bodenstation vorhanden ist. Wenn eine oder mehrere Bodenstationen verfügbar sind, soll die Kommunikation über diese erfolgen. In diesem Zusammenhang ist die Anpassung sich selbstorganisierender Ad-hoc-Netze an die charakteristischen Anforderungen der Kommunikation in der Luftfahrt von Interesse.

3.1.1 Szenariobeschreibung

Von besonderem Interesse wird die selbstorganisierende Bord-Bord-Kommunikation bei Flügen über Gebieten mit schwach ausgeprägter Flugsicherungsinfrastruktur wie über Ozeanen, Afrika oder den Polarkappen sein. Hierbei erfolgt sowohl eine Kommunikation zwischen Flugzeugen als auch zwischen Flugzeug und Infrastruktur.

Anwendungen in der Phase des Reiseflugs sind laut [FCOC06] die Freigabe (ACL) auf andere Flugflächen, Verkehrsstaffelung (In-Trail Procedure, ITP) mit ADS-B und Flugbeobachtung mit ADS-C.

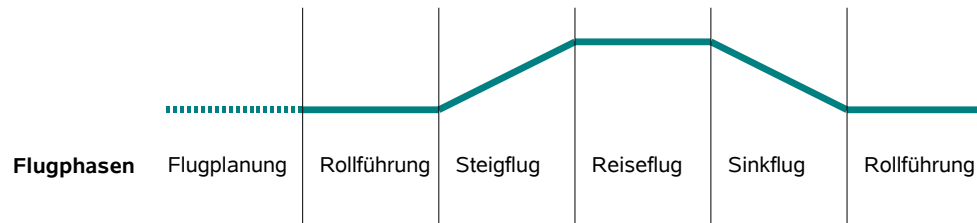


Abbildung 3.1: Flugphasen

Zu berücksichtigen ist, dass relative Geschwindigkeiten von bis zu 2000 kt möglich sind [FCOC06]. Des Weiteren kann angenommen werden, dass jedes Luftfahrzeug seine geographische Position kennt (z. B. im Bezugssystem WGS-84 mittels GPS). Anderenfalls wäre auch ein lokales Koordinatensystem (LCS) vorstellbar, das jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit ist. Jedem Luftfahrzeug ist eine Kennung (ICAO Aircraft ID, 24 Bit) eindeutig zugeordnet. Energie steht nahezu unbegrenzt zur Verfügung.

Die folgenden Szenarien werden in dieser Arbeit betrachtet:

- Ein Luftfahrzeug ist in der gleichen Richtung unterwegs.
- Es erfolgt ein Handover von einem Master Aircraft zu einem anderen.
- Ein Master Aircraft fällt weg, weil es ausfällt oder außer Reichweite ist.
- Wenn noch kein Master Aircraft vorhanden ist, muss das Streunetz initialisiert werden.
- Zwei oder mehrere Master Aircraft begegnen sich.
- Geclusterte Luftfahrzeuge fliegen in ein Infrastrukturnetz ein.

3.1.2 Bewegungsverhalten

Sehr charakteristisch für die Luftfahrt sind die hohen Geschwindigkeiten. Zivile Flugzeuge bewegen sich mit Geschwindigkeiten zwischen 200 kt (Knoten) und 1215 kt. Die maximale relative Geschwindigkeit kann laut [FCOC06] sogar bei 2430 kt liegen, wenn zwei Flugzeuge aufeinander zufliegen. Über Ozeanen wird ebenda eine maximale Luftgeschwindigkeit (Airspeed) von 1215 kt (ca. 2250 km/h) erwartet.

Das Bewegungsverhalten in der Luftfahrt ist in den meisten Fällen deterministisch. Flugzeuge, die nach Instrumentenflugregeln fliegen, müssen vor Abflug einen Flugplan aufgeben. Dieser enthält neben Start, Ziel und Wegpunkten auch die voraussichtlichen Zeiten für jede Teilstrecke der Route, so dass Position und Bewegungsvektor mit hoher Genauigkeit vorhergesehen werden können. Im Reiseflug bewegen sich solche Flugzeuge in der Regel zielstrebig in eine Richtung. Auf Flügen über Ozeane werden in dieser Arbeit keine Kursänderungen vorgenommen. Die Kurse verschiedener Flugzeuge werden sich im wesentlichen in der Hin- oder Rückrichtung unterscheiden. Für diese Arbeit wird angenommen, dass relativen Kursunterschiede zwischen Flugzeugen, die in die gleiche Richtung unterwegs sind, 20° beträgt.

3.1.3 Ultrakurzwelle und Radiohorizont

Wegen der hohen Geschwindigkeiten im Flugverkehr eignen sich UKW-Frequenzen aufgrund ihrer langen Reichweite für die Kommunikation zwischen Luftfahrzeugen. Ultrakurzwellen (UKW) breiten sich quasi-optisch aus. Die Reichweite von UKW-Signalen werden im wesentlichen von Signalstärke und Radiohorizont bestimmt. Der Radiohorizont ist u. a. abhängig von den Flughöhen der teilnehmenden Flugzeuge und wird durch die Formel 3.1 beschrieben.

$$R = \sqrt{2 \cdot k \cdot R_E} \left(\sqrt{h_{Tx}} + \sqrt{h_{Rx}} \right) \quad (3.1)$$

R_E ist der zugrunde gelegte Erdradius, der in der Luftfahrt 6 360 km beträgt. Für den effektiven Erdradiusfaktor k hat sich darüber hinaus der Wert $\frac{4}{3}$ bewährt. Setzt man für die Höhen h_{Tx} (Sender) und h_{Rx} (Empfänger) jeweils Werte in Fuß ein, lässt sich die Reichweite aus Formel 3.2 in nautischen Meilen angenähert entnehmen.

$$R = 1,23 \left(\sqrt{h_{Tx}} + \sqrt{h_{Rx}} \right) \quad (3.2)$$

In einer üblichen Flughöhe von 42 000 Fuß (ca. Flugfläche 420) beträgt die Reichweite ca. 500 NM. Im ungünstigsten Fall bleiben zwei aufeinander zufliegende Luftfahrzeuge nicht länger als 14 Minuten in Reichweite. Der vertikale Abstand kann bei der Ermittlung der Reichweite vernachlässigt werden, da er 10 NM nicht überschreitet. Ebenso vernachlässigt werden kann die Abschattung durch Gebäude etc.

3.1.4 Anwendungen für Bord-Bord-Kommunikation

In diesem Abschnitt werden die Anwendungen beschrieben, die insbesondere für den zwischen Flugzeugen stattfindenden beweglichen Flugfernmeldedienst relevant sind oder werden.

Im Bereich des Flugsicherungsdiensts (ATS) sind dies ADS-B, COTRAC, TIS-B, AOC, ACAS, ASAS, AIRSEP, 4D Trajectory, Free Flight [FCOC06], SkyCar¹ und andere. Die Datenübermittlung wird hierbei das primäre Kommunikationsmittel, Sprache wird nur noch für Nicht-Routine-Kommunikation verwendet als Ersatz bei Ausfall oder für Notmeldungen (auch zwischen Flugzeugen). Einige Anwendungen hierfür lauten DAG-TM (Distributed Air/Ground Traffic Management, NASA), COOPATS (Co-operative ATS, Eurocontrol), NGATS (US Next Generation Air Transportation System), UAV (Unmanned Aerial Vehicles) und MiniJets.

Eine Studie der NASA prognostiziert in [NAaS05] einen Bedarf von 3,3 kbit/s für Bord-Bord-Kommunikation (ADS-B/WAKE) über Ozeanen, Polargebieten oder entlegenen Regionen. Dabei sollen genügend Daten ausgetauscht werden, so dass die Avioniksysteme das Verkehrsbild der nächsten zwei Stunden vorausberechnen können.

Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B)

Automatic Dependant Surveillance - Broadcast (ADS-B) ist eine Technik, die sowohl Piloten im Cockpit als auch Fluglotsen am Boden ermöglicht, sich ein präzises Lagebild über den Luftverkehr zu verschaffen. Die angezeigten Werte auf dem

¹<http://www.moller.com/skycar/>

Anzeigebildschirm stammen dabei direkt aus der Luftfahrtelektronik (Avionik) der Flugzeuge.

Eine ADS-B-Meldung beträgt im ungünstigsten Fall 34 Byte und wird alle 1–3 Sekunden ausgestrahlt. Die in ihr übertragenen Informationen können zur Vorhersage der Flugbewegung eines Luftfahrzeugs verwendet werden. Zu beachten ist jedoch, dass ADS-B eine Anwendung ist und diese Daten daher erst in der Anwendungsschicht vorhanden sind. Zur Verwendung in der Sicherungsschicht müssten diese Informationen somit dort zur Verfügung gestellt werden oder andere Bewertungskriterien herangezogen werden.

Das Format für Austausch zwischen Stationen der Flugsicherung (zumindest auf internationaler Ebene) ist ASTERIX 021 [DuCM05].

ADS-B ist nicht auf ein physikalisches Medium festgelegt. Derzeit werden die Trägerfrequenz von 1090 MHz Mode S, Universal Access Transceiver (UAT), VDL Mode 4 und Satellitenkommunikation eruiert. UAT wurde speziell für ADS-B entwickelt und verwendet einen 1–1,5 MHz-Kanal im 978 MHz-Bereich. Mode S wird überwiegend von Verkehrsfliegern genutzt und soll einigen Firmen als Einnahmequelle dienen. Für die Allgemeine Luftfahrt wird UAT favorisiert. VDL Mode 4 wird sich vermutlich nicht durchsetzen. Nach Schätzung von [FCOC06] wird eine ADS-B-Nachricht 34 Byte umfassen.

FLIPCY/FLIPINT

Beide Dienste [FCOC06] übertragen Daten vom Flugzeug an die Flugverkehrsdienststelle.

FLIPCY versorgt die Automatisierung des Flugverkehrsdiensts mit Informationen zur Entdeckung von Inkonsistenzen zwischen abgegebenem Flugplan und im FMS aktivierten Flugplan. Die Übertragung wird zum Zeitpunkt des Einflugs in eine Flugverkehrsdienststeinheit oder nach Erteilung einer Abflugfreigabe angestoßen und wird somit vom Boden initiiert. Im Anschluss kann Per Uplink eine ACL-Nachricht erfolgen.

FLIPINT sendet im Rahmen von ADS-C (adressierter Dienst) die vom FMS und um weitere Daten wie z. B. Wetter angereicherte vorherberechnete Flugbahn an die Flugverkehrsdienststelle. Die Abfrage durch die Flugverkehrsdienststelle erfolgt periodisch, auf Anfrage oder zu bestimmten Ereignissen.

COTRAC

COTRAC steht für Common Trajectory Co-ordination und berechnet vierdimensionale Flugbahnen (4D-Trajectory) in Echtzeit. Es wird dabei unterstützt durch graphische Benutzungsschnittstellen und Automatisierungssysteme, insbesondere dem FMS. COTRAC erlaubt neue Flugbahnkontrakte, die mehrere Nebenbedingungen (Länge, Breite, Höhe, Geschwindigkeit etc.) berücksichtigen können ([FCOC06]). Dabei ist die Crew frei in der Wahl der Flugbahn, sie verpflichtet sich aber gleichzeitig zur ihrer Einhaltung der ausgehandelten Flugbahn. Bei Änderungswünschen meldet die Flugbesatzung die Bedingungen, die sich geändert haben oder im weiteren Flug nicht eingehalten werden können (siehe FLIPINT). Daraufhin wird ein neuer Kontrakt ausgehandelt.

ACAS / ASAS

Aircraft Collision Avoidance System (ACAS) und Airborne Separation Assistance System (ASAS) sind sehr ähnliche Systeme und werden daher zusammen behandelt. Sie unterstützen die Selbstseparierung der Luftfahrzeuge. Die US-amerikanische Luftfahrtbehörde FAA und Eurocontrol [FCOC06] rechnen damit, dass ab 2020 immer mehr Bord-Bord-basierende Dienste unterstützt werden müssen. ASAS wird aus mehreren Diensten bestehen. Die für Bord-Bord-Kommunikation relevanten davon sind AIRSEP und WAKE, die näher beschrieben werden.

- ASAS Air-to-air self-separation (AIRSEP) kommt ohne Hilfe der Bodenflugsicherung aus. Der Datenaustausch erfolgt zur Gewährleistung der Luftfahrzeugseparierung im Reiseflug, über Ozeanen oder entlegenen Regionen. AIRSEP-Funktionen sind: Konflikterkennung (Conflict Probe), Austausch von Flugroutenvorhaben (Trajectory Intent Exchange), Konfliktbehandlung (Conflict Negotiation) und Akzeptieren/Bestätigen der Konfliktauflösung (Resolution Accept/Confirmation).
- WAKE (ASAS Wake Broadcast)

Der andere Dienst lautet WAKE (ASAS Wake Broadcast). Dieser Dienst stellt die gefährlichen Wirbelschleppen anderer Luftfahrzeuge graphisch dar. Zu diesem Zweck werden Parameter wie Typ, Gewicht und Geschwindigkeit des Luftfahrzeugs übermittelt, so dass diese von den Bordsystemen verarbeitet und der Flugbesatzung angezeigt werden können. Eine WAKE-Nachricht wird sich laut [FCOC06] in der Größenordnung einer ADS-B-Nachricht bewegen.

Free Flight

Freier Flug ist in [Free96] definiert als sicherer und effizienter Betriebskapazität unter Instrumentenflugregeln (IFR), in welchen die Betreiber die Freiheit haben ihren Weg und ihre Geschwindigkeit in Echtzeit zu wählen. Flugverkehrsbeschränkungen werden nur auferlegt, um Staffelung zu sichern, um übersteigenden Flughafenkapazitäten vorzubeugen, um unautorisierten Flug durch Lufträume spezieller Verwendung zu verhindern und um die Sicherheit des Flugs zu gewährleisten. Beschränkungen sind begrenzt durch das Ausmaß und die Dauer, die nötig sind, das identifizierte Problem zu korrigieren. Jede Aktivität, die Beschränkungen beseitigt, ist ein Schritt Richtung Freier Flug.

AOC Sprachdienst

Auch wenn die Nutzung der Sprachdienste mit der Zeit abnehmen wird, werden zwei Arten der Sprachkommunikation in Verwendung bleiben. Die erste ist die (selektive) Punkt-zu-Punkt-Verbindung der Flugbesatzung mit der Betriebskontrollstelle (Operations Centre). Die zweite wird als Rundruf/Party-Line vor allem über Ozeanen und in entlegenen Regionen zur Unterstützung der Verkehrswahrnehmung eingesetzt werden.

3.1.5 Kommunikationsbedarf

Der zu erwartete Kommunikationsbedarf wird in [FCOC06] in zwei Phasen unterteilt. Sie unterscheiden sich in der Art und den Typen der Dienste, die zur Verfügung stehen. Die erste Phase hat bereits begonnen. Die zweite Phase wird im Jahr 2020 beginnen und wird die Phase 1 im Jahr 2030 ablösen. In Phase 1 werden von den genannten Diensten ADS-B, FLIPCY, FLIPINT, TIS-B und WAKE genutzt. Die zweite Phase setzt die Verwendung der Dienste AIRSEP und COTRAC voraus. Für die reine Bord-Bord-Kommunikation sind dabei ADS-B (in Phasen 1 und 2) und AIRSEP (in Phase 2) relevant. AIRSEP wird jedoch nur in Gebieten zum Einsatz kommen, in denen autonomer Flugbetrieb gestattet wird. Diese Gebiete werden mit „AOA“ (autonomous operations area) bezeichnet und sind ab Phase 2 vorhanden. „ORP“ (oceanic/polar and remote) beschreibt Gebiete über Ozeanen, den Polarkappen und entlegenen Regionen, in denen (noch) kein autonomer Flugbetrieb gestattet ist. ADS-B wird in ORP und AOA-Gebieten verwendet werden. Der Kommunikationsbedarf dieser Anwendungen (zuzüglich AOC) ist der Tabelle 3.1 zu entnehmen.

| Sprache/Daten | Phase 1 | Phase 2 | Phase 2 |
|----------------------------------|---------|---------|---------|
| Sprachkommunikation | ORP | ORP | AOA |
| Übertragungen je Luftfahrzeug | 3 | 3 | - |
| Sekunden je Luftfahrzeug | 9,9 | 9,9 | - |
| Datenkommunikation | ORP | ORP | AOA |
| Air/Ground ATS+AOC (Kbit/s) | 2,5 | 12,3 | 17,0 |
| Bord-Bord-Kommunikation (Kbit/s) | 0,161 | 3,3 | 15 |

Tabelle 3.1: Anforderungen an die Kommunikationskapazität

Die Daten in Tabelle 3.1 gelten jeweils je Luftfahrzeug und je Dienstumfang (englisch: service volume). Der Dienstumfang bezeichnet die Zeit, in der jeweils eine Flugsicherungsdienststeinheit (Sektor) für das Luftfahrzeug zuständig ist. Die Flugzeit in AOA-Gebieten beträgt 1,5 Stunden, in ORP-Regionen beträgt sie 4,25 Stunden. Ein Dienstumfang besteht in AOA-Gebieten aus 1,5 Std, in ORP-Regionen aus 42,5 Minuten in Phase 1 bzw. aus 63,75 Minuten in Phase 2.

3.2 Broadband VHF als Basissystem

In diesem Abschnitt wird ein bestehendes System beschrieben, das an das Konzept der Bord-Bord-Kommunikation mit Leitluftfunkstellen angepasst werden soll. Dabei liegt der Fokus auf den Eigenschaften und Funktionen, die für die Lösung des Problems relevant sind oder in abgeänderter Form übernommen werden können.

Der Einfachheit halber soll ein hinreichend entwickeltes Kommunikationssystem als Grundlage für die Bord-Bord-Kommunikation dienen. Dafür bietet sich B-VHF (siehe Abschnitt 2.1.3) an, da es in [SaHR05] den Ersatz einer Bodenstation durch ein sogenanntes „master A/C“ (Leitluftfahrzeug) vorsieht ohne dies weiter zu spezifizieren.

B-VHF ist als terrestrisches und zelluläres System konzipiert worden, das auf Bodenstationen angewiesen ist. Daher müsste dieses Master Aircraft [SaHR05] bestimmte Aufgaben und Funktionen einer Bodenstation übernehmen, so dass der Betrieb von B-VHF auch in Gebieten ohne Bodeninfrastruktur erbracht werden kann.

Wie in Abschnitt 2.1.3 dargestellt, kommuniziert ein Luftfahrzeug mit der kontrollierenden Station über den RL in Senderichtung und über den FL in Empfangsrichtung. Die Adressierung erfolgt durch diskrete und eindeutige Adressen (24 Bit ICAO A/C ID oder lokale ID mit 8 Bit). FL ermöglicht Punkt-zu-Punkt-Verbindungen und unbestätigte Gruppen-/Rundrufe. RL (Punkt-zu-Punkt) Daten und Sprache werden über den Reverse Link an die Bodenstation gesendet und von dort aus über den Forward Link an die anderen Luftfahrzeuge weitergeleitet (s. Abbildung 3.3). Dieser Ansatz verhindert allerdings, dass Luftfahrzeuge direkt miteinander kommunizieren können, da sie nur auf dem Forward Link empfangen können und nur auf dem Reverse Link senden können. Aufgrund des TDMA-Verfahrens starten die FL/RL-Zeitschlitze immer zu gleichen Zeitpunkten. Damit Luftfahrzeuge miteinander eine Verbindung aufnehmen können, muss daher immer eine Kontrollstation als Vermittler eingefügt werden. Jede Bodenstation nutzt in Folge einer Frequenzplanung ein (störungsfreies) dediziertes RF-Frequenzband.

3.2.1 Rahmenstruktur

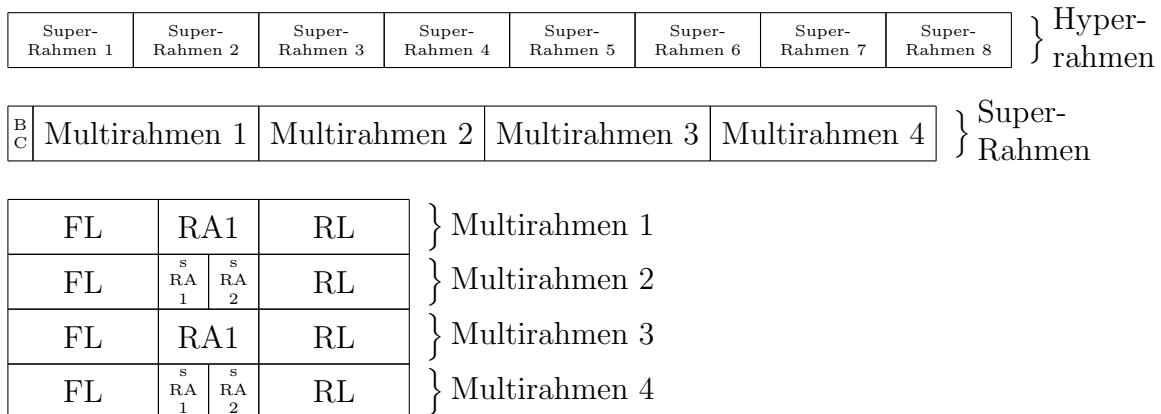


Abbildung 3.2: B-VHF Zeitrahmen-Struktur

Jeder B-VHF-Superrahmen (SF) hat eine Länge von 240 ms und besteht aus vier Multirahmen (MF), die jeweils 54 ms lang sind. Zusätzlich beginnt jeder Superrahmen mit einem ca. 24 ms langen Rundruf-Zeitschlitz (Broadcast, BC). Dieser trägt FL-Transportkanäle mit Informationen, die zum Netzeintritt und zur Verbindungsübergabe (Handover) benötigt werden.

B-VHF verwendet in Vorwärtsrichtung (*Forward Link*, FL) OFMD (MC-CDMA). Die Daten werden über mehrere sog. Unterträger gestreut über das B-VHF-Kanalband gesendet. Diese Unterträger sind orthogonal untereinander, so dass es zu keinen Interferenzen (Inter-Carrier-Interferences, ICI) kommt. Das Overlay-Konzept von B-VHF erlaubt so, räumlich freie Frequenzen zu nutzen. In Rückwärtsrichtung (*Reverse Link*, RL) werden die Benutzer durch OFDMA unterschieden. Der zufallsgesteuerte Zugangslot (Random Access, RA) enthält in ungeraden Multirahmen unsynchronisierte Random Access Kanäle (RACH) und zwei synchronisierte Zufallszugriffskanäle (sRACH) in geradzahlig nummerierten Multirahmen. Zufallszugriffskanäle werden für die Anfragen zum Netzeintritt, zur Ressourcenvergabe und anderen Systemnachrichten über RL verwendet.

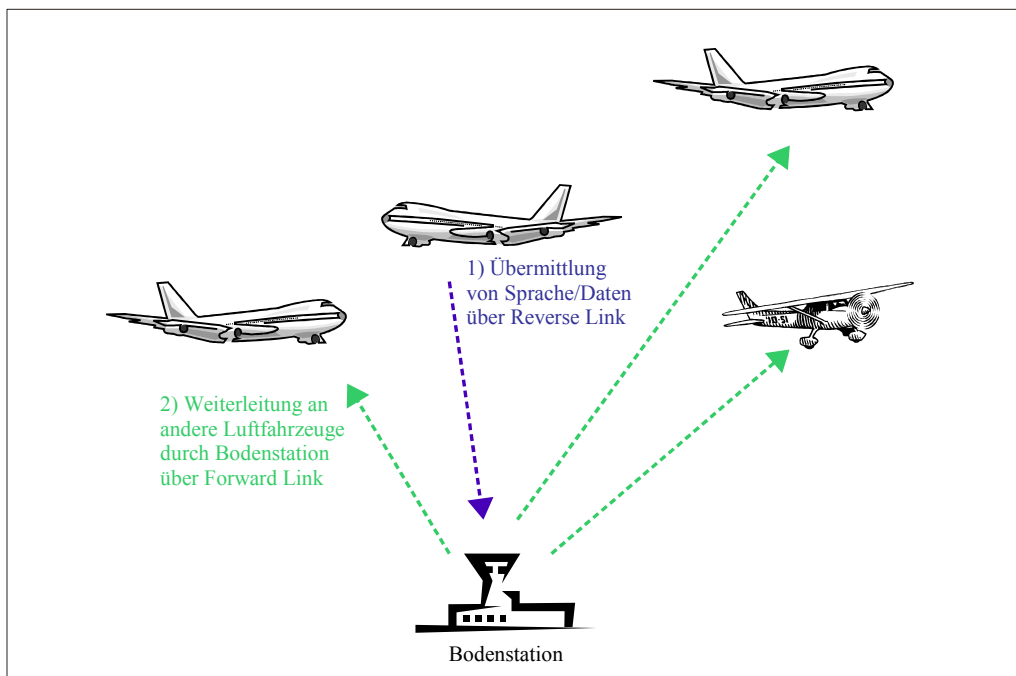


Abbildung 3.3: Kommunikation in B-VHF über Forward Link und Reverse Link

3.2.2 B-VHF Mehrfachzugriff

Der Broadcast Channel und Random Access Channel nutzen auf ihren Subträgern das volle Spektrum für ihre Übertragungen. Für den Forward und Reverse Link werden die Subträger weiter unterteilt, so dass mehrere Symbole parallel gesendet werden können (s. Abbildung 3.4). Dies dient der effizienteren Ausnutzung der Bandbreite.

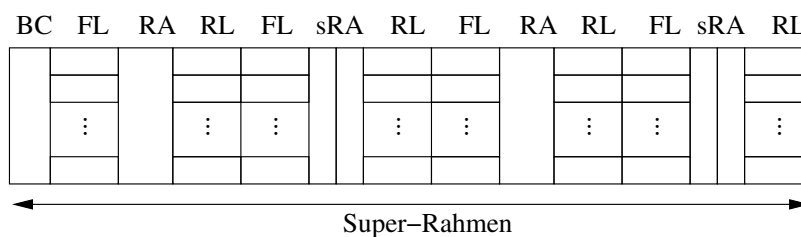


Abbildung 3.4: B-VHF Mehrfachzugriff

3.2.3 B-VHF Protokolle

LME

Die Funkverbindungsverwaltungsinstanz (Link Management Link Entity, LME) ist verantwortlich für den Aufbau, die Pflege und Beendigung von Funkverbindungen zwischen dem Flugzeug und der kontrollierenden Bodenstation. Die im Flugzeug befindliche Bord-LME verwaltet die Funkverbindungen des Luftfahrzeugs zu mehreren Kontrollstationen inklusive kurzlebiger unidirektionaler Verbindungen auf der physischen Schicht (zur Synchronisierung mit mehreren KS während Hintergrundabtastung oder Zellenübergabe). Die Bord-LME ist auch bei der bedarfsgerechten Ressourcenvergabe für Sprach- und Datendienste beteiligt und verantwortlich für die

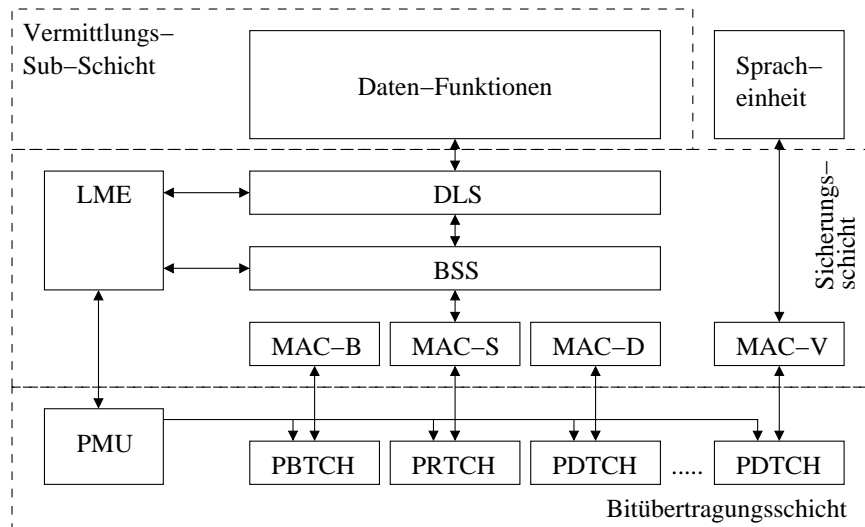


Abbildung 3.5: B-VHF Protokoll-Stapel

Bereitstellung von Ausweichmöglichkeiten und Wiederanlaufprozeduren zur Fortführung der Dienste. Die Bord-LME unterhält drei Taktzustände: SS0 (unsynchronisiert), SS1 (synchronisiert auf FL), SS2 (synchronisiert auf FL und RL). Die wichtigsten LME-Nachrichten lauten:

Rundruf (BC): FL, periodisch

Physikalische Kanalkontrolle : RL, periodisch

Netzeintrittsanfrage (Net Entry Request): RL, während der Netzeintrittsprozedur

Netzeintrittantwort (Net Entry Response) : FL, während der Netzeintrittsprozedur als Antwort auf Netzeintrittsanfrage

Netzeintrittabschluss (Net Entry Complete): RL, während Netzeintritt und fremdgesteuerter Übergabe

Netzaustrittsanfrage (Net Exit Request): FL/RL, während Netzaustrittsprozedur

Netzaustrittsantwort (Net Exit Response): RL, während Netzaustrittsprozedur

Netzaustrittsabschluss (Net Exit Complete): FL/RL, Beendigung der Netzaustrittsprozedur

Ressourcenanfrage (Resource Request): RL, bei Bedarf an RL-Verkehr

Ressourcengewährung (Resource Granted): FL, als Antwort auf Ressourcenanfrage

Funkverbindungsaufbauanfrage (Link Establishment Request): RL, bei Bedarf am Sprachdienst

Funkverbindungsaufbau (Link Setup): FL, bei Ressourcenvergabe für angefragte Sprachdienste

- Funkverbindungsverweigerung** (Link Establishment Reject): FL, bei Ablehnung angefragter Sprachdienste
- Funkverbindungsauflbauabschluss** (Link Setup Complete): FL, bei Vollendung einer Ressourcenvergabe
- Verbindungsübergabeanfrage** (Handover Request)
- Verbindungsübergabeanantwort** (Handover Response)
- Verbindungsübergabeanweisung** (Handover Command): FL, Kontrollstation gibt Zeitpunkt für Übergabe an
- Verbindungsübergabebzugang** (Handover Access): RL, Luftfahrzeug kontaktiert andere Zelle
- Funkverbindungsabbauanforderung** (Disconnect Request): RL, für Bord-initiiert Verbindungsabbau eines bedarfsgesteuerten Sprachdienstes
- Funkverbindungsabbauanweisung** (Disconnect Command): FL, für Boden-initiiert Verbindungsabbau eines bedarfsgesteuerten Sprachdienstes
- Funkverbindungsabbauabschluss** (Disconnect Completed): RL, zur Bestätigung des Verbindungsabbaus eines bedarfsgesteuerten Sprachdienstes

| B-VHF Schicht | | Packet Data Unit | stützt sich auf |
|-----------------------|---------------|-------------------------|-----------------------|
| Obere Schichten | | Upper Layer Data packet | |
| DLL | DLS-sub-layer | DLS-Rahmen | Logischer Kanal |
| | BSS-sub-layer | BSS-Rahmen | Transportkanal |
| | MAC-sub-layer | MAC-Rahmen | Physikalischer Rahmen |
| Physikalische Schicht | | Transfer unit | Slot |

Tabelle 3.2: Terminologie der Schichten in B-VHF

Data Link Services (DLS)

Die „Data Link Services“-Unterschicht (DLS) stellt verbindungslosen oder verbindungsorientierten Datenübertragungsdienst für bestätigte und unbestätigte Datenrahmen zwischen zwei Kommunikationssystemen bereit. Diese ist verantwortlich für die Rahmenfehlererkennung (mittels CRC), die Rahmenfehlerkorrektur (mittels Übertragungswiederholung), die Berechnung der zyklischen Blockprüfung (CRC), das Hinzufügen des DLS-Kopfs und das Setzen der Stopfbits und Begrenzungszeichen.

B-VHF Special Services (BSS)

Diese Unterschicht erbringt einen flexiblen Ansatz zur Erzielung eines hohen Datendurchsatzes, geringer Kollisionswahrscheinlichkeit und kurzer Übertragungsverzögerungen. Sie passt ankommende DLS-Rahmen an die physikalische Kapazität an, setzt aus der physikalischen Schicht ankommende Daten in DLS-Rahmen zusammen und zeigt der LME den Ressourcenbedarf an. Sie ist auch für die Ablaufplanung unter Berücksichtigung der Prioritäten zuständig.

MAC

Die B-VHF Medienzugriff-Unterschicht betreibt den Zugriff auf die physikalische Schicht unter der Kontrolle der DLL. Die MAC-Schicht ist verantwortlich für die Abbildung der BSS-Rahmen an den korrekten physischen Rahmen. Die MAC-Instanzen werden nach vier Typen unterschieden:

MAC-V für Sprachdienste,

MAC-D sowohl für Nutz- als auch Systemdaten über „normale“ Transportkanäle,

MAC-S für RL-Übertragungen auf RA-Kanälen (RACH, sRACH),

MAC-B für Systemdaten über unidirektionale FL-Rundrufe.

BSS-Rahmen werden an die richtige MAC-Instanz adressiert, die diese an die physikalische Schicht übergibt (s. Abbildung 3.5). Über die physikalische Schicht empfangene Datenpakete werden von der MAC-Schicht demoduliert, fehlerbehandelt (FEC) und mit Ankunftszeit versehen an die nächsthöhere Schicht BSS übergeben. In Abhängigkeit des Sprach- oder Datendienstes stellt B-VHF drei Zugriffsmethoden an den Übertragungskanal bereit:

- **Fester Zugriff (fixed):** permanente Transportkanäle an physikalischer Schicht. Zum Beispiel: party-line, Rundruf, aber auch systeminterne Kanäle (wie DCCH).
- **Reservierter Zugriff:** nach expliziter Anfrage zugewiesene Ressourcenbelegung (Bord-getrieben oder Boden-getrieben). BSS ist zuständig für die Zusammenlegung solcher Anfragen und Verwaltung der Ressourcen für alle Luftfahrzeuge in Reichweite. Jedes Luftfahrzeug verwaltet die Verwendung der derzeit zugewiesenen Ressourcen für seine eigenen Nutzdaten. Nach erfolgter Datenübertragung hebt die Kontrollstation die zuvor zugewiesene Ressourcenvergabe auf.
- **Zufallsgesteuerter Zugriff:** Alle Flugzeuge dürfen auf den RL unkoordiniert zugreifen, wobei Kollisionen möglich sind. Nur benötigt solange noch kein reservierter Zugriff zugeteilt wurde. In B-VHF weiter unterteilt in (un-) synchronisierten Zugriff:
 1. **Unsynchronisierter zufallsgesteuerter Zugriff** erfolgt, solange das Bordsystem noch nicht mit der Kontrollstation synchronisiert ist. Nur eine Luftfunkstelle kann während des RA-Slots senden. Dieser wird bei Netzeintritt verwendet.
 2. **Synchronisierter zufallsgesteuerter Zugriff** wird verwendet, sobald das Bordsystem die Sync-Daten bereits erhalten hat. So können zwei Unterzeitschlitze für den Zugriff genutzt werden. Dieses wird bei Ressourcenanfragen, Managementnachrichten und Notmeldungen werden hierüber gesendet.

3.2.4 Prozeduren in B-VHF

Netz-Initialisierung

Um andere Kontrollstationen zu entdecken, führt das Funkgerät eine Hintergrundabtastung (background scanning) der BC-Slots durch, die von jeder KS zu Beginn des Superrahmens ausgesendet werden. Aufgrund der Synchronisation aller Kontrollstationen werden die BC-Slots nahezu gleichzeitig ($\pm 1,3$ ms Toleranz) ausgestrahlt. Das Bordgerät startet die Abtastung vom geringsten RF-Kanal aus. Hierzu muss es etwas länger als 240 ms auf der Frequenz gerastet bleiben. Dieses Verfahren (blind scanning) wiederholt es mit den übrigen Frequenzen bis eine aktive Kontrollstation entdeckt wurde, mit der es sich synchronisieren kann (SS0 \rightarrow SS1). Nun kann es FL-Sendungen empfangen/dekodieren und den RACH nutzen. Es startet sodann die initiale Netzeintrittsprozedur.

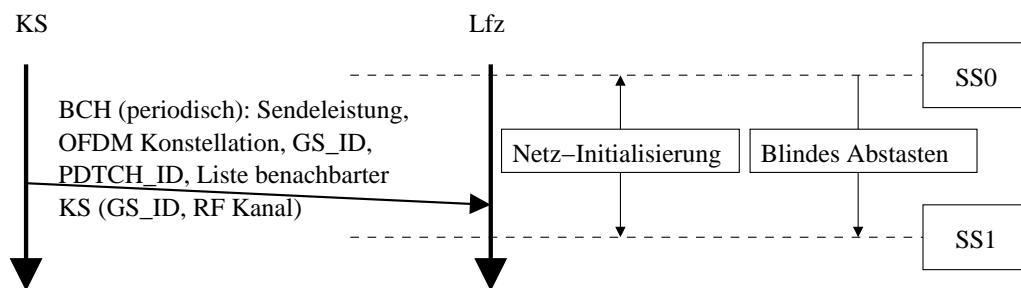


Abbildung 3.6: Prozedur: Netz-Initialisierung

Initialer Netz-Eintritt

Nach der Netz-Initialisierung bleibt das Bordfunkgerät auf der Frequenz der Bodenstation gerastet, tastet aber weiterhin zyklisch die BC-Slots anderer Kontrollstationen ab. Die Kontrollstation kann die abzutastenden Frequenzen einschränken durch explizite Mitteilung relevanter Kanäle, um die Netzeintrittsprozedur zu beschleunigen. Während dieser eingeschränkten Abtastung (restricted scanning) wechselt das Bordgerät kurz vor dem Rundruf-Zeitschlitz (BC), synchronisiert sich mit der neuen Kontrollstation und misst die Stärke des empfangenen Signals. Solange das Luftfahrzeug sich im B-VHF-Modus befindet, behält es die eingeschränkte Abtastung bei. (Das Kanalband für den selbstorganisierten Betrieb kann hiermit festgelegt werden.)

Nach derzeitigem Vorschlag ([SaHR05]) meldet sich das Luftfahrzeug an der zuerst gefundenen Kontrollstation an, um so die Zeit zur Inbetriebnahme kurz zu halten. Hierzu setzt es an die Bodenstation über den RACH eine Netzeintrittsanfrage ab, die die ICAO-Luftfahrzeug-Kennung und optional die Kennung der Bodenstation enthält. Die Bodenstation antwortet dem anfragenden Flugzeug über den festen FL mit einer Netzeintrittantwort, die Zeitkorrektur, globale und lokale Luftfahrzeug-Kennung (verkürzte Abbildung auf lokal eindeutige acht Bits) und optional die Kontrollstationenkennung und zugewiesenen (DCCH-) Ressourcen. Da das gerufene Luftfahrzeug seine lokale Kennung noch nicht kennt, sendet die Kontrollstation an die Rundruf-Adresse, die von allen Flugzeugen verbundenen abgehört wird. Aber nur die Luftfunkstelle, die die Netzeintrittsprozedur gestartet hat, übernimmt die lokale Kennung.

Die Bodenstation trägt die globale und lokale Kennungen des Luftfahrzeugs in ihre lokale Datenbank ein und propagiert diese Daten an benachbarte Kontrollstationen. Nach erfolgreichem Abschluss des Netzeintritts geht das Flugzeug in den Status SS2 über. Das Flugzeug kann nun Datendienste über FL und bedarfsgesteuerte RL (Sprach- und Daten-) Dienste über den sRACH-Kanal anfordern. Außerdem übermittelt es in diesem Status regelmäßig die Ergebnisse seiner Sendeleistungsmessungen an die Kontrollstation, um eine weiche Übergabe vorzubereiten.

Dienstauswahl

Durch Abtasten der Rundrufzeitschlitze erhält das Luftfahrzeug die Information, welche Dienste von welcher Kontrollstation bereitgestellt werden und zur Verfügung stehen. Die Flugbesatzung kann nun die Dienste auswählen, die sie benutzen möchte. Im herkömmlichen Konzept wählt die LME die dienstgebende Kontrollstation mit der besten Sendeleistung aus. Hier muss für den selbstorganisierenden Ansatz eventuell eine Ergänzung eingeführt werden.

Erzwungene Verbindungsübergabe (Forced Handover)

Wählt die Flugbesatzung einen Dienst aus, der nicht von der aktuellen Kontrollstation bereitgestellt wird, muss die Bord-PMU auf die Frequenz einer Station wechseln, die diesen Dienst anbietet. Dazu wird auch die Zeitkorrektur für die neue Bodenstation berechnet, die PDTCH-Parameter gesetzt und eine Netzeintrittsanfrage abgesetzt. Dieser Vorgang wird schneller Frequenzwechsel *Rapid RF frequency change* genannt, da die für den Wechsel benötigten Daten der PMU bereits bekannt waren und das Luftfahrzeug im Status SS2 verbleibt. (SS2 mit KS1 → SS2 mit KS2)

Das Flugzeug betrachtet die Verbindungsübergabe als abgeschlossen, sobald es von der neuen Kontrollstation die Netzeintrittantwort inklusive ICAO-Luftfahrzeugkennung, neuer lokaler Kennung und Aktualisierung der Zeitkorrekturdaten erhält. Für die neue Kontrollstation (KS2) ist die Verbindungsübergabe bei Empfang der Netzeintrittabschlussmeldung erfolgreich gewesen. Die Kontrollstation sendet eine Verbindungsübergabeabschlussmeldung (HOV Completed) an die Bodeninfrastruktur und an alle anderen Kontrollstation (außer der alten). Das Flugzeug ist nun über KS2 erreichbar.

Forced Handover ist Bord-initiiert und unterscheidet sich grundlegend von der weichen Verbindungsübergabe.

Unterbrechungsfreie Verbindungsübergabe (Seamless Handover)

Die unterbrechungsfreie Verbindungsübergabe (seamless Handover) dient der Beibehaltung ausgewählter Dienste trotz des Wechsels von Kontrollstationen.

Die Entscheidung zur weichen Verbindungsübergabe wird von der Kontrollstation basierend auf Messungen der Signalqualität und -stärke (sowohl am Boden als auch an Bord) getroffen. Hierzu übermittelt die Bord-LME periodisch die Daten über die Signalqualität an die Boden-LME mittels sRACH- oder DCCH-Kanal.

Für die folgende Beschreibung wird angenommen, dass alle Kontrollstationen miteinander verbunden sind. (Dies wird im selbstorganisierenden Ansatz nicht immer anwendbar sein.) Diese koordinieren die Verbindungsübergabe untereinander: KS1

sendet Boden-Boden-Verbindungsübergabeanfrage (HOV Request) mitsamt ICAO-Kennung des betreffenden Flugzeugs und Parameter laufender Dienste an KS2, welches eine Boden-Boden-Funkverbindungsübergabeantwort (HOV Response) sendet, die die neue lokale Kennung, den bevorzugten Übergabezeitpunkt und die PDTCH-Kennung. Die erste Bodenstation (KS1) plant den exakten Übergabezeitpunkt wann die Übergabe stattfinden soll und sendet die Verbindungsübergabeanweisung (HOV Command) über den festen FL an die Bord-LMU, welche die Übergabe exakt zum vorbestimmten Zeitslot ausführen muss. (Dies ist wichtig für unterbrechungsfreie Übergabe bestehender Sprachdienste.) KS1 sollte für die Übergabe warten, bis alle Datenübertragungen (DLS) erfolgreich waren (ACK'd) und die Erteilung neuer Ressourcen verweigern. Nach erfolgreichem Wechseln sendet die Bord-LME eine Zugangsmeldung über sRACH an die neue Kontrollstation (KS2) inklusive seiner ICAO-Kennung, lokalen Kennung und optional der KS-Kennung. Die unterbrechungsfreie/weiche Übergabe ist abgeschlossen, wenn KS1 von KS2 die Verbindungsübergabeabschluss-Meldung erhält. KS1 löscht das Luftfahrzeug aus seiner lokalen Datenbank.

Netzaustritt

Die Netzaustritt-Prozedur wird gestartet, wenn das Luftfahrzeug bzw. die Kontrollstation kein oder nur ein zu schwaches Signal von der teilnehmenden Luftfunkstelle empfängt. Die Netzaustrittsanfrage wird von der Kontrollstation oder dem Luftfahrzeug ausgesendet. Falls der Netzaustritt durch das Flugzeug ausgelöst wird, sendet es eine Netzaustrittsanfrage an die Bodenstation, welche die Verbindung mit einer Netzaustrittabschluss-Meldung beendet. Stößt die Kontrollstation den Austritt an, antwortet das Flugzeug auf die Anfrage der Kontrollstation mit einer Netzaustrittantwort. KS sendet Netzaustrittabschluss.

Ressourcenreservierung

Für FL BC und RL RA Slots werden laut [SaHR05] alle zur Verfügung stehenden Träger genutzt.

In B-VHF werden (physikalische) Ressourcen zentral durch Kontrollstationen verwaltet und zugewiesen. Diese Vergabe muss durch eine Kontrollstation erfolgen. Die zentrale Kontrollstation unterhält zu jedem in Verbindung stehendem Luftfahrzeug mindestens einen festen vorwärtsgerichteten Transportkanal (FL PDTCH)².

Die Luftfahrzeuge hören alle ihnen fest zugewiesenen RL PDTCHs ab. Diese fixe Zuweisung der FL/RL-Ressourcen wird den Luftfahrzeugen zum Zeitpunkt der Netzinitialisierung bekanntgegeben ohne dass es einer Anfrage durch die Luftfahrzeuge bedarf. Die danach verbleibenden Ressourcen können für dynamische TCHs verwendet werden, die durch die Flugzeug explizit angefordert werden müssen. Für eine adäquate Verteilung statischer und dynamischer Ressourcenansprüchen ist eine sorgfältig geplante Frequenzplanung empfohlen. (Eine Frequenzplanung in der Form ist im mobilen selbstorganisierenden Umfeld nicht möglich.)

Nachfolgend werden die B-VHF Ressourcen aufgelistet:

B-VP feste Ressourcen für Party-Line/Gruppenruf

²Ein PDTCH (Physical Data Transport Channel) enthält PDTCHLID, MID, CDMA Code, TCH Typ, TCH Zeitschlitznummer)

B-VB feste Ressourcen für FL Sprachrundrufe

B-DB feste Ressourcen für FL Datenrundrufe (verbindungslos)

B-VS bedarfsgerechte Ressourcen für selektive Sprachdienste (verbindungsorientiert)

B-VA bedarfsgerechte Ressourcen für selektive Datendienste (verbindungsorientiert und verbindungslos)

B-DN bedarfsgerechte Ressourcen für unbestätigte Datendienste (verbindungslos)

3.3 Zusammenfassung

B-VHF arbeitet als terrestrisches System mit Bodenstationen und ihnen zugeordneten Zellen. Es ähnelt damit Lösungen zur Mobilkommunikation wie zum Beispiel GSM. Mobile Kontrollstationen sind nicht explizit vorgesehen. Aufgrund des Zeitschlitzverfahrens können Luftfahrzeuge nicht direkt miteinander kommunizieren, weil ihre Funkausrüstung zu gleichen Zeitpunkten jeweils auf Senden oder Empfangen eingestellt sind.

4. Entwurf

In diesem Kapitel erfolgt die ausführliche Beschreibung des eigenen Lösungsansatzes. Dabei werden Lösungsalternativen diskutiert und Entwurfsentscheidungen dargestellt.

4.1 Rahmenwerk

Diese Arbeit erstreckt sich in unterschiedlichem Umfang auf die Sicherungsschicht und die Netzwerkschicht.

Auf der Sicherungsschicht wird ein mobilitätsbasiertes Clustering für Medienzugriff mit multi-hop-Kommunikation entworfen.

Auf der Netzwerkschicht wird ein Geo-Routing mit explizitem Wissen über zukünftige Bewegungen vorgeschlagen.

4.2 Clusterbildung

Die sich durch FL/RL-Links ergebende Assymetrie der Kommunikation in B-VHF erzwingt, dass die Kommunikation immer über eine Kontrollstation zu erfolgen hat. Im terrestrischen Fall übernimmt eine Bodenstation die Verteilung und Vergabe der von den Luftfahrzeugen benötigten oder angeforderten Ressourcen. Diese Ressourcen sind Paare von FL- und RL-Slots. Im durch diese Arbeit zu entwerfenden selbstorganisierten Fall werden spezielle Luftfahrzeuge eingeführt, die die Aufgabe einer Kontrollstation übernehmen können. Diese speziellen Luftfahrzeuge werden im Folgenden Leitstationen, Leitluftfunkstellen oder Master Aircraft genannt. Diese *Leitluftfunkstellen* stellen die Clusterleader in Clustern aus Luftfahrzeugen dar. Aus der Beschaffenheit der Kommunikation über FL und RL ergibt sich, dass jedes Mitglied eines Clusters ausschließlich mit seinem Clusterkopf kommunizieren kann, der mit jedem seiner Mitglieder direkt verbunden sein muss. Somit liegt hier ein sogenannter 1-hop-Cluster vor.

Folgestationen sind Luftfunkstellen, die bei genau einer Leitstation (oder Brückenleitstation) angemeldet und außer ihr mit keiner anderen Station verbunden sind. Luftfunkstellen, die bei keiner Leitstation angemeldet sind, heißen *ungruppiert* (englisch: *unclustered*).

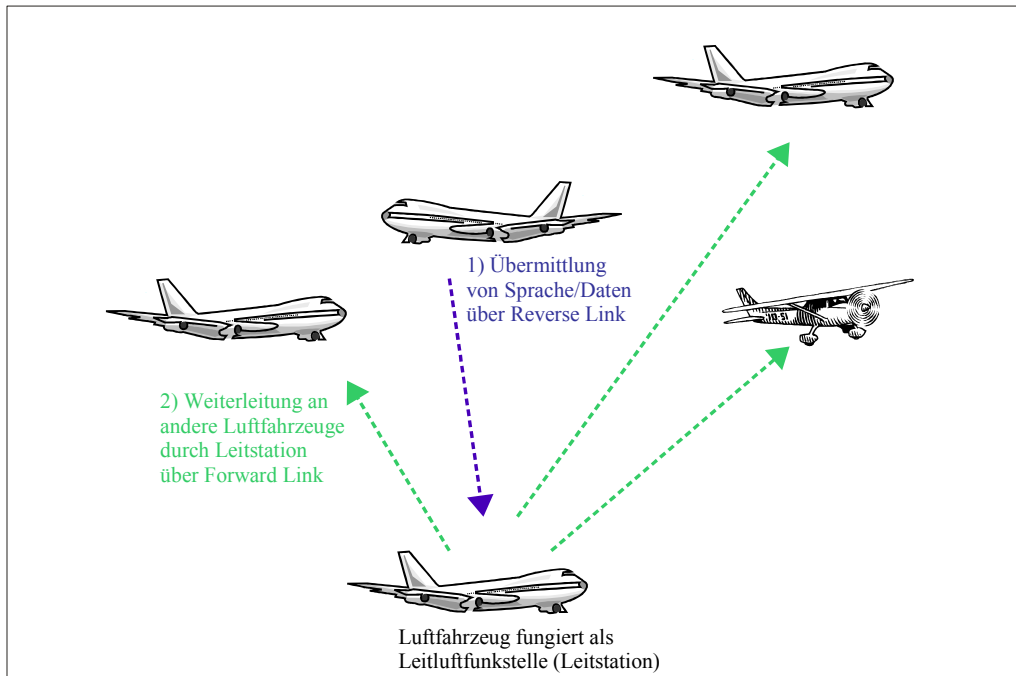


Abbildung 4.1: Bord-Bord-Kommunikation in B-VHF mit dedizierter Leitstation

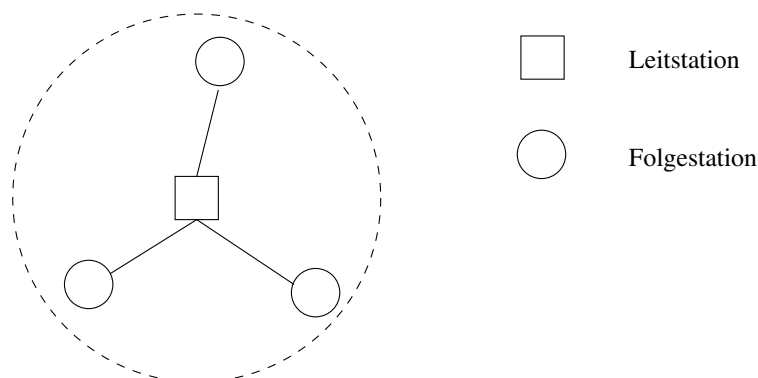


Abbildung 4.2: 1-hop Cluster

4.2.1 Cluster-Stabilität

Da Flugzeuge im Allgemeinen hochmobile Teilnehmer in der Netzwerkkommunikation sind, werden sich innerhalb eines Clusters die Mitgliedschaften häufig ändern. Einmal weil einige Flugzeuge mit anderen Geschwindigkeiten fliegen als der Clusterleader, zum anderen weil der Clusterleader in eine andere Richtung fliegt als einige seiner Mitglieder. Um den Aufwand zur Bildung und Neubildung von Clustern möglichst gering zu halten, ist es gewünscht möglichst stabile Cluster zu bilden, in denen sich die Mitgliedschaft selten ändert. Dies ist dann der Fall, wenn Flugzeuge mit ähnlicher Fluggeschwindigkeit und annähernd gleicher Richtung zu Clustern zusammengeschlossen werden. Hierfür muss ermittelt werden welche Luftfahrzeuge stabile Cluster bilden können.

Beobachtung der Signalstärke zur Ermittlung der Stabilität

Wie bereits erwähnt, sammelt jedes Luftfahrzeug in seiner LME (auf MAC-Ebene) Daten über die Signalgüte zu seiner Kontrollstation. Eine hohe Sende- und Empfangsleistung ist ein Anzeichen für räumliche Nähe und eine hochwertige Verbindungsqualität. Bewegen sich zwei Flugzeuge in verschiedene Richtungen, wird die gemessene Leistung erst ansteigend und dann absteigend sein, sobald die Flugzeuge sich wieder voneinander trennen. Fliegen die Luftfahrzeuge jedoch relativ gleich, bleiben die Messwerte über einen längeren Zeitraum konstant. Diese Erkenntnis lässt sich zur Bestimmung stabiler Verbindungen ausnutzen. Ändert sich die Signalstärke zwischen Leitstation und Luftfahrzeug im Laufe der Messungen kaum, so ist diese Leitluftfunkstelle ein guter Kandidat als Clusterkopf für dieses Luftfahrzeug. Jedoch kann dieses Kriterium nicht allein betrachtet werden, da die Signale zweier weit entfernter Luftfahrzeuge mit gleichem Bewegungsvektor ebenfalls konstante Messungen liefern, jedoch aufgrund der hohen Entfernung keine hohe Verbindungsgüte erlauben. Nur die Kombination aus Signalqualität und Signalkonstanz verspricht zuverlässige Annahmen über die Dauerhaftigkeit der Verbindung zweier Luftfahrzeuge. Signalgüte und Signalkonstanz werden gewichtet und als Auswahlkriterium für die Auswahl von Leitstationen angewandt. Die optimale Gewichtung soll in einer Simulation ermittelt werden.

Mobilitätsbasierte Ermittlung der Cluster-Stabilität

Eine andere (schichtenübergreifende) Möglichkeit den Grad der Stabilität zu bestimmen berücksichtigt die Positionen und die Bewegungsvektoren der Teilnehmer. Diese Informationen liegen dem System auf MAC-Ebene jedoch nicht vor, sondern werden erst in einer darüberliegenden Schicht ausgewertet. Entweder in der Netzwerkschicht (für positionsbasiertes Routing oder spätestens in der Anwendungsschicht (z. B. aus ADS-B). Aus diesen Informationen kann vorherberechnet werden, zu welchem Zeitpunkt die Entfernung so groß sein wird, dass eine Verbindung nicht mehr möglich sein wird. Der Teilnehmer, der die Verbindung mit der höchsten Lebenszeit verspricht, wird bevorzugt. Die Berechnung dieser Lebenszeit ist jedoch aufwändig. Etwas leichter ist die Abschätzung durch Vorherberechnung der Position zu zukünftigen Zeitpunkten t_1, t_2, t_3 etc. Je mehr Zeitintervalle eine Verbindung noch erlaubt, desto höher wird die Verbindung zu diesem Teilnehmer bewertet.

4.2.2 Ermittlung der Clusterkriterien

Zur Ermittlung des optimalen Master Aircraft tastet ein Luftfahrzeug die Rundruf-Zeitschlitz auf allen Frequenzen ab. Um die Erkennung von Leitstationen zu beschleunigen, empfiehlt es sich für die Anwendung im selbstorganisierenden Modus die Anzahl der abzutastenden Frequenzen einzuschränken. Dies hat eine unmittelbare Auswirkung auf die maximale Anzahl möglicher Master Aircraft in Sendereichweite, denn jede Leitstation benötigt ein eigenes Band, auf dem es seine BC-Slots versenden kann. Die optimale Anzahl verschiedener Frequenzen ist abhängig von der tatsächlichen Verteilung des Luftverkehrs in der Realwelt. In dieser Arbeit wird eine Anzahl von 20 Frequenzen angenommen. Man beachte, dass die für die selbstorganisierende Bord-Bord-Kommunikation reservierten Frequenzen im Bodenbetrieb eventuell nicht verwendet werden dürfen. Außerdem wird davon ausgegangen, dass aufgrund der eingeschränkten Leistungsfähigkeit der Bordgeräte gegenüber den Bodengeräten weniger Symbole parallel gesendet oder empfangen werden können (3.2.2). Für

diese Arbeit wird von einem Mehrfachzugriff von maximal fünf parallelen Symbolen ausgegangen. Das Scheduling über diesen Mehrfachzugriff ist in B-VHF bisher noch nicht definiert worden, weshalb hier nicht weiter darauf eingegangen werden soll.

Das Luftfahrzeug tastet jeden Subträger nach BC-Slots ab. Dieser enthält die Luftfahrzeugkennung (AC_ID), die Sendeleistung der Kontrollstation, eine Liste unterstützten Dienste sowie eine Liste benachbarter Kontrollstationen. Das empfangende Luftfahrzeug ermittelt die Signalstärke des empfangenen Signals und berechnet die Signalqualität. Nur diese Informationen werden bei der Ermittlung der Clusterkriterien herangezogen. Ein BC-Slot liefert dem Luftfahrzeug somit alle Angaben, die es benötigt, um Signalqualität und Signalkonstanz zu berechnen und somit das passende Master Aircraft zu ermitteln.

Das Clusterkriterium wird in dieser Arbeit mittels des SQUC-Wertes (s. 4.1) berechnet. SQUC steht für *signal strength and uniformity clustering*.

$$c_j = \alpha \cdot \frac{q_j^{(n)}}{|q_j^{(n)} - q_j^{(n-1)}|} \quad (4.1)$$

Dabei ist c_j das Clusterkriterium für Leitstation j , $j, n \in \mathbb{N}$, $q_j^{(n)}$ die gemessene Signalstärke zum Zeitpunkt t_n für Leitstation j und $q_j^{(n-1)}$ die gemessene Signalstärke zum Zeitpunkt t_{n-1} .

Je kleiner die Differenz zwischen der eigenen Geschwindigkeit und der des Master Aircraft ist, desto höher wird der SQUC-Wert. Dahinter steht die Überlegung, dass die Verbindung desto länger bestehen wird, je ähnlicher der Bewegungsvektor ist. Durch Berechnung des Betrags werden schnell abfliegende Luftfahrzeuge wie schnell anfliegende Luftfahrzeuge behandelt. Die Gleichung in 4.1 berücksichtigt nur die aktuell und zuletzt gemessene Signalstärken. Es wäre auch möglich anstelle des zweiten Wertes einen laufenden Durchschnitt einzusetzen, der den bisherigen Verlauf wiedergibt. Nach Ansicht des Verfassers ist dies unter den gegebenen Umständen nicht nötig, da in dem hier untersuchten Umfeld konstante Bewegungen vorliegen. Falls kein Wert für $q_j^{(n-1)}$ vorliegt, weil die Signalstärke eines Luftfahrzeugs erstmalig gemessen wurde, wird hier als Startwert $q_j^{(n)} - 1$ verwendet, so dass das Clusterkriterium dem Wert der Signalstärke entspricht. Der Wert α ist variabel gehalten und kann durch eine Konstante oder eine weitere Funktion ersetzt werden. In dieser Arbeit wird mittels Simulation untersucht, welcher Wert für α gute Ergebnisse liefert.

4.2.3 Cluster-Eintritt

Hierzu führt ein Luftfahrzeug eine Liste, in der es jede gefundene Leitstation mit den Angaben des BC-Slots sowie von Signalgüte und Signalkonstanz. Aus den beiden letztgenannten Werten wird jeweils eine Gewichtung berechnet, die darüber entscheidet bei welcher Leitluftfunkstelle das Luftfahrzeug versuchen wird sich anzumelden.

Die hierfür erforderliche Anmeldeprozedur unterscheidet sich nicht wesentlich vom Netzeintritt im terrestrischen B-VHF (siehe Abschnitt 3.2.4). Für die Propagierung der angemeldeten Flugzeuge an benachbarte Leitstationen ist jedoch noch eine Erweiterung nötig, die im nächsten Abschnitt beschrieben wird.

4.3 Streunetzbildung

Wie bereits erwähnt, können Leitstationen nicht direkt mit anderen Leitstationen kommunizieren, da sie aufgrund der durch den Forward Link und Reverse Link (s. Abbildung 3.3) vergebenen Senderichtungen jeweils zu gleichen Zeitpunkten senden bzw. empfangen und so die Sendungen des jeweils anderen nicht empfangen können. Die Zeitschlitze sind so eingestellt, dass nur Folgestationen die Übertragungen der Leitstationen empfangen können. Diese Einschränkung kann dadurch umgangen werden, dass gewisse Folgestationen als Bindeglied der Kommunikation zwischen Leitstationen fungieren. Diese speziellen *Brückenstationen* (s. Abbildung 4.1) können Mitglied mehrerer Cluster sein und verbinden somit Cluster miteinander. Durch diesen Ansatz, der die Bildung von Streunetzen ermöglicht, wird sogar eine *multi-hop-Kommunikation* über mehrere Cluster hinweg ermöglicht. Ferner gelingt durch hier beschriebenen Ansatz die Integration aller in Reichweite befindlichen Luftfahrzeuge in das Streunetz.

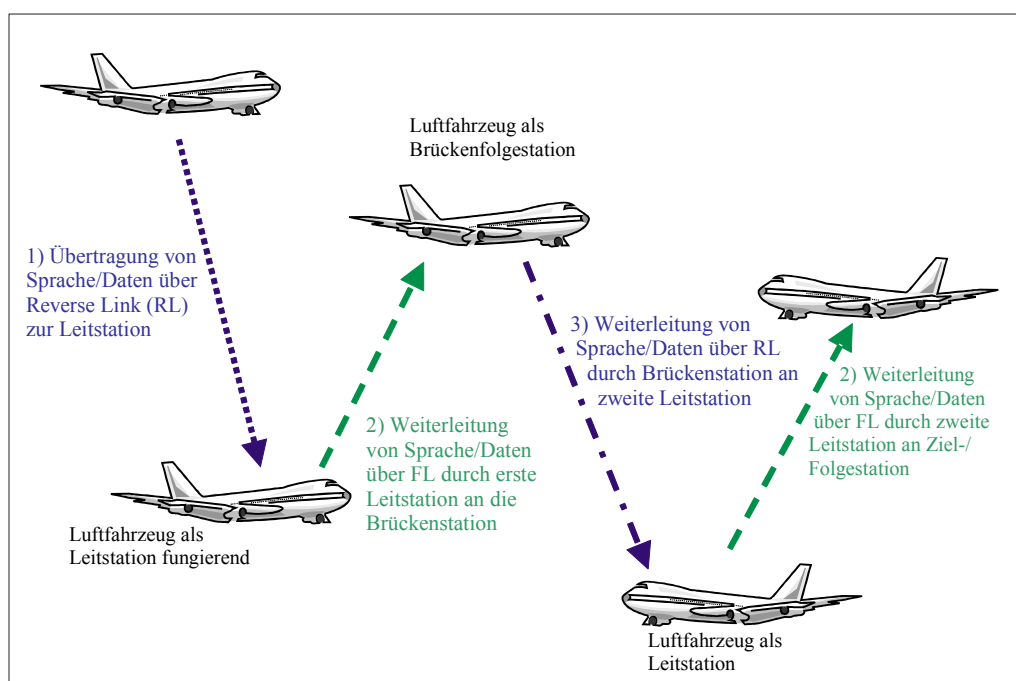


Abbildung 4.3: Bord-Bord-Kommunikation B-VHF mit Brücken(folge)station und Leitstationen

In diesem Abschnitt wird beschrieben und erläutert, nach welchen Prozeduren und Kriterien Cluster zu Streunetzen verbunden werden.

4.3.1 Brückenstationen

Definition

Brückenstationen sind mit mindestens zwei anderen Stationen verbunden. Ist sie mit mehreren Leitstationen verbunden, so handelt es sich um eine *Brückenfolgestation*, sofern sie selbst keine Leitstation ist. Spielt sie dabei für gewisse Folgestationen die Rolle einer Leitstation, ist sie eine *Brückenleitstation*.

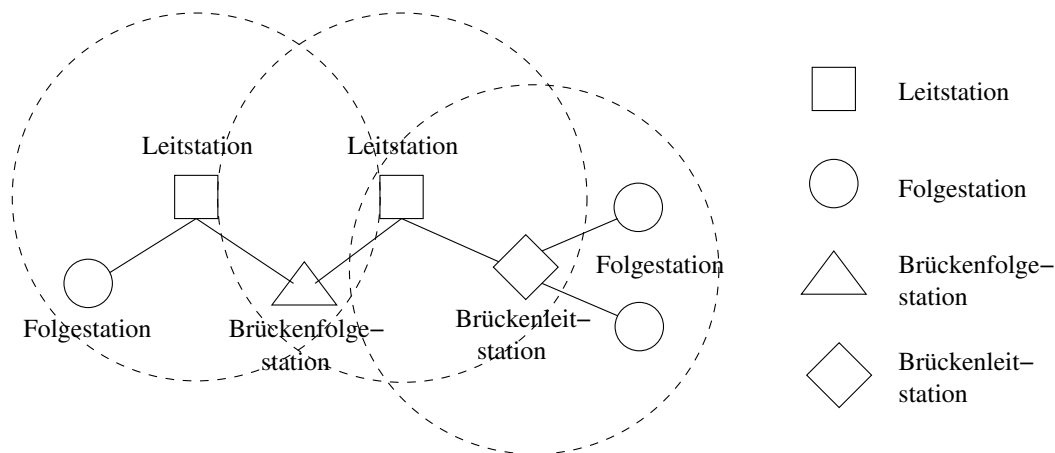


Abbildung 4.4: Streunetz mit Brückenstationen

Koordination zwischen Brückenstation und Leitstation

Da im terrestrisch-basierten B-VHF ein Luftfahrzeug mit nur einer Bodenstation verbunden ist, ist für die Unterstützung von Brückenstationen eine Erweiterung der Lösung in B-VHF erforderlich. Um neben den BC-Slots in der Hintergrundabtastung nun auch die Forward Links mehrerer Leitstationen empfangen zu können und ebenso auf verschiedenen Reverse Links senden zu können, rastet sich die Brückenstation synchron zu gewissen Zeitpunkten abwechselnd auf die Unterträger der Leitstationen ein. Dies hat zur Folge, dass die Brückenstation nicht mehr alle Übertragungen einer Leitstation empfangen kann. Damit die Leitstation nicht vergebens an die Brückenstation sendet, informiert die Brückenstation die Leitstation vorher über ihre *Wechselfolge*, die diese berücksichtigen muss. Dort wird geklärt, welche FL/RL-Paare welcher Leitstation zur Verfügung stehen. Die Leitluftfunkstelle wiederum informiert die Brückenstation welche Ressourcen sie in Anspruch zu nehmen plant. Die genaue Ablaufplanung soll nicht Bestandteil dieser Arbeit sein. Je nachdem wie groß der Kommunikationsbedarf zwischen zwei Clustern ist, werden der Brückenstation von beiden Leitstationen mehrere FL-/RL-Paare aus ihrem jeweiligen Frequenzband zugewiesen.

Über diese Verbindung tauschen Brückenstationen auch Routing-Informationen mit den Leitstationen aus (siehe Abschnitt 4.5.1). Hierüber tauschen Brückenstationen und Leitstationen auch Informationen über Luftfahrzeuge aus, die über sie erreichbare sind. Dies ergibt eine 2-Cluster-Reichweite. Zur Verwaltung dieser Informationen führt die Leitstation eine (lokale) Routingtabelle.

Kriterien für Brückenstationen

Die Aufgabe der Brückenstation besteht darin, die Kommunikation zwischen zwei Clustern zu ermöglichen und somit die Konnektivität zu erhöhen. Das schließt auch ein, dass zwei Cluster durch mehrere Brückenstationen verbunden sind, was zu einer Redundanz führt, die zwecks Ausfallsicherheit und/oder Erhöhung der Bandbreite gewollt sein kann. Im Prinzip kann jede Folgestation, die sich mit mehreren Leitstationen verbinden kann, eine Brückenstation werden. Aufgrund des hohen Kommunikationsaufwands ist es sinnvoll, die Brückenstationen nach gewissen Optimierungskriterien auszuwählen. Diese setzen sich in dieser Arbeit aus Signalqualität und Konnektivität zusammen. Die Signalstärke wird mit berücksichtigt, damit nahe

fliegende Luftfahrzeuge eingebunden werden, obwohl sie eine andere Bewegungsrichtung haben. Für manche Anwendungen in der Luftfahrt kann die Kommunikation zwischen sich näher kommenden aufeinander zufliegende Flugzeuge sehr wichtig sein (z. B. Verkehrstrennung). Das Konnektivitätskriterium berechnet sich aus der Anzahl der Luftfahrzeuge, die durch eine Brückenverbindung *neu* in das Streunetz hinzugefügt würden. Zu diesem Zweck muss sich das Luftfahrzeug jedoch erst bei dieser Leitluftfunkstelle anmelden. Ohne Anmeldung erfährt es nur die Anzahl und Kennungen der benachbarten Kontrollstationen, mit denen das Master Aircraft über Brückenstationen verbunden ist, aber nicht die Clustermitglieder dieses Master Aircrafts.

Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit des Verbindungsgrads

Die Autoren von [KaSG03] haben die Leistungsfähigkeit von Brückenstation untersucht und empfehlen maximal drei Brückenstationen bei gleichberechtigter Priorität. Eine Erhöhung der Zahl der Brückenstationen macht eine Erhöhung der Priorität der Brückenstationen gegenüber den Folgestationen erforderlich. Je weniger Knoten beteiligt sind, desto größer ist die Bandbreite der Brückenstationen. Eine Erhöhung der Zahl der Brückenstationen führt sogar zum Optimum. Ab vier Brückenstationen müssen diese jedoch eine höhere Priorität zugewiesen bekommen als normale Folgestationen ($p > 1$). Es stellt sich dort heraus, dass die Erhöhung der Priorität auch die Systemleistung erhöht. Diese Erhöhung ist jedoch nicht unbegrenzt möglich, sondern nur bis die Folgestationen (wegen geringerer Priorität) zum Flaschenhals werden. Kleinere Anzahl von Knoten je Leitstation benötigt geringere Priorität für Brückenstationen.

Besonderheit der Brückenleitstationen

Eine Brückenleitstation dient zur Erkundung anderer Leitstationen, die nicht mittels (Brücken-) Folgestationen verbunden werden können (siehe auch Abschnitt 4.4.5) Hierzu wechselt sie in regelmäßigen Abständen vom Zustand einer Leitstation in den Zustand einer Brückenfolgestation und umgekehrt. Dabei behalten sämtliche Wechsel- und Routingtabellen ihre Gültigkeit, sie werden beim Wechsel also nicht gelöscht. Eine Brückenleitstation kann zu einem Zeitpunkt aber nur entweder Leitstation oder Brückenfolgestation sein, d. h. dass es sich seine Zeitschlitzte aufteilen muss. Über diese Zeitintervalle müssen neben der anderen Leitstation daher zusätzlich die angeschlossenen Folgestationen informiert werden, die dem Cluster der Brückenleitstation zugeordnet sind. Dies bedeutet einen kurzzeitigen Kommunikationsausfall während einer gewissen Zeitdauer.

Zu so einem Ausfall kommt es auch während eine Leitstation eine andere Leitstation sucht. Dies sollte aus den zuvor genannten Gründen möglichst so selten wie möglich aber so häufig wie nötig stattfinden, um andere Leitstationen rechtzeitig zu finden. Nach einer gewissen Periode wechselt eine normale Leitstation kurzzeitig in den Zustand einer Folgestation, um das Frequenzband nach anderen Leitstationen abzutasten, die noch von keiner Folgestationen entdeckt wurde. Bei 20 abzutastenden Unterträgern und einer Superrahmenlänge von 240 ms bedeutet dies einen Ausfall von 4,8 Sekunden. Der Zustandswechsel kann nach einer festen (noch zu ermittelnden) Zeitperiode oder nach dem Zufallsprinzip (mit einer zu ermittelnden Wechselwahrscheinlichkeit) erfolgen. Es kann auch in Betracht gezogen werden, das

Frequenzband nicht auf einmal, sondern in Teilen abzutasten, um den Ausfall in kleinere Intervalle zu unterteilen. Dies wäre mittels Simulation oder Analyse quantitativ zu untersuchen, wird aus Zeitgründen in dieser Arbeit jedoch nicht mehr möglich sein.

4.3.2 Initialisierung eines Streunetzes

Ehe ein Cluster gebildet werden kann, müssen die Luftfahrzeuge eine Leitluftfunkstelle finden und sich bei ihr anmelden. Befindet sich noch kein Master Aircraft in Reichweite, so dass keine Anmeldung möglich ist, muss ein Verfahren eingeführt werden, eine solche Leitluftfunkstelle zu bestimmen. Auch hier muss wieder beachtet werden, dass Luftfahrzeuge nur die Übertragungen von Kontrollstationen empfangen können, so dass sich Folgestationen untereinander nicht absprechen können.

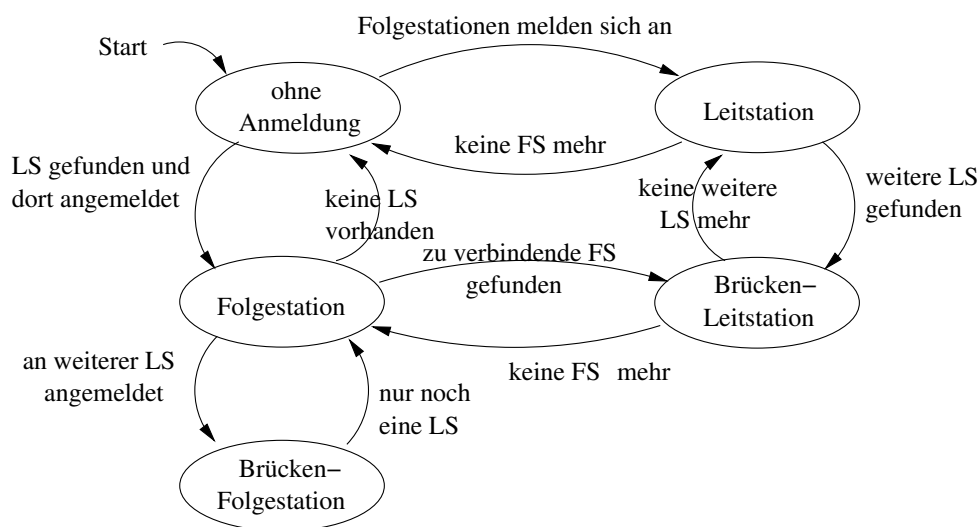


Abbildung 4.5: Zustandsübergänge im Streunetz

Initialisierung eines Clusterkopfs bzw. einer Leitluftfunkstelle

Es wird nun der Fall betrachtet, dass sich noch kein Master Aircraft in Reichweite befindet. Dies kann dann der Fall sein, wenn ein Flugzeug aus der Reichweite einer Bodenstation herausfliegt aber noch kein selbstorganisierter Cluster gebildet wurde. Die Bodenstation kann das Luftfahrzeug an keine andere Bodenstation übergeben und empfiehlt der Bordfunkausrüstung (primär) die für die selbstorganisierende Bord-Bord-Kommunikation reservierten Frequenzen abzutasten. Das Vorgehen wird in Abschnitt 4.4.4 genauer beschrieben.

Das einem Cluster noch nicht zugeordnete Luftfahrzeug tastet alle für die Bord-Bord-Kommunikation reservierten Frequenzen ab. Findet es nach einem kompletten Scan (zum Beispiel 4,8 s) keine Leitstation, so erzeugt der Zufallsgenerator eine Zahl p zwischen 0 und 1 ($0 \leq p < 1$). p_L sei die Wahrscheinlichkeit, mit der sich ein nicht gruppiertes Flugzeug selbst zur Leitluftfunkstelle erklären soll. Wenn $0 \leq p \leq p_L$, erklärt sich das Flugzeug zu einer Leitstation und sendet auf einem zufällig ausgewählten reservierten Subträger im BC-Slot u. a. seine Kennung AC_ID und Signalleistung L_s . Dieser Vorgang wird wiederholt solange es kein Master Aircraft gibt, d. h. weder eines gefunden wurde noch das Flugzeug sich selbst dazu erklärt hat. Wie weiter

unten beschrieben, gibt eine Leitluftfunkstelle ihren Status als Leitstation wieder auf, wenn sich nach einer dort beschriebenen Zeit keine Folgestationen angemeldet haben. Das Master Aircraft startet auch dann wieder in diesem Abschnitt beschriebenen Initialisierungsprozess. Wie lange ein Master Aircraft ohne Folgestation bleibt, ist davon abhängig, wie lange eine Folgestation benötigt, um aussagekräftige Berechnung der Kriterien anzustellen (siehe oben). Diese Zeitdauer wird mittels Simulation in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit p_L betrachtet.

Eintritt in das Streunetz

Nun sei ein Master Aircraft in Reichweite. Das noch nicht zugeordnete Luftfahrzeug tastet wie in B-VHF beschrieben (siehe Abschnitt 3.2.4) das Frequenzband ab und meldet sich bei der zuerst gefundenen Leitstation an. Dabei scannt es im Hintergrund (restricted scanning in B-VHF) nach weiteren Rundrufen von Leitstationen und sammelt die BC-Daten der anderen Leitluftfahrzeuge in Reichweite.

Nach Abtastung des gesamten Frequenzbereichs kann das Flugzeug nun die Kriterien sowohl für Leitstation als auch für Brückenstationen aller in Frage kommender Luftfahrzeuge berechnen. Da nach einmaliger Komplettabtastung noch keine Werte für die Signalkonstanz errechnet werden können, ist in diesem Fall allein die Signalqualität entscheidend. Das dabei resultierende Leitluftfahrzeug wird schon alleine für den Aufbau einer Brückenverbindung interessant. Die Leitstation mit der stabilsten Verbindung kann erst nach weiteren Abtastvorgängen zuverlässig errechnet werden.

In einer Alternative zu diesem Entwurf, in der es als wichtig erachtet wird, dass die Folgeluftfahrzeuge schnellstmöglich Verbindungen aufbauen, kann sich das nicht gruppierte Luftfahrzeug unverzüglich bei der zuerst gefundenen Leitstation anmelden. Werden im selben Abtastzyklus Master Aircraft mit noch besseren Kriterien gefunden, dann kann wiederum sofort eine Verbindung aufgebaut werden oder gewartet werden bis das gesamte Band abgetastet wurde. In diesem Fall sollten weniger Clusterwechsel erfolgen, da die Leitstation mit maximalen Kriterium feststeht. Im anderen Fall wird sofort zur Leitstation gewechselt, die ein besseres Kriterium als das bisherige Master Aircraft aufweist. So kann sich die Folgestation schneller an Dynamik im Streunetz anpassen, dies erhöht aber auch die Volatilität im Netz. Beispielsweise kann sich der nächst gemessene Wert des früheren Master Aircraft doch als besser erweisen. Daher ist es sinnvoll kurzzeitig mit der alten und neuen Leitstation verbunden zu bleiben. Diese beiden letztgenannten Fälle werden in der Simulation auf Stabilität untersucht. Erst nach zwei vollständigen Abtastvorgängen sind genügend Daten vorhanden, um die Clustering- und Brückenkriterien zuverlässig zu berechnen. Falls das zuerst gefundene Master Aircraft dann nicht mehr zur Liste der bevorzugten Leitstationen gehört, wird die Übergabeprozedur gestartet, die in Abschnitt 4.4.2 genauer beschrieben wird.

Aufbau von Brückenverbindungen

Sei das Luftfahrzeug l_F nun als Folgestation an der Leitstation l_L mit dem besten Wert verbunden (s. Abbildung 4.6 (a)). Das Luftfahrzeug l_F berechnet für die weiter gefundenen Leitstationen l_1, l_2, \dots, l_k das Kriterium für Brückenverbindungen. Werden Master Aircraft (z. B. l_j mit $j \in \{1, 2, \dots, k\}$) gefunden, die sich (noch) nicht in der Routingliste der Leitstation befinden, wechselt die Folgestation l_F in den Status einer Brückenfolgestation, meldet der ersten Leitstation l_L seine Wechselfolge

(s. o.) und meldet sich bei der neuen Leitstationen l_j mit der besten Signalstärke als (Brücken-)Folgestation an ($b_j = \max_{i \in \{1,2,\dots,k\}} b_i$). Das Luftfahrzeug l_F ist nun Folgestation von l_L und l_j (s. Abbildung 4.6 (b)). Es verbindet somit diese beiden Cluster als Brückenfolgestation. Die Brückenfolgestation kennt nun die Anzahl der Clustermitglieder. Fortan fließt diese Zahl mit in die Berechnung des Brücken-Kriteriums ein (d. h. $n_c \neq 1$). Dabei ist zu beachten, dass die Größe eines Clusters erst bestimmt werden kann, wenn eine Anmeldung am Cluster erfolgt ist. Man könnte überlegen auch diese Information im BC-Slot bekanntzugeben, dies ist in B-VHF jedoch nicht vorgesehen. Eine Brückenstation sollte aus Gründen der Leistungsqualität (siehe [KaSG03]) nicht mehr als drei Leitstationen miteinander verbinden.

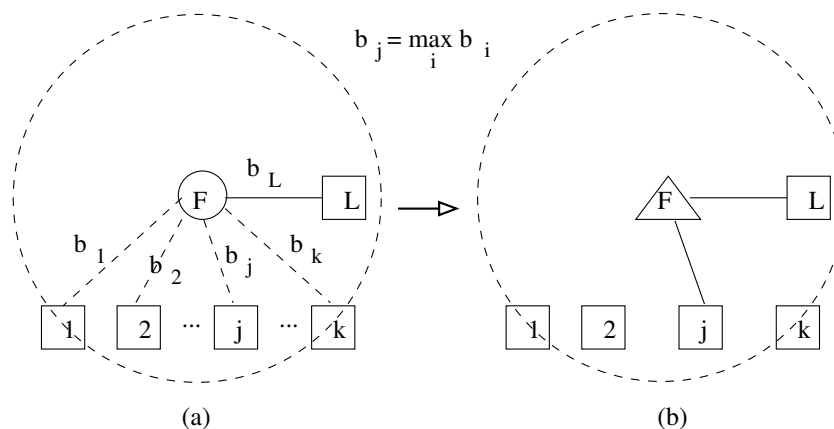


Abbildung 4.6: Auswahl einer neuen Brückenverbindung

Es wird aufgrund der hohen Mobilität bewusst in Kauf genommen, dass Brückenverbindungen redundant aufgebaut werden. Falls eine Verbindung ausfällt, kann die Kommunikation auf die verbleibenden Verbindungen zwischen zwei Clustern umschwenken. Dieser Ansatz mag den Kommunikationsaufwand bei der Streunetz-Initialisierung erhöhen, er sorgt aber für eine bessere Abdeckung. Eventuell kann man sich überlegen, zwischen dem Herstellen von Brückenverbindungen einen Back-off Timer einzuführen, so dass sich die Brückenstationen eines Clusters besser verteilen. Dies erhöht jedoch die Erkundungszeit. Sollte wirklich das Brücken-Maximum einer Leitstation überschritten werden, kann die Leitstation Maßnahmen ergreifen, um ihren Brückengrad auf drei zu reduzieren. Entweder durch Abtrennung einiger Folgestationen aus seinem Cluster oder durch Aufforderung eine andere Verbindung zu trennen.

4.4 Pflege des Streunetzes

Dieser Abschnitt beschreibt wie sich das Streunetz an Änderungen anpasst, die sich aus der speziellen Mobilität der Flugzeuge ergeben. Dies beinhaltet die initiale Bildung eines Clusters, den Einflug und Ausflug aus einem Cluster, die Verbindungsübergabe, den Wegfall einer Leitstation, die Verbindung mehrerer Cluster zu einem Streunetz und berücksichtigt auch Kanalstörungen durch andere Flugzeuge. Es wird auch ein Vorschlag zum Routing erörtert.

4.4.1 Eintritt von Luftfahrzeugen in das Streunetz

Hier wird beschrieben, wie ein neues Luftfahrzeug in ein bereits bestehendes Streunetz aufgenommen wird. Dies erfolgt nacheinander für eine Folgestation, eine Leitstation und eine Brückenstation.

Zugang einer Folgestation

Ein Luftfahrzeug l_F fliegt in die Reichweite einer Leitstation l_L ein.

1. Das Luftfahrzeug l_F meldet sich an (Netzeintritt-Prozedur).
2. Die Leitstation l_L trägt l_F in die Cluster-Liste ein und erstellt einen Routineeintrag für l_F .
3. Die Leitstation propagiert die geänderte Routing-Information via Brücken an die angeschlossene Leitstationen bzw. an Brückenstationen, die diese an ihre Leitstationen weitergeben.

Zugang einer Leitstation

Neue Leitstation kommt in die Reichweite eines bereits bestehenden Clusters oder Streunetzes.

1. Die Leitstation l_1 ändert evtl. seine Frequenz (nach Erhalt einer Störungsmeldung nicht angemeldeter Luftfahrzeuge).
2. Die Leitstation l_1 propagiert Zugangsinformationen über BC-Slots.
3. Die Leitstation l_1 nimmt Anmeldungen von FS an (bis das Maximum erreicht ist).
4. Die Leitstation l_1 empfängt Routing-Information über BS l_2 und Wechselfolgen von evtl. existierenden Brückenstationen. (Dies ist sehr wahrscheinlich, da eine neue MA_ID gefunden wurde.)
5. Die Leitstation l_1 übermittelt neu aufgenommene Einträge in Routingtabelle an verbundene LSen $l_n, n \in N$.
6. Wenn bei der Leitstation keine Folgestationen angemeldet sind, gibt die Leitstation (nach einer Backoff-Zeit) diesen Status auf und startet die Initialsuche.

Zugang einer Brückenfolgestation

Aus einer Folgestation wird eine Brückenfolgestation, weil sie sich bei zwei Leitstationen angemeldet hat.

1. Die Brückenfolgestation informiert ihre Leitstation über ihre Wechselfolge (diese bestimmt ihre zeitweise Erreichbarkeit in den angemeldeten Clustern).
2. Die Brückenfolgestation erhält von ihren Leitstationen Routing-Informationen über deren Folgestationen.
3. Die Brückenfolgestation gibt diese Routing-Information an andere ihrer Leitstationen weiter.

Zugang einer Brückenleitstation

Aus einer Leitstation wird eine Brückenleitstation, wenn eine neue (bisher unbekannte) MA_ID l_2 gefunden wird. Um diese in das Streunetz einzubinden wird die Leitstation l_1 zur BLS l_1 und meldet sich zusätzlich als Folgestation bei der Leitstation l_2 an. Solange l_1 Brückenleitstation ist, wechselt sie alternierend in den Zustand einer Leitstation und den einer Folgestation. Dabei muss sie neben der Leitstation l_2 auch ihre Folgestationen darüber informieren, in welchen Zeitschlitz sie die Cluster-Kommunikation weiterhin abwickeln kann. Dies bedeutet einen Ressourcengpass für den Cluster und seine Folgestationen, der dadurch aufgefangen werden kann, dass die Folgestationen bei weiteren Leitstationen angemeldet sind oder ein Verfahren zur Beseitigung von Brückenleitstationen eingeleitet wird (siehe Abschnitt 4.4.5).

Die Brückenleitstation l_{BL} sendet Routing-Informationen ihrer Clustermitglieder l_i ($i \in \{1, \dots, k\}$) an die Leitstation l_L . Die Brückenleitstation l_{BL} erhält als Brückenfolgestation Routing-Informationen von der Leitstation l_L und speichert sie in der lokalen Routingtabelle ab.

4.4.2 Verbindungsübergabe

Unter Verbindungsübergabe (oder auch Handover) versteht man den Wechsel der Clusterzugehörigkeit einer Folgestation. Dies kann nötig werden, wenn eine Folgestation eine Leitstation gefunden hat, die die Cluster-Kriterien besser erfüllt. Dies kann während der Netzinitialisierung oder nach Veränderungen im Luftbild aufgrund von Flugzeugbewegungen passieren. Ein weiterer Grund für eine Verbindungsübergabe kann die Beantragung eines Dienstes sein, den die aktuelle Leitstation nicht bieten kann. In B-VHF wird die erzwungene Verbindungsübergabe durch das Luftfahrzeug ausgelöst. Die nahtlose Verbindungsübergabe dagegen wird durch die Bodenstation ausgelöst. Im selbstorganisierenden Ansatz wird dies anderes gehandhabt.

Erzwungene Verbindungsübergabe

Die erzwungene Verbindungsübergabe (Forced Handover) erfolgt wie in Abschnitt 3.2.4 beschrieben mit dem Unterschied, dass die Entscheidung auf dem Cluster-Kriterium basiert (Signalstärke und Signalkonstanz, siehe Abschnitt 4.2) statt nur auf der gemessenen Signalstärke. Da die erzwungene Verbindungsübergabe einen geringeren Kommunikationsaufwand hat als die nachfolgend beschriebene nahtlose Verbindungsübergabe, ist sie als Übergabemethode vorzuziehen, solange keine Dienste übernommen werden müssen.

Nahtlose Verbindungsübergabe

In B-VHF erfolgt die nahtlose Verbindungsübergabe (Seamless Handover) nach Koordinierung der Kontrollstationen mittels Datenkommunikation über leistungsfähige Infrastrukturnetze. Auf diese kann im selbstorganisierenden Ansatz nicht zurückgegriffen werden, so dass die Abwicklung der nahtlosen Verbindungsübergabe über Brückenverbindungen zwischen den betroffenen Leitstationen erfolgen muss. Voraussetzung dafür ist, dass solche Brückenverbindungen möglich sind, sonst muss auf die erzwungene Verbindungsübergabe zurückgegriffen werden. Die nahtlose Verbindungsübergabe ist gewünscht, wenn ein Luftfahrzeug Dienste nutzt, die über den

Bereich eines Clusters hinausgehen. Ihre Aufgabe besteht darin, bestehende Verbindungen des Luftfahrzeugs trotz Wechsel seines Clusters aufrecht zu erhalten, so dass die Dienste ohne Unterbrechung fortgeführt werden können.

Eine nahtlose Verbindungsübergabe kann durch eine beteiligte Leitstation oder durch die betroffene Folgestation ausgelöst werden. Um zum B-VHF-Konzept möglichst kompatibel zu bleiben, wird zuerst die *Leitstation-getriebene* nahtlose Verbindungsübergabe betrachtet. Die Leitstation l_{L1} ermittelt aus den von den Folgestationen l_{F1}, \dots, l_{Fi} übertragenen Signalmessungswerten das optimale Master Aircraft für die jeweilige Folgestation l_{Fk} mit $k \in \{1, \dots, i\}$. Erzielt eine andere Leitstation l_{L2} einen besseren Clustering-Wert, so leitet Leitstation l_{L1} eine nahtlose Verbindungsübergabe zu Leitstation l_{L2} ein. Voraussetzung hierfür ist, dass bereits eine Brückenverbindung zwischen l_{L1} und l_{L2} existiert. Davon kann aber ausgegangen werden, da das Brückenkriterium so definiert wird, dass Leitstationen mit unbekannter Kennung und hoher Signalqualität priorisiert berücksichtigt werden beim Aufbau von Brückenverbindungen.

Im *Folgestationen-getriebenen* Ansatz baut die Folgestation selbständig eine Brückenverbindung zur neuen Leitstation l_{L2} auf und fordert die alte Leitstation auf, die Dienste an die neue Leitstation zu übertragen. Die Leitstation l_{L2} wird auch hier anhand des Cluster-Kriteriums ermittelt. Ist bei der neuen Leitstation die Kapazitätsgrenze erreicht, lehnt sie die Anfrage ab. Diese Ablehnung erfolgt bereits bei Anmeldung an der Leitstation l_{L2} bevor eine Brückenverbindung hergestellt werden konnte. Die Folgestation wird nun die nächstbessere Leitstation auswählen. Diese kann eine weitere Leitstation sein oder die Leitstation mit der sie bereits verbunden ist. Im ersten Fall wird die Folgestation die Übergabeanfrage wiederholen, im zweiten Fall keine Anfrage starten und im Cluster verbleiben.

4.4.3 Austritt von Luftfahrzeugen aus dem Streunetz

Austritt einer Folgestation

Eine Folgestation verlässt ein Cluster, wenn sie außer Reichweite ist, das Signal schwächer wird oder ihr Funkgerät ausgefallen ist. Signalisiert wird der Austritt einer Folgestation entweder durch einen Net Exit Request (initiiert durch Folgestation oder Leitstation, weil das Signal schlechter wurde) oder durch ein Net Exit Completed (initiiert durch die Leitstation, weil es keine Messungen der Folgestation mehr empfangen hat). Die Folgestation entfernt den Eintrag für die Leitstation aus seiner Liste gefundener Master Aircraft. Die Leitstation entfernt die Folgestation aus ihrer lokalen Routingtabelle und Clustermitgliedliste. Optional kann ein Austritt mittels einer Verbindungsübergabe auch mit einem Netzeintritt in einen anderen Cluster verbunden sein.

Austritt einer Leitstation

Nun wird das Vorgehen bei Austritt einer Leitstation beschrieben, z. B. weil das Signal zu schlecht wurde oder weil eine Brückenleitstation vermieden werden soll. Die Leitstation sendet einen Net Exit Request an alle Folgestationen, falls dies noch möglich ist. Die Folgestationen entfernen den Eintrag für die Leitstation aus ihrer Liste gefundener Leitstationen (spätestens nach einem Timeout). Die Folgestationen melden sich bei der nächstbesten Leitstation an oder starten eine Initialsuche, falls keine Leitstation gefunden wurde.

Dieses Verfahren ist auch für den Fall vorgesehen, dass eine Leitstation unerwartet ausfällt. Eine Folgestation kann ihre Leitstation auch im Zuge einer Verbindungsübergabe wechseln, die in Abschnitt 4.4.2 beschrieben wird. Die Leitstation A wählt aus der Verbindungstabelle von B die Leitstation C mit der höchsten Gewichtung (außer sich selbst) und koordiniert den nahtlosen Übergang mit der Leitstation C. Voraussetzung hierfür ist, dass die Leitstationen in Tabellen Informationen sammeln über die Verbindungen der Folgestationen zu weiteren Leitstationen (evtl. in der Routingtabelle). Alternativ könnte die Leitstation die betroffene Folgestation auffordern selbst eine Leitstation für die Übergabe zu nennen.

Austritt einer Brückenfolgestation

Wenn möglich informiert die austretende Brückenfolgestation l_1 ihre Leitstationen l_i , $i \in \{2, 3, 4, \dots\}$ über die bevorstehende Trennung der Brückenverbindung(en). Die betroffenen Leitstationen l_i verteilen die Kommunikation auf die verbleibenden Brückenverbindungen oder müssen warten bis sich neue Brückenverbindungen bilden. Eventuell werden sie zu Brückenleitstationen, um die Verbindungen aufrecht zu erhalten. Die Brückenfolgestation trennt die betroffenen Verbindungen zum angekündigten Zeitpunkt, sofern eine Ankündigung erfolgt war.

Die Leitstationen löschen die Einträge für die ausgeschiedenen Brückenleitstationen aus der Cluster- und Routingliste. Aus der Routingliste werden auch die Luftfahrzeuge entfernt, die nur über die verlorengegangene Brückenfolgestation erreichbar waren.

Austritt einer Brückenleitstation

Da eine Brückenleitstation gleichzeitig Leitstation eines Clusters l_i und Brückenfolgestation eines anderen Clusters oder mehrerer anderen Cluster l_j , $j \neq i, j \in \aleph$ ist, sind die Prozeduren für den Austritt einer Leitstation und den Austritt einer Brückenfolgestation anzuwenden. Optional kann eine der oben beschriebenen Verbindungsübergaben erfolgen.

4.4.4 Anbindung an die Bodeninfrastruktur

Bisher wurde betrachtet, wie Luftfahrzeuge selbstorganisiert miteinander kommunizieren können. Dabei blieb die Kommunikation auf Leitluftfahrzeuge, Folgestationen und Brückenstationen beschränkt. Die Kontrollstationen am Boden blieben bisher unberücksichtigt. Um eine Kommunikation zwischen Fluglotsen und Flugbesatzungen außerhalb der normalen Reichweite zu ermöglichen, ist es wünschenswert, dass die Bodenstationen in den hier beschriebenen Ansatz integriert werden. Dies geschieht durch Brückenfolgestationen, die gleichzeitig Folgestation eines Leitluftfahrzeugs und Folgeluftfunkstelle einer Bodenstation sind. Auch hier muss die Bodenstation von der Wechselfolge der Brückenluftfunkstelle informiert sein, dies macht eine Änderung des herkömmlichen B-VHF-Systems nötig insofern, dass die Bodenstation die Wechselfolge bei der Zuteilung von FL- und RL-Paaren berücksichtigt.

Einflug in die B-VHF-Zelle einer Bodenstation

Es wird nun der Fall betrachtet, dass ein Luftfahrzeug in den Bereich einer bodengestützten B-VHF-Zelle einfliegt aber noch keine Brückenverbindung zum Bodennetz

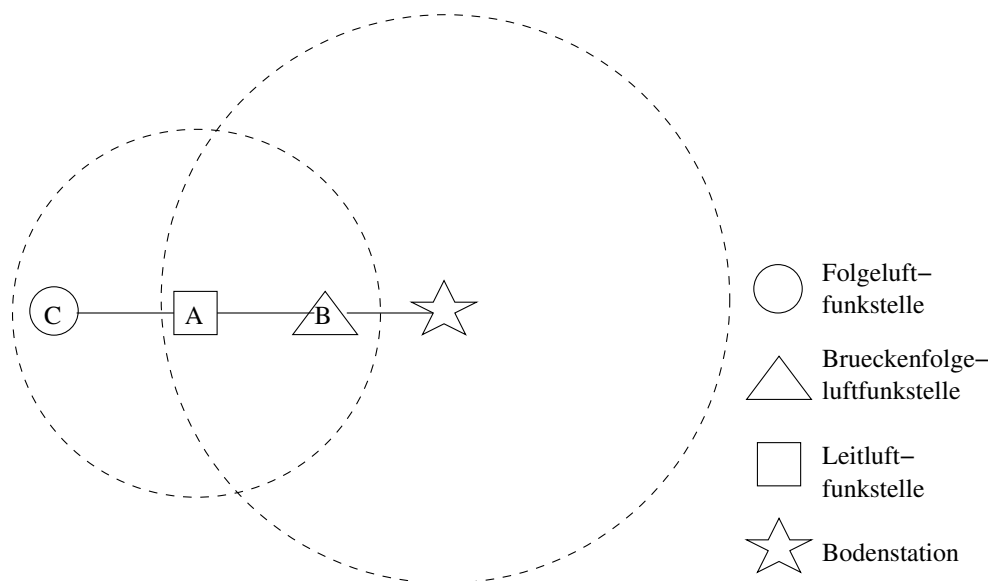


Abbildung 4.7: Leitluftfunkstelle in B-VHF-Zelle mit Bodenstation

hergestellt wurde. Das Luftfahrzeug habe noch keine Kenntnis über die Existenz einer Bodenstation. Um die Bodenstation zu finden, muss das Frequenzband auch in dem Bereich abgestastet werden, in dem die Bodenstation ihre BC-Slots ausstrahlt. Die Bodenstation kann nun eine Frequenz nutzen, auf der regelmäßig beim eingeschränkten Abtasten gelauscht wird. Dies müsste dann eine Frequenz sein, die speziell den Bodenstationen am Rand des terrestrischen B-VHF-Systems zugeordnet wären. Eine andere Möglichkeit besteht darin, dass die Luftfahrzeuge nach einigen Zyklen vom eingeschränkten Abtasten zeitweise auf komplette Abtastung umschwenken, um so auch B-VHF-Bodenstationen ausfindig zu machen. Dabei ist es unerheblich, ob ein Flugzeug bereits einem Cluster zugeordnet wurde. Je mehr Folgestationen jedoch im Streunetz existieren, desto schneller wird das Bodennetz erkundet, weil schon der erste komplette Scan einer Folgestation reicht, um die Bodenstation im Cluster und benachbarten Clustern bekannt zu machen.

Zu klären ist hier noch, wie ein Luftfahrzeug eine Leitluftfunkstelle von einer Bodenstation unterscheiden kann, wenn dies anhand der Kennung oder durch einen Vergleich mit der Datenbank nicht bereits möglich. Dies ist einmal mit Hilfe der Dienste möglich, die jeweils angeboten werden. Eine Bodenstation wird wesentlich mehr Dienste anbieten können als eine Leitstation. Sofern es einen Dienst gibt, den nur eine Bodenstation anbietet, ergibt sich daraus ein eindeutiges Identifizierungsmerkmal. Ist ein solches nicht gegeben, kann zum anderen die Flugbesatzung manuell den Modus der B-VHF-Einheit von selbstorganisierend (Bord-Bord-Modus) auf terrestrisch (Bord-Boden-Modus) umstellen. Sonst kann hier wieder der selbstorganisierende Ansatz greifen, insofern dass die Folgestationen selbständig auf die Bodenstation umschwenken, sobald diese die beste Signalqualität (bzw. das Clusterkriterium) bietet. Daraufhin kann der Fluglotse, falls gewünscht, Verbindungsübergaben für jedes Luftfahrzeug einleiten, das sich über Brückenverbindungen erreichen lässt.

Ein Leitluftfahrzeug, das nach einer dieser Methoden keine Folgestationen mehr hat, meldet sich nach dem Start der Initialsuche bei der Bodenstation an. Solange aber noch Folgestationen angemeldet sind, verbleibt es im Leit-Status, so dass Folge-

stationen, die sich zwar in Reichweite des Leitluftfahrzeugs aber nicht in Reichweite der Bodenstation befinden, weiterhin verbunden bleiben. Aufgrund der Mobilität der Flugzeuge wird sich die Leitstation an der Bodenstation anmelden, sobald entweder alle bisherigen Folgestationen nun bei der Bodenstation angemeldet sind oder sich außer Reichweite der Leitstation befinden. Brückenfolgestationen zwischen Clustern und Bodenstation werden zu Folgestationen der Bodenstation, sobald sie nicht mehr benötigt werden (siehe oben).

Sobald ein Cluster über Brückenstationen mit einer Bodenstation verbunden ist, propagiert die Leitstation des Clusters die Kennung der Bodenstation in der Liste benachbarter Stationen, so dass der Kanal der Bodenstation in die eingeschränkte Abtastung der Folgestationen aufgenommen wird, wodurch das Umschwenken der Folgestationen auf die Bodenstation beschleunigt wird. Optional kann dem Fluglotsen die Möglichkeit gegeben werden, manuell die nahtlose Verbindungsübergabe von einer Leitstation auf die Bodenstation einzuleiten.

Ausflug aus der B-VHF-Zelle einer Bodenstation

Nun sei ein Luftfahrzeug bei einer Bodenstation registriert und im Begriff die Reichweite des terrestrischen B-VHF-Systems zu verlassen. Das Luftfahrzeug wird das schwächer werdende Signal der Bodenstation messen und mit anderen Messungen vergleichen, sofern vorhanden. Das Flugzeug wird sich bei der Kontrollstation mit dem besten verfügbaren Signal anmelden, das eine Bodenstation oder ein Leitluftfahrzeug sein kann. Um die Entdeckung von Leitstationen zu beschleunigen, kann bereits die Bodenstation die bekannten Leitstationen in der Liste benachbarter Kontrollstationen bekannt geben. Eine Bodenstation am Rande des terrestrischen B-VHF-Systems kann aber auch das gesamte für die Bord-Bord-Kommunikation vorgesehene Spektrum in dieser Liste ausstrahlen, so dass die Luftfahrzeuge schneller Leitstation entdecken können und automatisiert in den Bord-Bord-Modus überführt werden. Nahtlose Verbindungsübergaben können über Brückenverbindungen abgewickelt werden.

Wird das Luftfahrzeug nicht auf den Wechsel in den selbstorganisierten Modus durch die Kontrollstation vorbereitet, erfolgt der Wechsel entweder manuell durch die Flugbesatzung (sofern vorhanden) oder durch eine Initialsuche mit Scan des kompletten B-VHF-Spektrums. Anschließend wird entweder eine Leitstation gefunden oder das Flugzeug wird selbst zur Leitstation. In beiden Fällen erfolgt ein erzwungener Wechsel in den Bord-Bord-Modus. Hier ist die Entstehung von Brückenstationen möglich, wenn die Brückenstation noch in Reichweite der Bodenstation ist und bereits mindestens ein Leitluftfahrzeug entdeckt hat, das die Brückenkriterien hinreichend erfüllt.

4.4.5 Betrachtung weiterer Problemfälle

Der bisher dargestellte Ansatz bringt einige Probleme mit sich, die daraus resultieren, dass zwei Leitstationen nie direkt miteinander kommunizieren können. Dies macht Brückenleitstationen nötig, die negative Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit der Kommunikation im Streunetz haben, und eine Behandlung der Fälle, wenn sich zwei Leitstationen näher kommen. Es muss sichergestellt werden, dass sich die Leitstationen finden und sich nicht gegenseitig stören. Dieser Abschnitt beschreibt mögliche Lösungen für diese Probleme.

Auflösung von Brückenleitstationen

Brückenleitstationen sind abwechselnd Brückenfolgestationen oder Leitstationen. Dies bedeutet einen Verlust an Ressourcen innerhalb des Clusters, in dem das Luftfahrzeug die Leitluftfunkstelle spielt. Daher sind Brückenleitstationen möglichst zu vermeiden. Sie sind jedoch nötig,

- (a) wenn keine Folgestation sich in Reichweite zweier Leitstationen befindet, so dass sich die Leitstationen nicht gegenseitig entdecken können (s. Abbildung 4.8 (a)), bzw.
- (b) wenn eine Folgestation nicht ins Streunetz aufgenommen würde, weil keine andere Leitstation sich in ihrer Reichweite befindet (s. Abbildung 4.8 (b)).

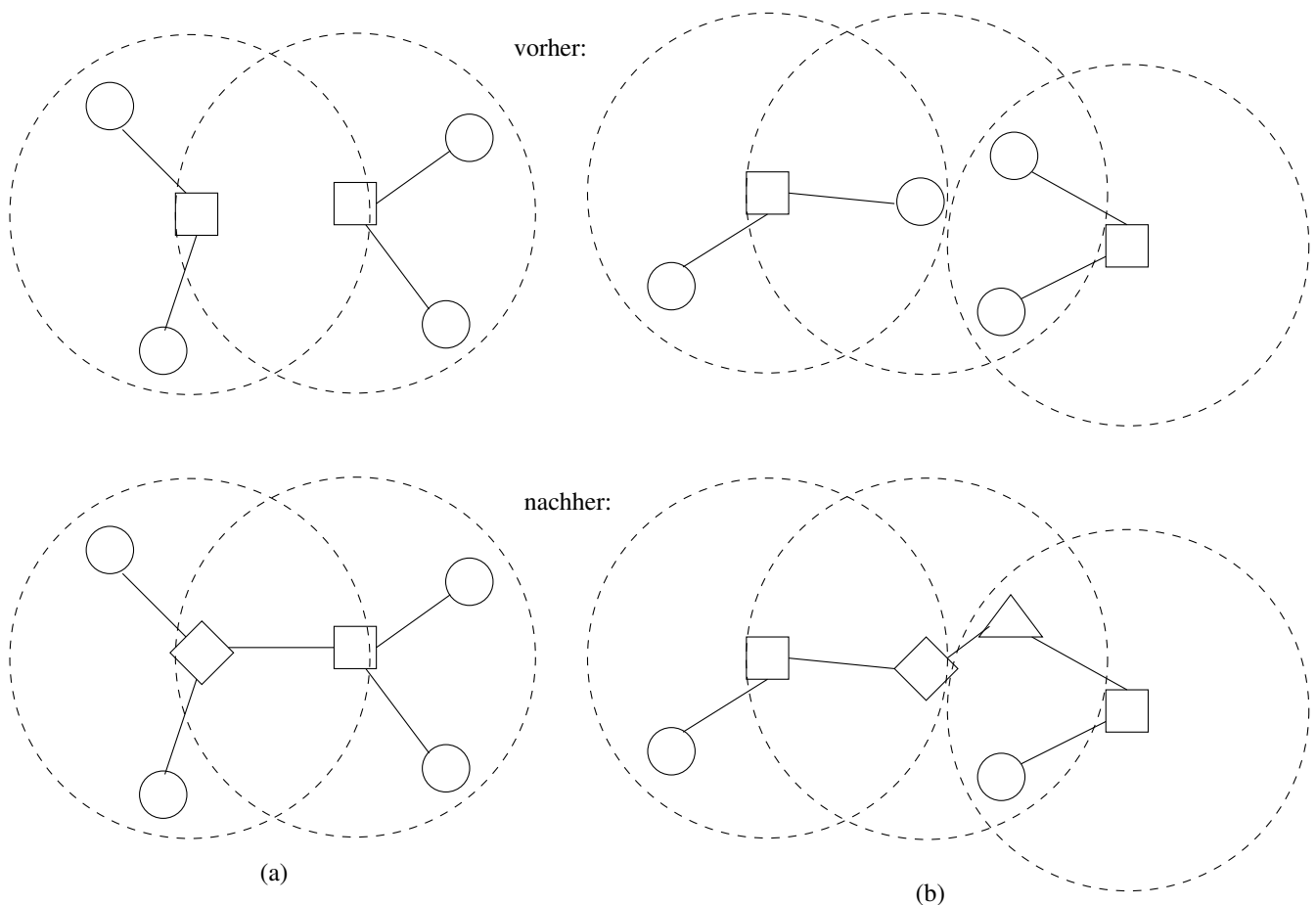


Abbildung 4.8: Fälle, in denen eine Brückenleitstation nötig ist

Aufgrund der Mobilität der Luftfahrzeuge kann aber davon ausgegangen werden, dass sich dieser Zustand nach einer Weile verbessert. Es ist aber auch möglich, Brückenleitstationen aufzulösen, in dem die andere Leitstation in den unclustered-Zustand wechselt, so dass die Folgestationen die Initialsuche starten und mit der Wahrscheinlichkeit $(n - 1) \cdot p_L$ eine der übrigen Folgestationen zur Leitstation wird (n ist Anzahl der Luftfahrzeuge). Bei dieser Lösung ist jedoch keine koordinierte Verbindungsübergabe möglich. Das lässt sich ändern, in dem die aufgebende Leitstation die Folgestationen über ihre Absicht informiert und die Übergabe vorbereitet (siehe Handover-Abschnitt 4.4.2).

Annäherung zweier Leitstationen

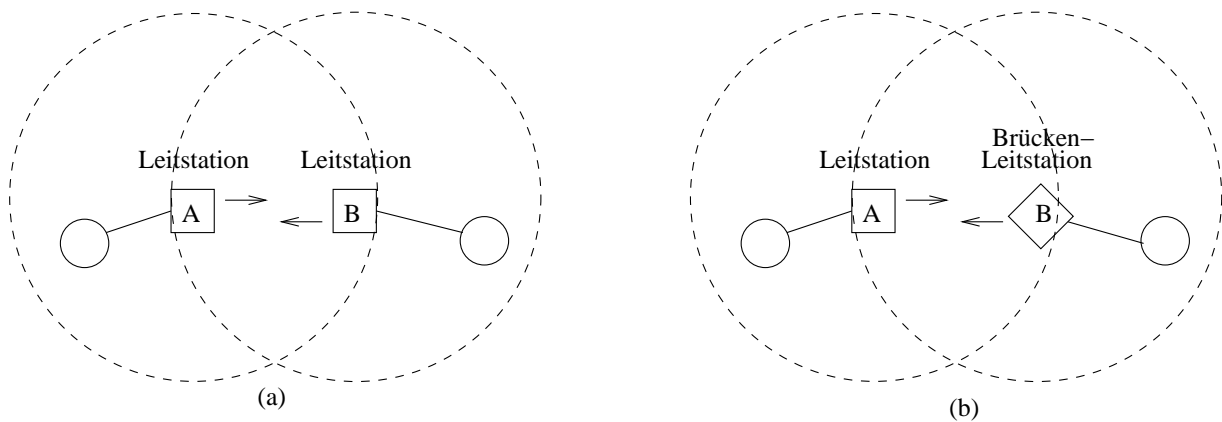


Abbildung 4.9: (a) A und B können sich nicht sehen (blind), (b) B wechselt in den Brückenleit-Status und meldet sich bei A an

Nähern sich zwei Leitstationen, ohne dass eine ihrer Folgestationen die andere Leitstation in Reichweite haben, so sind diese Leitstationen für einander taub, weil sie zum gleichen Zeitpunkt senden oder empfangen. Um dieses Problem zu lösen, wechseln Leitstationen in (un-)regelmäßigen Abständen sporadisch (mit Wahrscheinlichkeit p_{BL}) in den Zustand einer Brückenleitstation. Als Brückenleitstation kann es den Rundruf der anderen Leitluftfunkstelle empfangen, mit ihr kommunizieren und sie für die folgende Netzoptimierung in einer Liste vermerken. Das Optimum für den Parameter p_{BL} müsste mittels Analyse oder Simulation ermittelt werden. Aus Zeitgründen muss in dieser Arbeit hierauf verzichtet werden.

Eine Lösungsalternative wäre die Verwendung eines geometrisches Hash-Verfahrens, das getrennte Kanäle garantiert. Dieser Ansatz wird hier nicht weiter verfolgt.

Kollision durch Rundrufe auf gleichen Kanälen

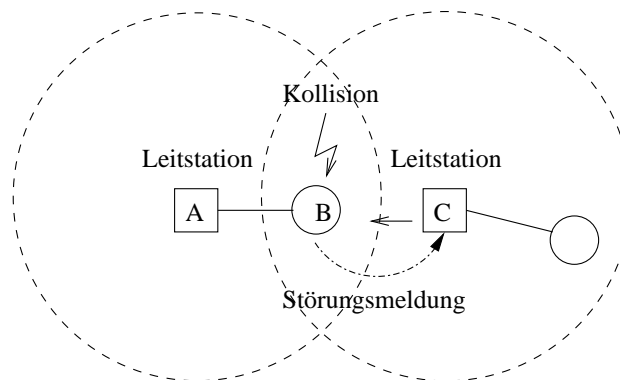


Abbildung 4.10: Kollision zweier Rundrufe auf gleichem Kanal

Tritt eine Leitstation in ein Cluster ein, das bereits den gleichen Kanal verwendet, können einige Folgestationen den BC-Slot nicht mehr korrekt empfangen. Wenn ihre Leitstation nicht in den Brückenleit-Status übergegangen ist, kann die Folgestation davon ausgehen, dass der korrekte Empfang wegen Überlagerung mehrerer Signale gestört ist. Die Folgestation B sendet daher eine „Störungsmeldung“ an den RACH auf dem Kanal, der als gestört angenommen wird. Die Leitstation C, die den Sender

der Störungsmeldung bisher nicht kannte, ändert ihren Kanal nach der Benachrichtigung ihrer Folgestationen. Die Leitstationen, denen die Folgestation B bereits bekannt ist, behalten ihre Frequenzen bei. Falls diese Kollisionsauflösung nicht hilft, verlieren die gestörte und die störende Leitstation einen Teil ihrer Folgestationen, die den in 4.3.2 beschriebenen Suchvorgang starten.

4.4.6 Koordinierende Kooperation zwischen Leitstationen

Die Koordinierung zwischen Leitstationen bedeutet eine Gradwanderung zwischen Selbstorganisation, Stabilität und Reduzierung des Overheads. Einmal sollte der Kommunikationsaufwand zur Clusterverwaltung möglichst gering gehalten werden, zum anderen ist insbesondere in der Luftfahrt die Stabilität und Verfügbarkeit von Verbindungen wichtig. Die Selbstorganisation der Luftfunkstellen stößt an ihre Grenzen wo die Stabilität gefährdet ist. Dies ist z. B. dann der Fall, wenn eine Folgestation in die Reichweite zweier Leitstationen gelangt, die beide den gleichen Kanal für ihre BC-Slots verwenden (\rightarrow Störungsmeldung). Daher kann eine koordinierende Kooperation der Leitstationen in Betracht gezogen werden.

4.5 Routing

Für das Routing in der selbstorganisierenden Bord-Bord-Kommunikation wird der Vorschlag von Mauve [MaWH01] eines 3-Schichten-hierarchischen Routings aufgegriffen:

0. Intra-Cluster: nur MAC-Ebene
1. lokal: proaktiv (2-Cluster-Reichweite)
2. regional: positionsunterstützt mit QoS-Unterstützung für Skalierbarkeit
3. global: reaktiv

4.5.1 Lokales Routing

Proaktive Routingprotokolle empfehlen sich vor allem in hochmobilen Netzen wie sie in der Luftfahrt üblich sind, da sich die Standorte sehr schnell ändern und häufig aktualisiert werden müssen.

Lokales Routing-Wissen ist für das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept nur in den Leitstationen und Brückenstationen notwendig. Die Folgestationen senden ihre Pakete generell an die Leitstation. Um geeignete Routen zu finden, unterrichten die Brückenstationen die mit ihnen verbundenen Leitstationen über die Erreichbarkeit der anderen Leitstationen (und eventuell derer Folgestationen). Das lokale Routing hat eine Reichweite von zwei Clustern, das sich über den eigenen und jeden direkt benachbarten Cluster erstreckt.

Folgende Anpassungen des Terminode Routings [BIBG05] wären nötig:

ICAO Aircraft ID als permanente eindeutige Systemkennnummer (EUI), ortsabhängige Adresse (LDA) mit geographische Länge, Breite und Höhe erweitert um Vektor (Geschwindigkeit und Richtung).

Für das Routing könnten auch Informationen verwendet werden, die leicht aus dem FMS oder ADS-B gewonnen werden können:

- aktuelle Position (Zeitstempel)
- Vektor (Geschwindigkeit und Richtungswinkel)
- Beschleunigung/Verzögerung
- (Geplante) Richtungswechsel/Wegpunkte (mit ETO)

Terminode Local Routing (TLR): Sobald vermutet werden kann, dass der Empfänger lokal zu erreichen ist, wird das TLR-Bit auf '1' gesetzt. Der Knoten wählt den 1-hop-Nachbarn zum Ziel mit dem aktuellsten Eintrag. Das Ziel sollte spätestens nach zwei Hops erreicht werden, sonst wird das Paket verworfen, um die Zyklolenfreiheit zu garantieren. Nach TLR darf kein erneutes TRR erfolgen. Im hier beschriebenen Konzept sollten nur die Leitstationen als Hops in TLR betrachtet werden.

4.5.2 Positionsunterstütztes Geo-Routing

Perimeter- und Ankerverfahren

Das *Terminode Remote Routing* (TRR) verbindet weit entfernte TLR-Zonen. Das TRR Bit wird gesetzt, wenn ein Empfänger nicht TLR-erreichbar ist.

Terminode Remote Routing kann bietet zwei Routingverfahren an:

1. *Geodesic Packet Forwarding* (GPF) mit *Perimeter Forwarding*: Routing um den Umkreis eines Knotens. Ein Paket wird niemals in derselben Richtung über dieselbe Verbindung gesendet.
2. *Anchored Geodesic Packet Forwarding* (AGPF) funktioniert positionsbasiert bedarfsgesteuert. Die Wegwahl berücksichtigt nur die aktuelle Position (LDA) eines Terminodes. Der Pfad wird mit der Hilfe von Ankern ermittelt.

Friend Assisted Path Discovery (FAPD) Pfaderkundung mit Unterstützung der Freunde und Freundesfreunde mittels *Friends Management* (FM).

Bewegungsvorhersage mit begrenztem Fluten

Restricted Local Flooding setzt auf gezielte Flutung im lokalen Bereich beim Wechsel von TRR zu TLR als Strategie bei hoher Mobilität oder leichter Alterung des LDA-Eintrags. Hier lässt sich auch das Prinzip von [ShNa02] anknüpfen, wo die zukünftigen Ortsangaben vorweg berechnet werden für den Zeitpunkt t_f an dem das Paket sein Ziel erreichen sollte. PLBQR arbeitet mit einer Vorhersage der Ortsangabe sowie der Ausbreitungsverzögerung. PLBQR berechnet aus einer Update-Nachricht, die die Richtung des Knotens enthält, die zukünftige Position (x_f, y_f) . Anschließend wird in der erwarteten Region RLF ausgeführt.

$$x_e = x + v(t_e - t) \cdot \cos \theta \quad (4.2)$$

$$y_e = y + v(t_e - t) \cdot \sin \theta \quad (4.3)$$

Wenn die Richtung nicht bekannt ist, kann die Position aus dem Vergleich zweier Update-Nachrichten aufeinander folgender Zeitpunkte gewonnen werden.

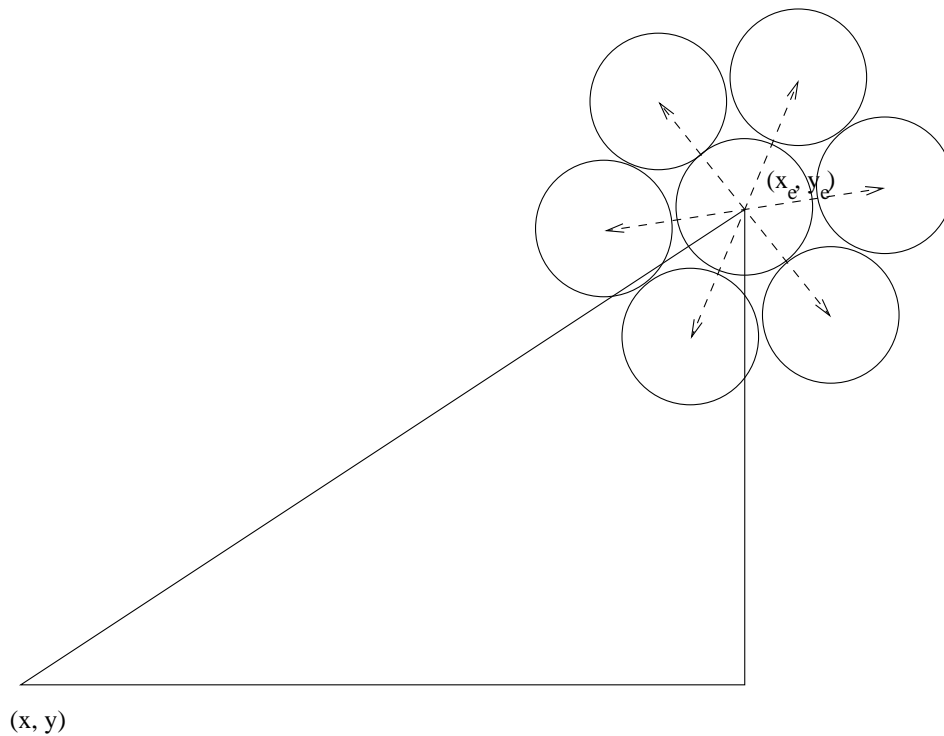


Abbildung 4.11: Restricted Local Flooding

$$x_f = x_2 + \frac{v(t_f - t_1)(x_2 - x_1)}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (4.4)$$

$$y_f = y_1 + \frac{(x_f - x_1)(y_2 - y_1)}{x_2 - x_1} \quad (4.5)$$

Für das Mobilitätsmanagement wird hier auf die Lokationsdienste in Abschnitt 2.2.4 verwiesen. Wird der LDA-Eintrag älter, markiere ihn mit RLF (Restricted Local Flooding). Bei Veraltung wird der LDA-Eintrag gelöscht. Da die Flugzeuge andere Flugzeuge über ihre Bewegungsvektoren informieren, kann hier die Vorwegnahme der Ortsangabe durch Vorhersage des LDA-Eintrags analog zu [ShNa02] erfolgen.

QoS

Die Positionsvorhersage erleichtert die Sicherstellung der Dienstgüte. Sie reicht aber nicht aus, um gewisse Dienstgüteklassen zu garantieren. Hier ist weitere Arbeit erforderlich.

4.5.3 Globales Routing

Das globale Routing erfolgt unter Zuhilfenahme der Bodeninfrastruktur zur Positionsbestimmung von Luftfahrzeugen in anderen Regionen (z. B. über Kontinente hinweg). Hier ist ein reaktives Wegewahlverfahren empfehlenswert, aber nicht weiter Fokus dieser Arbeit.

4.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde ein selbstorganisierender Ansatz beschrieben, in dem einzelne Luftfahrzeuge einen hohen Grad an eigenständigen Entscheidungen besitzen. Cluster können mittels Brückenstationen innerhalb eines Streunetzes miteinander kommunizieren. Dieses passt sich dynamisch an Veränderungen in den Clustern aufgrund der Mobilität an. Ebenso wurden eine Anbindung an die Dienste der Bodeninfrastruktur und eine geeignete Kombination von Routingverfahren vorgestellt.

5. Implementierung

Das im vorigen Kapitel vorgestellte Konzept wurde in Teilen implementiert und in eine ereignisorientierte Simulationsumgebung eingefügt. Der Schwerpunkt lag hierbei auf Realisierung des Clusteringalgorithmus und den Auswahlkriterien.

5.1 Simulationsumgebung

Als Simulationsumgebung wurde das Mobility Framework 2 in OMNeT++ ausgewählt. OMNeT++ ist eine komponentenbasierte und modulare Simulationsumgebung zur Simulierung von Kommunikationsnetzen. Ihr Quellcode ist öffentlich und ihre Architektur offen. Das Mobility Framework (MF) ist ein Modul für OMNeT++ und unterstützt Simulationen drahtloser und mobiler Netze. Es ist die bevorzugte Plattform für Simulationen mobiler und Ad-hoc-Netze in OMNeT++.

Das Kernrahmenwerk implementiert die Unterstützung von Knotenmobilität, dynamischem Verbindungsmanagement und drahtlosem Kanalmodell. Zusätzlich liefert es Basismodule, auf die bei der Implementierung eigener Module zurückgegriffen werden kann. Daher wurde diese Simulationsumgebung für die Erstellung dieser Arbeit ausgewählt. Mit diesem Konzept kann der Programmierer eigene Protokolle implementieren ohne sich um notwendige Schnittstellen oder Interoperabilität zu kümmern.

5.2 Verwendete Bewegungsmodelle

Bei der Auswahl eines Bewegungsmodells ist es wichtig, dass keine Bewegungspausen vorkommen, da Starrflügelflugzeuge (im Gegensatz zu Drehflüglern) nicht in der Luft stehen bleiben können.

Laut [CaBD02a] wird die gemessene Systemleistung vom zugrunde gelegten Mobilitätsmodell erheblich beeinflusst. So erhöht die Integration von Intra-Gruppen-Kommunikation die Leistung in jedem Mobilitätsmodell. Durch seine Natur erreicht das Random Direction Model die mit die geringsten Leistungen. Das legt den Schluss nahe, dass bei unterschiedlichen Mobilitätsmodellen verschiedene Kommunikationsprotokolle nicht unmittelbar vergleichbar sind. Am realistischsten wäre eine Aufzeichnung des tatsächlichen Flugverkehrs. In Ermangelung einer solchen, werden

hier Bewegungsmodelle verwendet, die den Bewegungen in der Reiseflugphase am nächsten kommen.

5.2.1 LinearAirMobilityModel

Diesem Anspruch wird das im Mobility Framework 2 der Simulationsumgebung OM-NeT++ mitgelieferten Linear Mobility Model am ehesten gerecht. In diesem Modell bewegen sich die Knoten mit einem konstanten Winkel. Die Bewegungsgeschwindigkeit kann durch einen Beschleunigungsfaktor variiert werden. Darauf wurde hier jedoch verzichtet. Bei Erreichen der Kanten des Bewegungsfelds, „springen“ die Knoten auf die gegenüberliegende Seite des Felds und bewegen sich mit derselben Bewegungsrichtung weiter. Dies induziert Verbindungsabbrüche, die nicht durch das Clusterverfahren bedingt sind. Das Modell eignet sich daher nicht zur Messung der Clusterkonstanz, aber zur Ermittlung der durchschnittlich benötigten Zeit bis ein Luftfahrzeug mit einem anderen kommunizieren kann. Dieses Modell ähnelt sehr dem Random Direction Mobility Model, welches sich durch seine statistische Gleichverteilung auszeichnet [Cram03].

In einer hier neu eingeführten Variation dieses Modells für ozeanische Bewegung wird der Bewegungswinkel so eingeschränkt, dass die Luftfahrzeuge von der Links-Rechts-Bewegung (oder umgekehrt) maximal um 10° abweichen (s. Abbildung 5.1). Dieser Wert wird der Funktion `crossAngle` übergeben, die den Bewegungswinkel zurückliefert. Den Bewegungen über den Polarkappen entspricht das lineare Bewegungsmodell mit Bewegungswinkeln, die gleichverteilt aus $[0, 2\pi)$ sind (s. Abbildung 5.2). In der Simulationsumgebung wird dies polare Mobilität genannt. Auch hier sei die Bewegungsgeschwindigkeit konstant. Die für die Implementierung leicht veränderte Version wird als `LinearAirMobilityModel` bezeichnet.

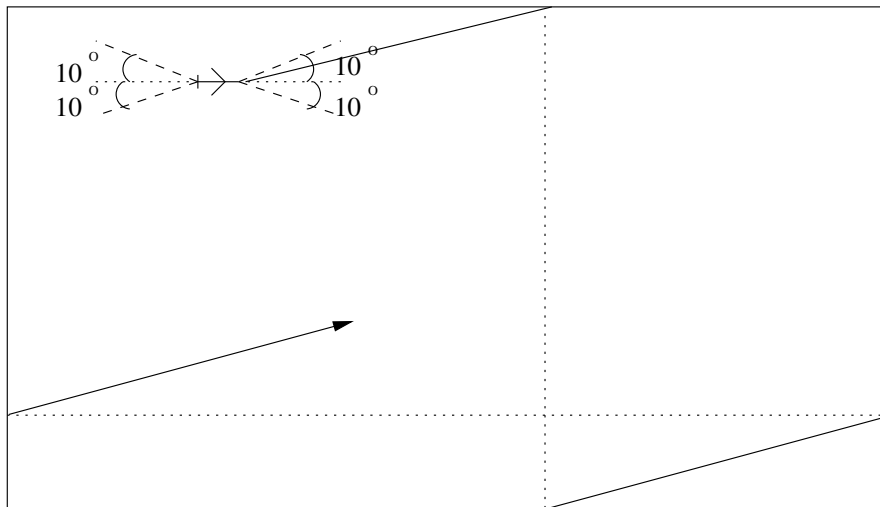


Abbildung 5.1: Ozeanische Bewegung im LinearAirMobilityModel

```
double crossAngle(double a, double b) {
    return ( 360 + intrand(2) * 180 + uniform(-a, a, (int)b) );
}
```

```
Define_Function(crossAngle, 2);
```

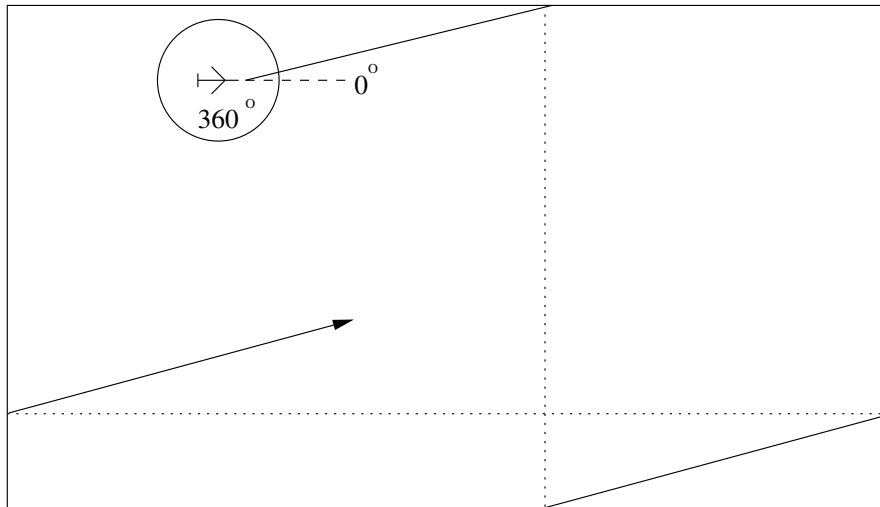


Abbildung 5.2: Polare Bewegung im LinearAirMobilityModel

5.2.2 ConstAirSpeedMobility

ConstAirSpeedMobility (s. Abbildung 5.3) ähnelt dem Random Waypoint Mobility Modell. Es unterscheidet sich nur darin, die Knoten dabei immer in Bewegung bleiben und keine Bewegungspausen einlegen. Wie der Name von ConstAirSpeedMobility schon nahe legt, ändern die Knoten ihre Geschwindigkeit im Laufe der Simulation nicht, den Knoten kann jedoch eine individuelle Zufallsgeschwindigkeit zugeordnet werden. Dieses Modell wird hier zur Simulation sich ändernder Bewegungsrichtung verwendet. Die Knoten überschreiten nie die Kanten des Simulationsfelds. Hierdurch kann die dynamische Anpassungsfähigkeit des Clusteralgorithmus bei sich ändernder Bewegung getestet werden. In der Realität entspricht dies Flügen über Land, beispielsweise über entlegenen Regionen.

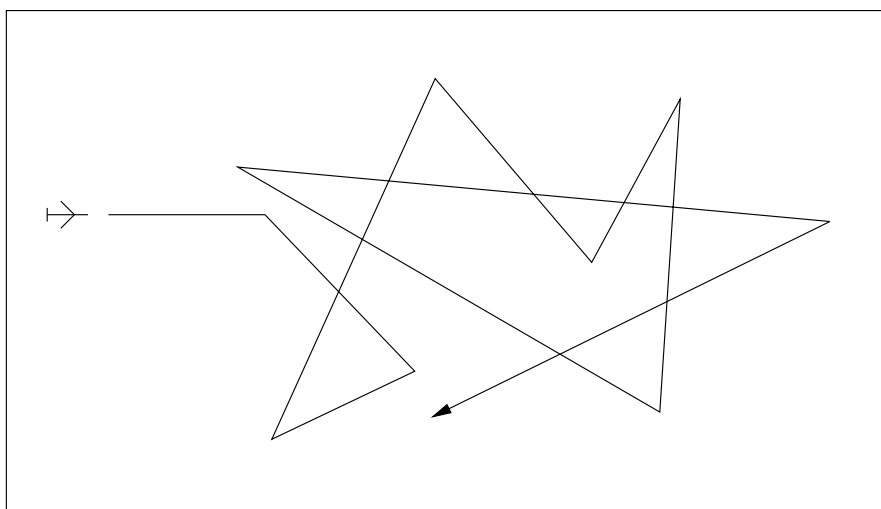


Abbildung 5.3: Random Waypoint Mobility in ConstAirSpeedMobility

ConstAirSpeedMobility ist gegenüber dem von OMNeT++ mitgelieferten ConstAirSpeedMobility nur leicht modifiziert worden, so dass es statistische Daten für die Evaluation ausgibt.

5.3 Datenstrukturen

Eigene Datenstrukturen wurden für selbstdefinierte Pakete und Listen eingeführt und Vergleiche möglich gemacht.

5.3.1 Pakete

Die Standard-Klasse für MAC-Pakete wurde im `ClusterMacPkt` um Felder erweitert, um Daten zu übertragen, die in diesem Konzept auch in der Sicherungsschicht verwendet werden. Das MAC-Protokoll muss wissen, auf welchem Kanal es mit welchem Master Aircraft kommunizieren kann, welche Signalstärke (RSSI) und Clustergüte (SQUC) gemessen wurde sowie Anzahl und Kennung benachbarter Kontrollstationen. Die letztgenannte Information wird in dieser Implementierung jedoch nicht berücksichtigt, da aus Zeitgründen auf die Auswahl und Verwendung von Brückenstationen verzichtet werden musste.

```
class MacPkt
  message ClusterMacPkt extends MacPkt {
  fields:
    int channelId; // Kanalkennung
    double rssi; // Signalqualität
    double squc; // Cluster-Güte
    int adjacent []; // Benachbarte Kontrollstationen
  }
```

5.3.2 Listen

In der Implementierung führt jedes Luftfahrzeug drei Listen. In der Liste `clusterList` pflegt jede Leitstation die Mitglieder seines Clusters. In der zweiten Liste (`masterList`) speichert eine Folgestation jede gefundene und verfügbare Leitstation zusammen mit dem Clusterkriterium ab. Die dritte Liste heißt `registerList` und ist eine Untermenge der zweiten Liste. Sie enthält die Menge der Leitstationen, bei denen sich die Folgestation eingebucht hat.

Diese drei Listen sind C++-Vektoren (in der Standard Template Library) aus Strukturen des Typs `aircraftListEntry`. Diese Struktur speichert die eindeutige MAC-Adresse, die gemessene Signalgüte, die Cluster-Güte (SQUC), den verwendeten Kanal und die mitgeführte Zyklusnummer.

```
struct aircraftListEntry {
  int nicId; // eindeutige Kennung
  double rssi; // Received Signal Strength Indication
  double squc; // Cluster-Güte
  int channelId; // auf welchem Kanal ist zu antworten
  int cycleNumber; // Zyklusnummer
};
```

```
std::vector<aircraftListEntry*> masterList;
std::vector<aircraftListEntry*> registerList;
std::vector<aircraftListEntry*> clusterList;
```



```

        return (m->cycleNumber < cycle);
    }
};

```

5.4 Ablaufplanung und Timer

Wie bereits erwähnt wurde die Clustering-Simulation ereignisorientiert implementiert. Um das TDMA-Verfahren nachzubilden, werden Taktgeber verwendet. Die Flugzeuge senden nur, wenn ein Timer (siehe unten) abgelaufen ist. Zu diesem Zeitpunkt wird das Paket erzeugt, die Funk-Einheit auf Senden eingestellt und das Paket versandt. Zu den restlichen Zeiten sind alle Flugzeuge der Einfachheit halber auf Empfangen eingestellt, so dass für den Empfang verschickter Pakete keine weiteren Timer nötig sind. Diese Lösung wurde gewählt, um den Aufwand der Simulation gering zu halten. Es wäre ohne weiteres möglich gewesen, für den Empfang dieselben Timer wie für das Senden zu verwenden. Da durch das Empfangen aber bereits zeitgleich Aktionen des Empfängers ausgelöst werden können, wurde diese Lösung als ausreichend befunden. Diese Timer sind:

COMPLETE_SCAN_TIMER

Dieser Taktgeber wird jedesmal ausgeführt, wenn das komplette vorgegebene Frequenzband einmal abgetastet wurde. Der Abstand zweier Timer ist abhängig von der Länge eines Superrahmens (`sfDuration`) und der Anzahl der abzutastenden Kanäle (`numberOfChannels`).

```
scheduleAt( simTime() + numberOfChannels * sfDuration/1000, completeScanTimer)
```

Bei Erreichen eines Timers wird der nächste Taktgeber geplant. Der erste Timer wird zu Simulationsbeginn ($t = 0$) in der Initialisierung geplant. Dies geschieht in den Prozeduren `scheduleNextScanCompleted()` bzw. `scheduleFirstScanCompleted()`.

Hier erfolgen die Entscheidungen, ob sich ein Luftfahrzeug mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit p_L zum Master Aircraft erklären soll, oder nach welcher zufällig gewählten Backoff-Zeit t_b ein Master Aircraft ohne angemeldete Clustermittglieder seinen Status aufgeben soll (s. Abbildung 5.6).

BROADCAST_TIMER

Dieser Timer bestimmt den Zeitpunkt eines Rundrufs (Broadcast Message) eines Master Aircraft. Nur Master Aircraft setzen diesen Zeitgeber, da die Folgestationen auf den Empfang des Broadcast-Pakets reagieren. Da eine Folgestation wegen der Hintergrundabtastung in jedem Zeitschlitz eines Broadcasts auf einen anderen Kanal eingestellt ist, kann sie nur während eines kompletten Abtastvorgangs nur einen Broadcast je Leitstation empfangen. In der Implementierung mit nur einem Kanal wurde dies insofern berücksichtigt, dass Master Aircraft nur einmal je kompletten Scan einen Broadcast senden. Daher reicht es, den Broadcast_Timer bei jedem Erreichen des Complete_Scan_Timers zeitlich festzulegen: `simtime_t nextBcTime = simTime()+(double)numberOfChannels*sfDuration/1000`

Der allererste Takt wird gesetzt, sobald ein Luftfahrzeug sich zur Leitstation erklärt: `simtime_t firstBcTime = simTime()+ sfDuration/1000 * channel`. Verantwortlich hierfür zeichnen sich die Prozeduren `scheduleNextBcSlot()` bzw. `scheduleFirstBcSlot()`.

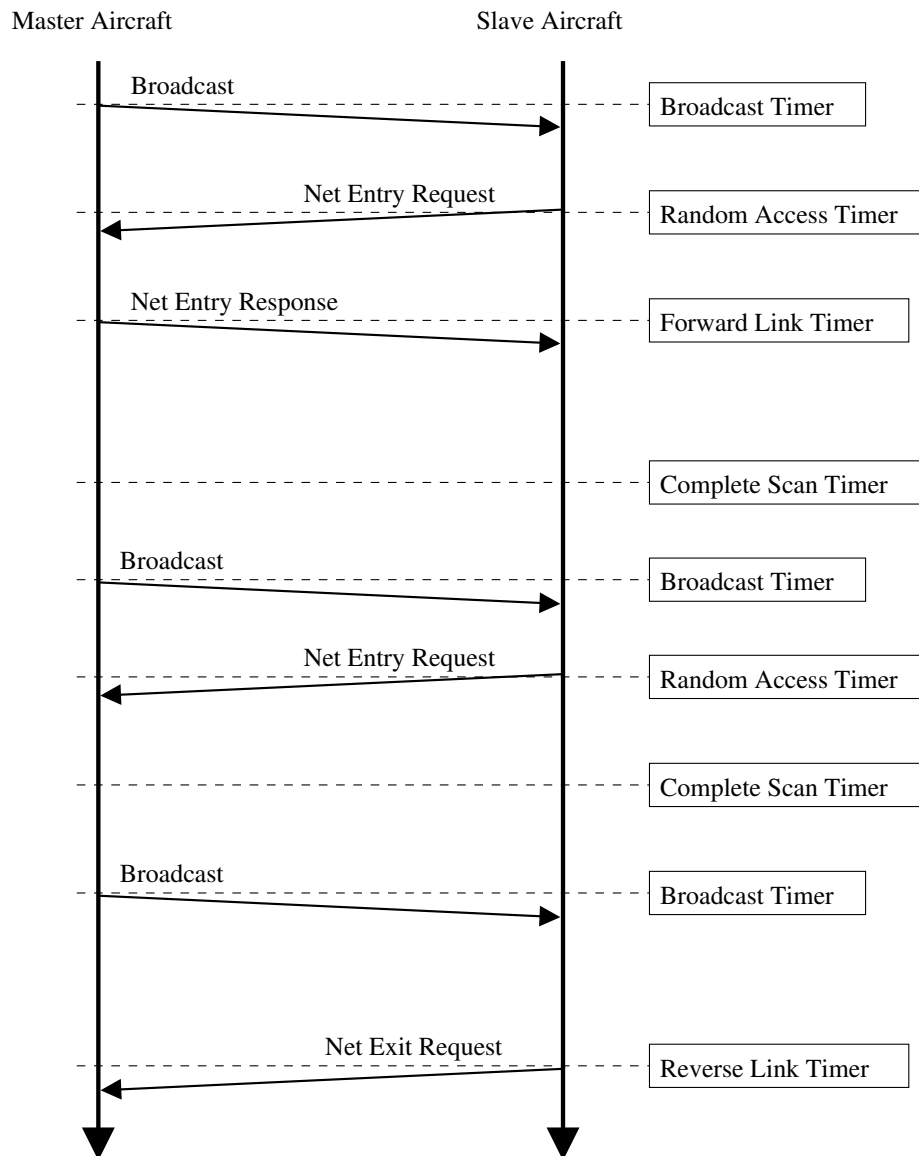


Abbildung 5.4: Taktgeber und Nachrichtenablauf

RANDOM_ACCESS_TIMER

Den Random Access Timer setzen Folgestationen, die eine „Net Entry Request“-Nachricht an ihr Master Aircraft absetzen wollen. Abweichend vom Entwurf geschieht dies in dieser Implementierung nach jedem Empfang einer Broadcast-Nachricht. Das heißt diese Nachricht wird periodisch auf Antwort auf jeden Broadcast versandt, auch wenn das Flugzeug sich bereits im Cluster angemeldet hat. Dies dient der Bestätigung, dass beide Luftfahrzeuge noch in Reichweite sind. Dieses Vorgehen ist nötig, da in dieser Implementierung sonst keine Pakete mit Regelmäßigkeit ausgetauscht werden. Dies wäre im Gesamtwerk mit dem Austausch der Nutz- und Kontrolldaten der Fall, die hier nicht nachgebildet wurden. Der Takt für Random Access wird bei Erreichen des Broadcast_Timers festgelegt. Damit es nicht zu Signalüberlagerungen kommt, wird die (eindeutige) Kennung (`myMacAddr` bzw. `src`) zur Berechnung des Versatzes herangezogen: `scheduleAt(simTime() + (FW-Math::mod(myMacAddr*3/10, sfDuration)/1000), raSlotTimer)`

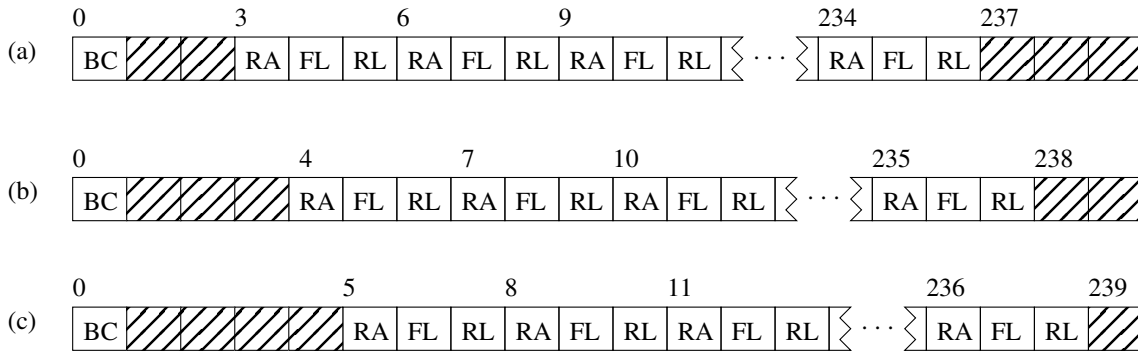


Abbildung 5.5: Simulierte Verteilung der Zeitschlitz im Superrahmen. (a) $nicId \cdot \frac{3}{10} \bmod 240 \equiv 0$, (b) $nicId \cdot \frac{3}{10} \bmod 240 \equiv 1$, (c) $nicId \cdot \frac{3}{10} \bmod 240 \equiv 2$

Zu beachten ist hierbei jedoch, dass aufgrund des gemeinsam genutzten Kanals aller Cluster die Überlagerungsfreiheit nur für maximal 78 Funkstationen garantiert ist¹. Bei getrennten Kanälen könnte sie in dieser Implementierung um die Zahl der verfügbaren Kanäle vervielfacht werden. Bei 20 Kanälen würde dies eine Kapazität für 1 560 Stationen ergeben. Weiterhin ist darauf hinzuweisen, dass abweichend vom Konzept die Reihenfolge der Slots geändert wurde. Dies diente der Vereinfachung, da somit auf die Verteilung auf die verschiedenen Unterträger verzichtet werden konnte, die mit der bestehenden Simulationsumgebung (`SingleChannelRadio`) mit großem Aufwand realisierbar gewesen wäre. Dieser Timer wird in `sendNetEntryRequest` gesetzt.

FORWARD_LINK_TIMER

Bei Erreichen des Forward Link Timers sendet das Master Aircraft der neuen Folgestation seine Antwort auf eine `Net_Entry_Request`-Nachricht. Diese Antwort kann eine `Net_Entry_Response`- oder eine `Net_Entry_Reject`-Nachricht sein. Die erstgenannte quittiert eine Netzeintrittsanfrage positiv, die andere lehnt den Eintritt in das Cluster ab, weil das Cluster bereits seine Maximalgröße (`maxClusterSize`) erreicht hat. Der Timer wird in der Prozedur `sendNetEntryResponse` bzw. `sendNetEntryReject` gesetzt, sobald das Master Aircraft ein `Net_Entry_Request`-Paket erhält: `simTime + netEntryResponseTime = simTime() + FWMath::mod(src*3/10, sfDuration) / 1000`

REVERSE_LINK_TIMER

Über den Reverse Link sendet ein geclustertes Luftfahrzeug eine `Net_Exit_Request`-Nachricht, wenn es ein Cluster verlassen will, weil es bessere Cluster gefunden hat. Hierfür wird der `Reverse_Link_Timer` in der Prozedur `sendNetExitRequest` gesetzt. Diese Prozedur wird aufgerufen, sobald die Broadcast-Nachricht der Leitstation empfangen wird, die verlassen werden soll. Bei der Berechnung der Sendezeit werden die Zeitschlitz der beiden vorgenannten Timer addiert: `scheduleAt(simTime() + (FWMath::mod(myMacAddr*3/10, sfDuration)/1000) + raSlotDuration + flSlotDuration, rlsSlotTimer)`

5.4.1 Verteilung der Zeitschlitz

Die Verteilung der Zeitschlitz kann der Abbildung 5.5 entnommen werden. Diese Lösung wurde nötig, da auf keine Unterträger zurückgegriffen werden konnte. Zudem

¹OMNeT++ vergibt Kennungen nach dem Schema $(HostId + 1) * 10 + z = nicId$, $z \in [0, \dots, 9]$

vergibt OMNeT++ zufällig gewählte Kennungen, die nicht vollständig vorhersehbar sind. Die letzte Ziffer wird zufällig gewählt und liegt im Bereich $[0, 1, 2 \dots 9)$. Je Folgestation werden drei konsekutive Zeitschlitze reserviert. Diese sind `Random_Access`, `Forward_Link` und `Reverse_Link` (in dieser Reihenfolge). Die Berechnungsformel zur Bestimmung der Reservierung lautet: $nicId \cdot \frac{3}{10} \bmod 240$. 240 entspricht der Dauer eines Superrahmens in Millisekunden.

5.5 Wichtige Prozeduren

sendBroadcast()

Die Prozedur `sendBroadcast()` (s. Abbildung 5.12) ist verantwortlich für das Zusammensetzen der Broadcast-Pakete, die über die Sicherungsschicht übertragen werden. Hier werden die Empfängeradresse, Absenderadresse und Kanalkennung in das Paket geschrieben. Die Empfängeradresse wird auf die Rundruf-Adresse „-1“ gesetzt.

processBroadcast(ClusterMacPkt*)

Diese Prozedur (s. Abbildung 5.11) liest und wertet empfangene Broadcast-Nachrichten aus. Sie berechnet SQUC-Wert zur Bestimmung der Clustergüte und pflegt die Master-Liste durch Einfügen und Aktualisieren der Einträge. Hier wird die Entscheidung getroffen, bei wievielen Master Aircraft gleichzeitig eine Verbindung beibehalten werden soll. Dies bestimmt die Variable `numberOfTopX`. Zu welchen Master Aircraft eine Verbindung gehalten werden soll, wird allein von der Sortierung entschieden und dem Zeitpunkt, zu dem diese erfolgen soll. Soll die Master-Liste bereits bei Auswerten eines Broadcasts sortiert werden, geschieht dies hier. Andernfalls wird die Master-Liste bei Ablauf des `Complete_Scan_Timers` sortiert und die Zugehörigkeit festgelegt. Die Aktionen des Ein- oder Austreten eines Clusters werden immer innerhalb der hier beschriebenen Prozedur ausgeführt.

sendNetEntryRequest(aircraftListEntry*)

In dieser Prozedur wird das Paket für eine Netzeintrittsanfrage zusammengestellt. Übertragen werden der Typ der Nachricht (`Net_Entry_Request`) sowie die Angaben über RSSI, SQUC und Kanal. Anschließend wird das Paket in die MAC-Warteschlange eingereiht und der `Random_Access_Timer`, so dass das Paket noch im Slot dieses Flugzeugs gesendet wird (s. Abbildung 5.5).

processNetEntryRequest(ClusterMacPkt*)

Bei Aufrufen dieser Prozedur wird das empfangene Paket ausgelesen und dem Paket die Zyklusnummer zugewiesen. Ist bereits ein Eintrag für dieses Luftfahrzeug (gleiche `nicId`) enthalten, wird dieser Eintrag aktualisiert. Besonders wichtig ist hier das Aktualisieren der Zyklusnummer, da diese bestimmt, wann ein Eintrag nach einem kompletten Scan als veraltet angesehen werden muss. Wenn noch kein Eintrag für dieses Luftfahrzeug existiert, dann wird der Zeitpunkt des nächsten Forward-Link-Takts gesetzt und überprüft, ob die maximale Clustergröße erreicht ist. In diesem Fall, wird die Prozedur zum Versenden einer Netzeintrittsverweigerungsnachricht (`Net_Entry_Reject`) gestartet, andernfalls die Prozedur zum Versenden der Netzeintrittantwort (`Net_Entry_Response`). Beiden Prozeduren wird jeweils die (eindeutige) ganzzahlige MAC-Adresse des Empfängers übergeben.

sendNetEntryResponse(int)

Hier wird das Paket für die Übertragung auf der Sicherungsschicht zusammengestellt und in die MAC-Warteschlange eingereiht (5.15). Es wird im nächsten Forward-Link-Takt abgeholt, der von bereits in der vorigen Prozedur `sendNetEntryResponse` gesetzt wurde.

sendNetEntryReject(int)

Das Paket wird analog zu `sendNetEntryResponse` zusammengestellt und in die MAC-Wartereihe eingereiht (5.16). Auch hier werde der Takt bereits vorher durch `sendNetEntryResponse` gesetzt.

processNetEntryResponse(ClusterMacPkt*)

In dieser Prozedur (s. Abbildung 5.17) wird das Paket ausgelesen und das jeweilige Master Aircraft in die `registerList` eingetragen. Damit ist die Folgestation dem Cluster des Master Aircrafts zugeordnet.

processNetEntryReject(ClusterMacPkt*)

Diese Prozedur (s. Abbildung 5.18) dient der Mitteilung, dass ein Cluster bereits belegt ist und die Netzeintrittsanfrage derzeit nicht möglich ist. Das Paket wird ausgelesen und das entsprechende Master Aircraft wird aus der Liste verfügbarer Master Aircraft (`masterList`) entfernt. Hier wäre eventuell ein Backoff-Timer sinnvoll, der dafür sorgt, dass das nach dem Empfang des nächsten Broadcasts dieses Master Aircrafts nicht erneut ein Netzeintritt versucht wird. Es kann jedoch nicht vorhergesagt werden, ob der Cluster im nächsten Scan immer noch voll ist. Das Luftfahrzeug wird sich mit dem nächstbesten Master Aircraft in Verbindung setzen. Aus Zeitgründen wurde auf den Backoff-Timer verzichtet, da die Clustergröße von ca. 20 Mitgliedern nicht als kritisch angesehen wird.

sendNetExitRequest(aircraftListEntry*)

In dieser Prozedur (s. Abbildung 5.19) wird ein Paket für die Netzaustrittsanfrage mit Kanalangabe, Empfänger- und Absenderadresse zusammengesetzt. Anschließend wird das Paket in die MAC-Warteschleife eingereiht und ein `Reverse_Link_Timer` gesetzt.

processNetExitRequest(ClusterMacPkt*)

Das Master Aircraft wertet die Netzaustrittsanfrage eines Clustermitglieds in dieser Prozedur aus und löscht – sofern vorhanden – den entsprechenden Eintrag aus der Cluster-Liste (`clusterList`), der die Absenderadresse enthält (s. Abbildung 5.20)

deleteObsoletedMembers()

Diese Prozedur wird bei Ablauf des `Complete_Scan_Timers` ausgeführt und löscht alle Einträge in der Cluster-Liste, deren Zyklusnummern veraltet sind. Für die Verwendung durch eine Brückenleitstation sollte diese Prozedur angepasst werden, da sie sonst Mitglieder löscht, die es in der Phase als Brückenstation nicht empfangen kann.

deleteObsolotedMasters()

Diese Prozedur wird bei Ablauf des Complete_Scan_Timers ausgeführt und löscht alle Einträge in der Liste verfügbarer Leitstationen (masterList) und in der Liste der Anmeldungen, deren Zyklusnummern veraltet sind. Auch diese Prozedur sollte bei Verwendung durch eine Brückenleitstation entsprechend geändert werden.

5.5.1 Berechnung der Cluster-Güte

Die Cluster-Güte wird mittels des SQUC-Wertes (signal quality and uniformity criterion) geschätzt. Es multipliziert das Inverse des Betrags der Differenz aus aktueller Signalstärke und der Signalstärke des (äquidistanten) vorherigen Scans mit der aktuell gemessenen Signalstärke und einer Gewichtung α (im Code alpha).

```
/** Calculates the signal quality and uniformity criterion */
/** Gets the RSSI from the blackboard in recent_rssi. */
squc = recent_rssi*( alpha / fabs(recent_rssi-last_rssi) );
```

Dies entspricht der Gleichung 4.1 zur Berechnung des Clusterkriteriums in Abschnitt 4.2.2.

5.6 Parameter

5.6.1 Eingabeparameter

In diesem Abschnitt werden die Parameter beschrieben, die an die Simulation übergeben werden. Die grundsätzlichen Parameter (z. B. Simulationsdauer) werden in [Varg05] beschrieben. Parameter, die in dieser Arbeit eingeführt wurden, werden im Anschluss erläutert.

- `sim-time-limit` legt die Laufzeit des Simulationslaufs fest.
- `airClusterSim.playgroundSizeX`: Dieser Parameter beeinflusst die Größe des Simulationsfelds durch Bestimmung seiner Breite.
- `airClusterSim.playgroundSizeY` legt die Länge des Simulationsfelds fest.
- `airClusterSim.numHosts`: Anzahl der Kommunikationsteilnehmer in der Simulation. Diese Zahl bleibt während der gesamten Simulationslaufzeit konstant.
- `airClusterSim.airHost[*].mobility.speed` übergibt der Simulationsumgebung die Geschwindigkeit, mit der sich die Luftfahrzeuge in der Simulation bewegen sollen. Jedes Luftfahrzeug hat seine individuelle Geschwindigkeit, die sich im Laufe der Simulation jedoch nicht mehr ändert.

Die weiteren Parameter werden für das Cluster-MAC-Modul festgelegt. In der Initialisierungsdatei beginnen sie mit `airClusterSim.airHost[*].nic.mac`.

- `alpha` ist der Eingabeparameter α in 4.1. Hier kann jede beliebige Realzahl eingesetzt werden.

- Der Parameter `p_master` entspricht p_L und bestimmt die Wahrscheinlichkeit mit der sich ein nicht gruppiertes Luftfahrzeug zu einer Leitstation erklären soll, wenn keine Leitstation gefunden wurde. Als Wert kann jede beliebige positive Realzahl kleiner gleich 1 eingegeben werden.
- `airClusterSim.airHost[*].nic.mac.maxClusterSize`: Im Parameter `maxClusterSize` kann die maximal zulässige Größe eines Clusters je Leitstation angegeben werden. Erreicht die Clustergröße diesen Wert, wird kein weiteres Luftfahrzeug von dieser Leitstation aufgenommen, sondern eine `Net_Entry_Reject`-Nachricht verschickt. Der Parameter ist vom Typ einer Ganzzahl.
- Mittels des Eingabewerts `numberOfChannels` wird die Anzahl der verfügbaren Kanäle festgelegt. Diese Einstellung betrifft nur die selbstorganisierende Bord-Bord-Kommunikation. Die Integration von oder der Übergang zu Bodenstationen wurde nicht implementiert und wird daher von dieser Einstellung nicht berücksichtigt. Es darf jede natürliche Zahl eingegeben werden.
- Der Parameter `xOfTop` entscheidet, zu wie vielen Leitstationen eine Folgestation eine Verbindung aufrecht erhalten soll. Beträgt der Wert drei, so bleibt das Luftfahrzeug immer bei ausgewählten Leitstationen angemeldet. Dieser Parameter wurde eingeführt, um die Verbindungen durch Brücken nachzuahmen. Als Werte sind nur natürliche Zahlen erlaubt.
- Der Parameter `sortImmediately` ist ein bool'scher Wert, der angibt, zu welchen Zeitpunkten die Liste der gefundenen Leitstationen nach dem SQUC-Kriterium sortiert werden soll. Ist der Wert „wahr“, dann wird die Liste sofort bei jeder Änderung erneut sortiert; andernfalls wird die `registerList` nach jedem kompletten Scanvorgang nach demselben Kriterium sortiert.
- Die Backoff-Zeit `abandonMaster` t_b legt fest, nach wie vielen aufeinander folgenden Zyklen eine Leitstation ohne Mitglieder sein darf ehe sie ihren Status wieder aufgibt. Hier sind natürliche Zahlen erlaubt.

5.6.2 Ausgabeparameter

Zur Erstellung der Ausgabe der Simulationsergebnisse wurde auf Funktionen für OMNeT++ zurückgegriffen, die in [Varg05] beschrieben sind. Speziell wurden hierbei Skalare in der Datei `omnet.sca` und Vektoren in der Datei `omnet.vec` erzeugt. Skalare halten Ergebnisse nach einem kompletten Simulationslauf fest und Vektoren bilden geordnete Mengen gesammelter Werte.

Skalare

Die in dieser Implementierung verwendeten Skalare werden in der Datei `omnet.sca` gesammelt und für jedes Luftfahrzeug einzeln erhoben. Die verwendeten Mobilitätsmodule wurden derart angepasst, dass sie bei jeder Änderung der Bewegungsrichtung oder des Bewegungsziels einen Zähler namens „#changes of movement“ hoch zählen.

Die nun folgenden Skalare werden alle im ClusterMAC-Modul (`airClusterSim.airHost[*].nic.mac`) erstellt.

- Der Skalar „Simulation duration“ beinhaltet die Gesamtlaufzeit des Simulationslaufs.
- „# Changes of cluster“ zählt die Wechsel einer Folgestation von einem Cluster in einen anderen.
- „# Switches of status“ zählt die Statuswechsel eines Luftfahrzeugs von Leitstation zur Folgestation oder umgekehrt.
- „Duration being connected“ enthält die Zeitdauer, die das Luftfahrzeug mit einem anderen Luftfahrzeug (direkt) verbunden war. Eine Folgestation muss hierfür bei mindestens einer Leitstation angemeldet sein und eine Leitstation muss mindestens eine Folgestation im Cluster haben, um in diesem Kontext als verbunden zu gelten.
- „Percent being connected“ gibt in Prozent aus, in welchem Anteil zur Gesamtsimulationszeit das Luftfahrzeug verbunden war.
- „Duration being master“ enthält die Zeitdauer, in der ein Luftfahrzeug eine Leitstation war.
- „Percent being master“ gibt in Prozent an, in welchem Verhältnis zur Gesamtsimulationszeit ein Luftfahrzeug eine Leitstation war.
- In „Duration having members“ wird die Zeitdauer festgehalten, in der eine Leitstation Mitglieder in seinem Cluster hatte.
- „Percent having members“ gibt in Prozent an, in welchem Verhältnis zur Gesamtsimulationszeit eine Leitstation Clustermitglieder hatte.
- In welchem Verhältnis zur Zeitdauer als Leitstation eine Leitstation auch tatsächlich Clustermitglieder hat, gibt „Ratio of having members/being master“ aus. Dieser Wert gibt insofern an, zu wieviel Prozent die Leitstation zur Verbundenheit beigetragen bzw. verbunden war hat. Mathematisch wird dieses Verhältnis in der Gleichung 5.1 ausgedrückt.

$$Q_{\text{Effizienz}} = \frac{\text{Zeit}_{\text{mit Mitgliedern}}}{\text{Zeit}_{\text{als Leitstation}}} \quad (5.1)$$

- „Duration being clustered“ gibt die Zeitdauer aus, in der ein Luftfahrzeug eine Folgestation war.
- „Percent being clustered“ liefert in Prozent den Zeitanteil als Folgestation im Verhältnis zur Gesamtsimulationszeit.

Vektoren

In dieser Implementierung werden nach jeder erfolgten Abtastung des kompletten Frequenzspektrums Vektoren für jedes Luftfahrzeug in der Datei `omnet.vec` gesammelt. In der Datei `cluster.vec` befinden sich Teile dieser Datei, die zu Auswertungszwecken in der Textbeschreibung leicht modifiziert wurden. Alle hier verwendeten Vektoren werden im ClusterMAC-Modul erstellt (`airClusterSim.airHost[0].nic.mac`).

- Der Vektor „cluster size“ enthält die zum Zeitpunkt aktuelle Clustergröße.
- Der Vektor „master list size“ liefert die Größe der Liste gefundenen Leitstationen.
- Der Vektor „Registry size“ beinhaltet die Zahl der Leitstationen, bei der das Luftfahrzeug aktuell angemeldet ist.
- Der Vektor „aircraft status“ gibt den Status eines Luftfahrzeugs aus (Folgestation oder Leitstation).

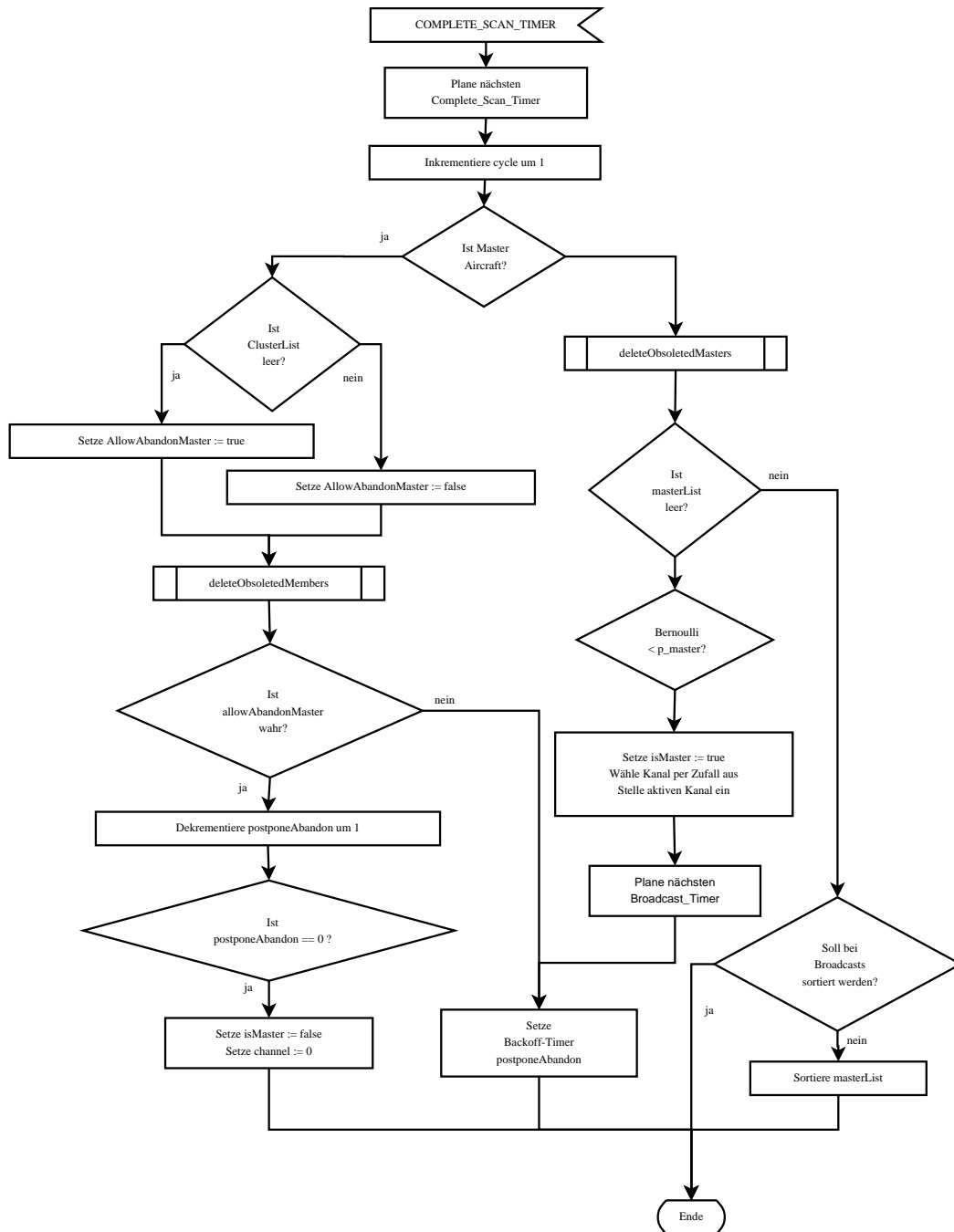


Abbildung 5.6: Complete_Scan_Timer

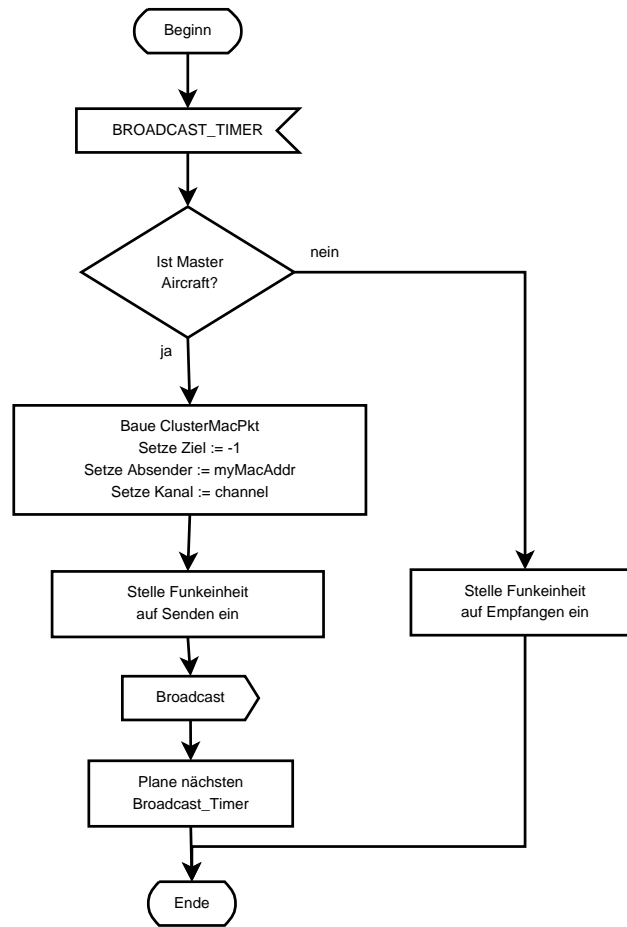


Abbildung 5.7: Broadcast_Timer

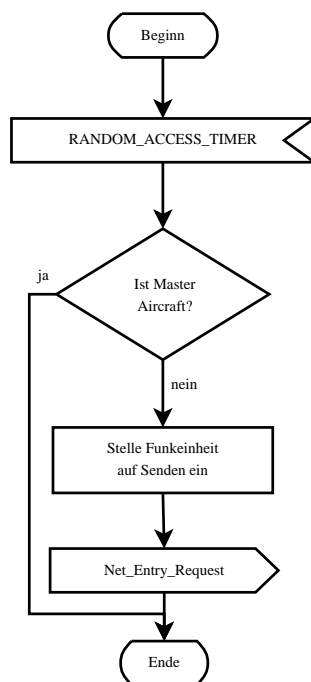


Abbildung 5.8: Random_Access_Timer

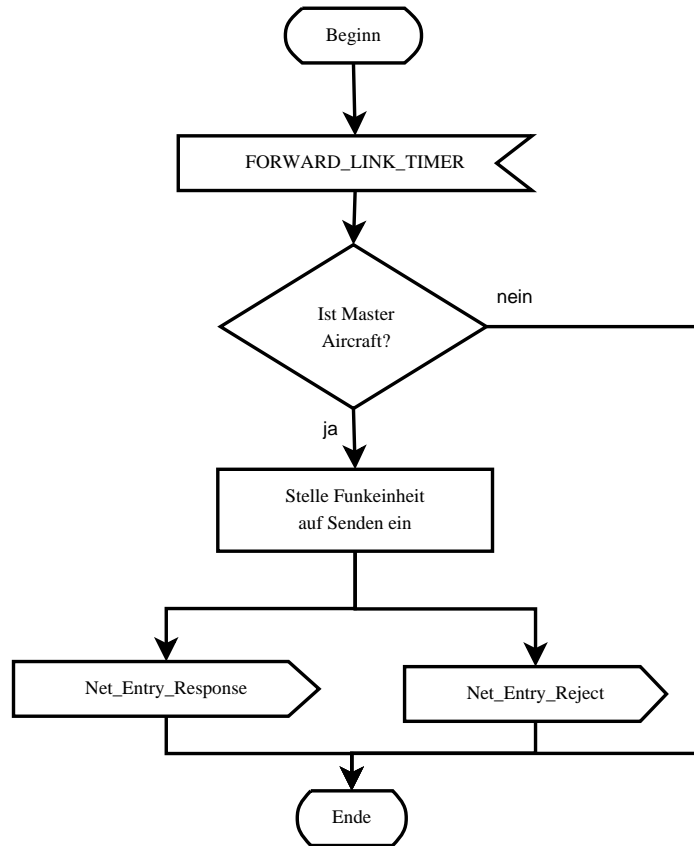


Abbildung 5.9: Forward_Link_Timer

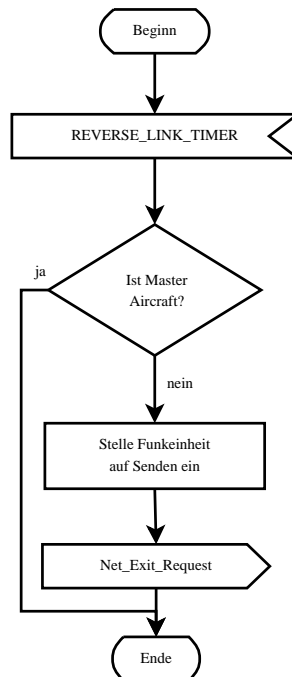


Abbildung 5.10: Reverse_Link_Timer

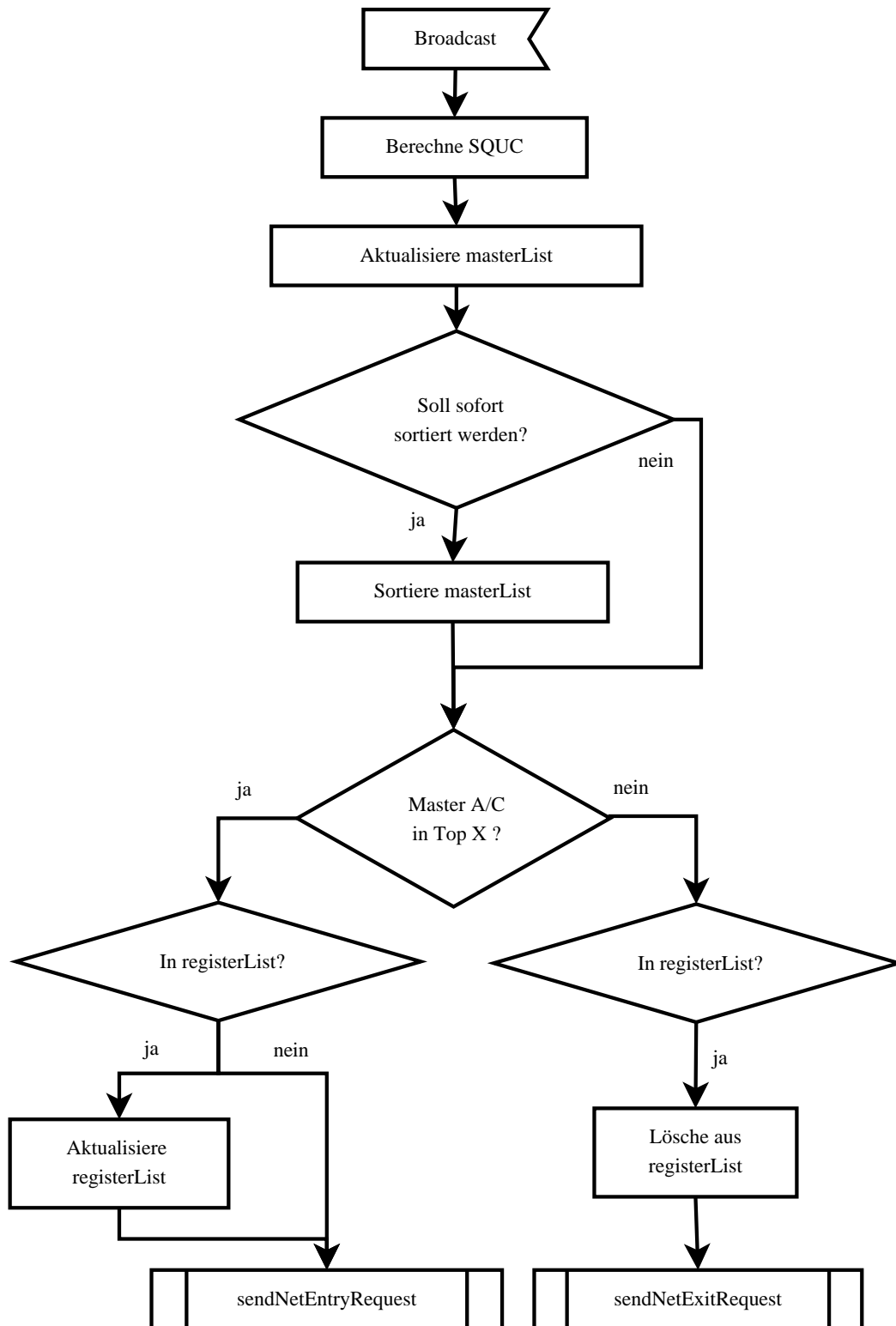


Abbildung 5.11: processBroadcast(ClusterMacPkt*)

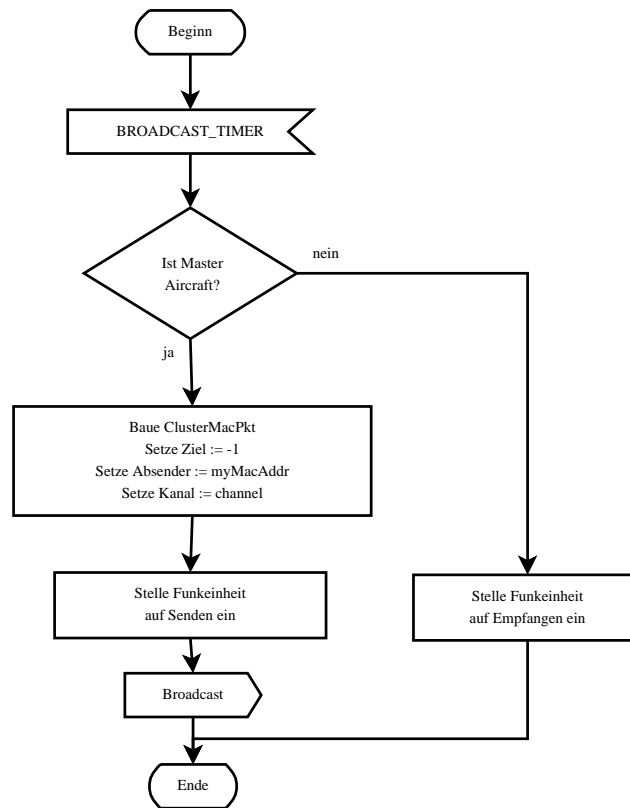


Abbildung 5.12: sendBroadcast()

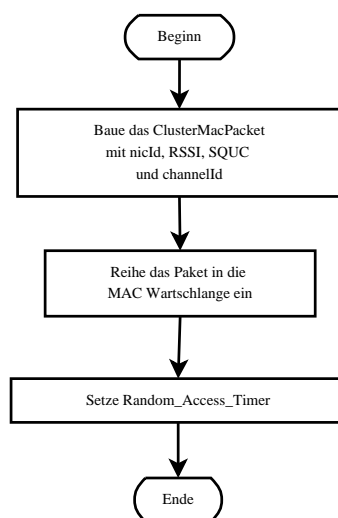


Abbildung 5.13: sendNetEntryRequest(aircraftListEntry*)

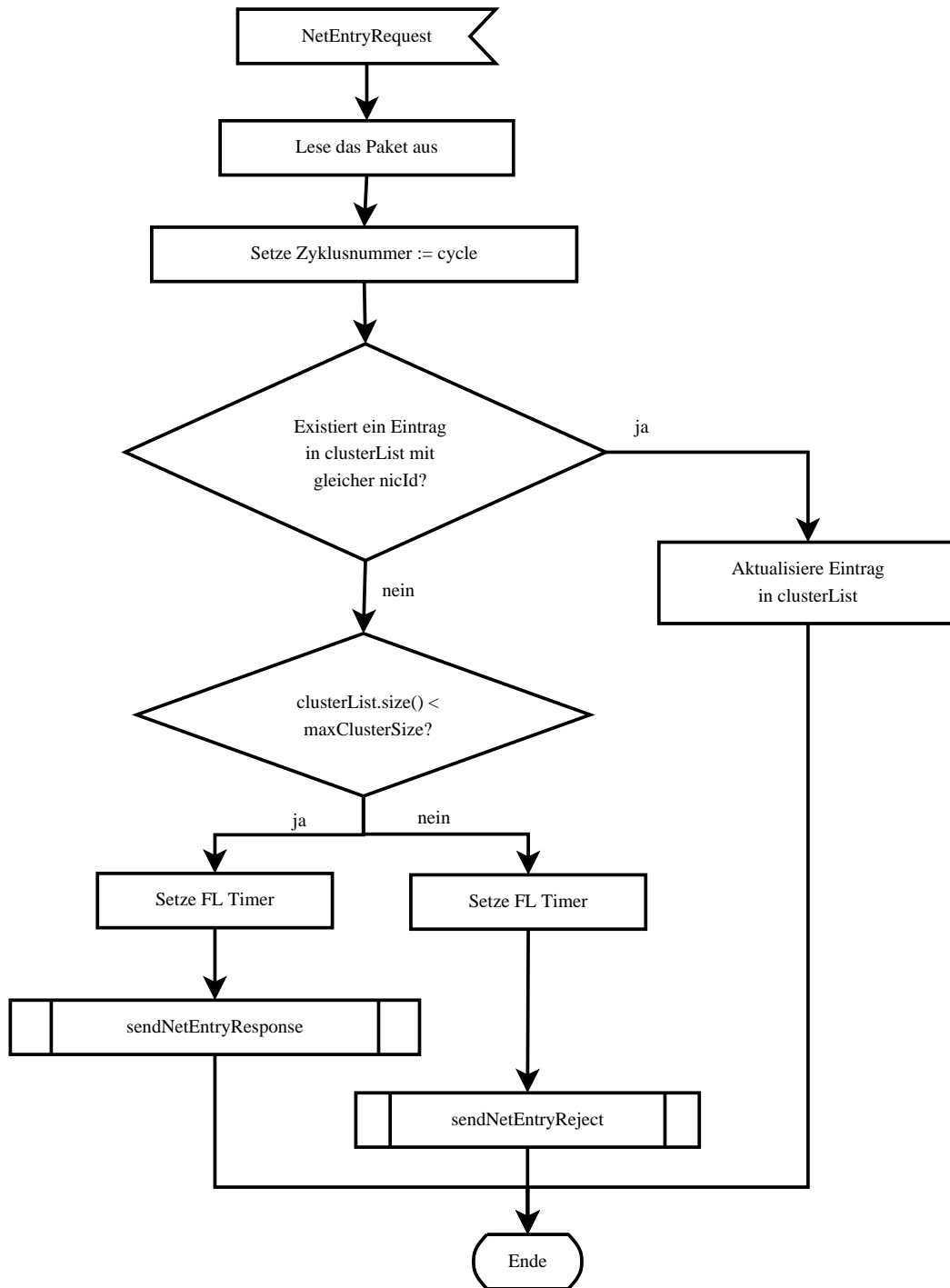
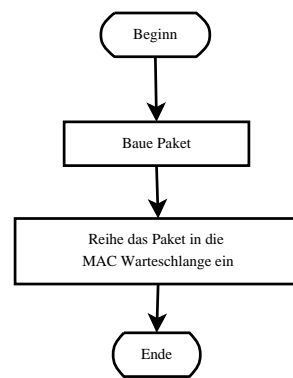
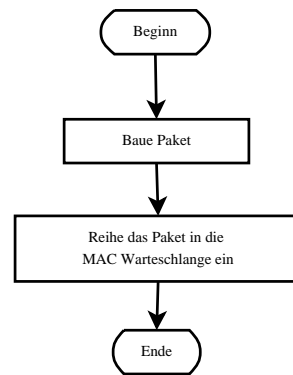
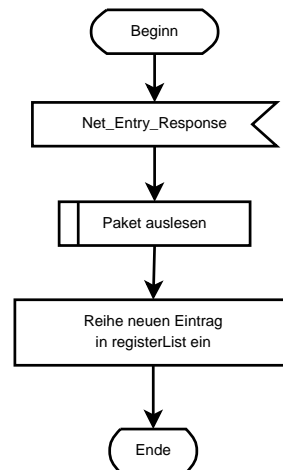


Abbildung 5.14: processNetEntryRequest(ClusterMacPkt*)

Abbildung 5.15: `sendNetEntryResponse(int)`Abbildung 5.16: `sendNetEntryReject(int)`Abbildung 5.17: `processNetEntryResponse(ClusterMacPkt*)`

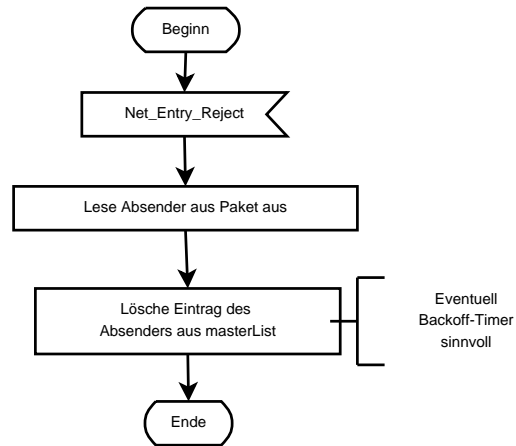


Abbildung 5.18: processNetEntryReject(ClusterMacPkt*)

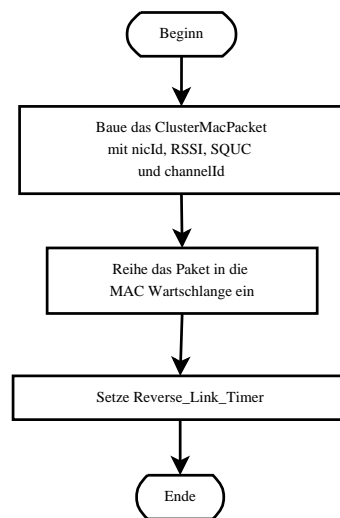


Abbildung 5.19: sendNetExitRequest(aircraftListEntry*)

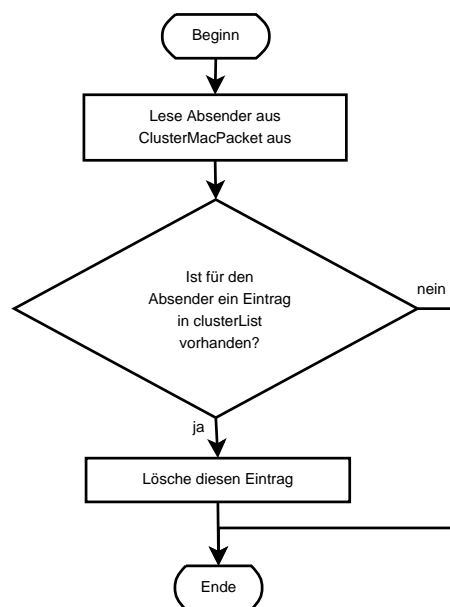


Abbildung 5.20: processNetExitRequest(ClusterMacPkt*)

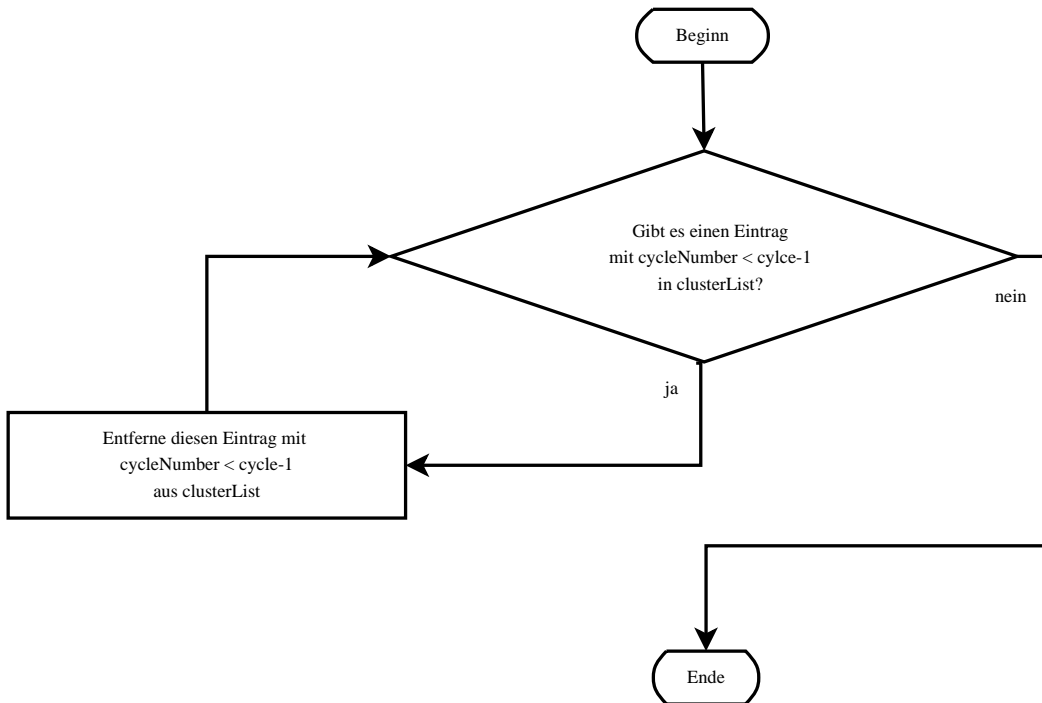


Abbildung 5.21: deleteObsoletedMembers()

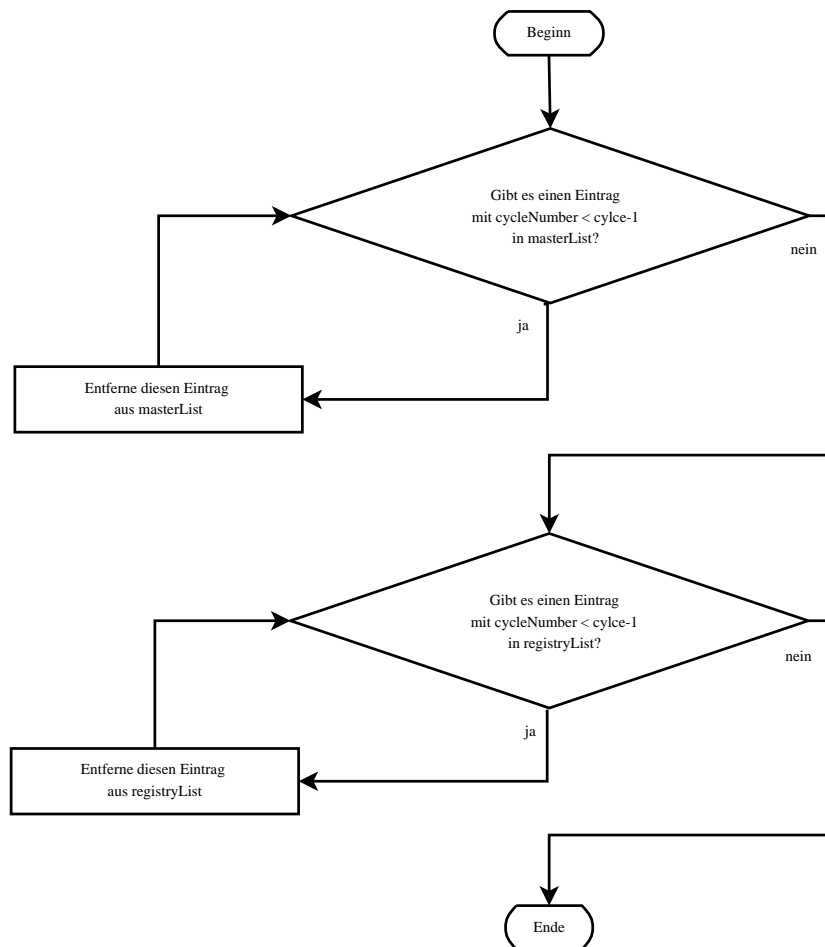


Abbildung 5.22: deleteObsoletedMasters()

6. Evaluierung durch Simulation

In diesem Kapitel wird evaluiert, in wie weit das in dieser Arbeit entworfene Konzept funktioniert. Dies erfolgt durch Leistungsmessungen in verschiedenen Szenarien, die beschrieben und deren Ergebnisse jeweils diskutiert werden. Im Anschluss werden aus den gewonnenen Erkenntnissen Schlussfolgerungen gezogen.

6.1 Szenario 1: Variation der Wahrscheinlichkeit p_L

In diesem Szenario werden einige Auswirkungen der Wahrscheinlichkeit p_L betrachtet, mit der sich ein nicht gruppiertes Luftfahrzeug zur Leitstation erklärt.

6.1.1 Beschreibung des Szenarios 1

Dieses Szenario dient der Ermittlung der Zeit, die vergeht, bis alle im Simulationssystem befindlichen Luftfahrzeuge mit (mindestens) einer anderen Luftfunkstelle verbunden sind. Diese Zeit wird in dieser Arbeit als Konnektierungszeit bezeichnet.

Die in diesem Szenario verwendeten festen und variablen Parameter werden nachfolgend aufgelistet und erläutert.

Feste Parameter in Szenario 1

Zunächst werden die festen Parameter betrachtet:

```
sim-time-limit = 100s
airClusterSim.playgroundSizeX = 300
airClusterSim.playgroundSizeY = 300
airClusterSim.airHost[*].mobility.speed = uniform(0.1, 0.4)
airClusterSim.airHost[*].nic.mac.alpha = 1.0
airClusterSim.airHost[*].nic.mac.xOfTop = 1
airClusterSim.airHost[*].nic.mac.sortImmediately = true
airClusterSim.airHost[*].nic.mac.abandonMaster = 2
**airHost*.mobilityType = "randomWP"
**airHost[*].mobility.speed = uniform(0.1, 0.4)
airClusterSim.channelcontrol.carrierFrequency = 500e+6
```

```

airClusterSim.airHost[*].nic.mac.bitrate=40000
airClusterSim.airHost[*].nic.mac.maxClusterSize = 20;
airClusterSim.airHost[*].nic.mac.numberOfChannels = 20;
airClusterSim.airHost[*].nic.radio.swSleep = 0
airClusterSim.airHost[*].nic.radio.swSend = 0.000
airClusterSim.airHost[*].nic.radio.swRecv = 0.000

```

Die Einschränkung der Simulationszeit auf 100 Sekunden stellt sicher, dass die Ergebnisse nicht durch einen Clusterwechsel verfälscht werden, der eine erneute Konnektierungszeit benötigen würde.

Das Simulationsfeld wurde derart gewählt (300×300), dass alle im System befindlichen Luftfahrzeuge sich gegenseitig in Reichweite befinden. So wird ausgeschlossen, dass sich eine Funkstelle nicht anmelden kann, weil sie nicht gefunden würde. Die Reichweite in der implementierten Simulation beträgt ca. 300 Entfernungseinheiten. Dies entspricht ca. 500 nautischen Meilen in der Realwelt, die sich ergeben, wenn man in die Gleichung 3.2 für den UKW-Radiohorizont als Höhen beider Luftfunkstellen (h_{Tx} und h_{Rx}) jeweils 42000 Fuß einträgt. Als Trägerfrequenz wird in der Simulation $500 \cdot 10^6$ verwendet

Die Geschwindigkeit wurde so gewählt, dass sie den in [FCOC06] erwarteten Geschwindigkeiten für die in 3.1.5 Fluggebieten (AOA, ERP) entspricht und die Reichweite der Realwelt ähnelt. Dabei wird die Geschwindigkeit gleichverteilt aus dem Bereich $[0, 1; 0, 4]$ ausgewählt. Die Startpositionen und die Wegpunkte werden zufällig bestimmt.

Als α in SQUC-Kriterium (siehe 4.1) wurde 1.0 verwendet. Mit `softTop = 1` wurde festgelegt, dass sich ein Flugzeug nur mit einer Leitstation verbinden darf. Dies reicht in diesem Szenario, da die Zeit untersucht wird, die vergeht, bis sich eine Folgestation mit seiner Leitstation verbindet bzw. eine Leitstation die erste erfolgreiche Anmeldung einer Folgestation ausführt.

Die eingesetzten Werte für `sortImmediately` und `abandonMaster` sind in diesem Szenario nicht von Bedeutung, da die Auswirkung von Clusterwechseln nicht berücksichtigt wird.

Als Bewegungsmodell wurde das Random Waypoint Mobility Modell ausgewählt, das in der Implementierung als `ConstAirSpeedMobility` angesprochen wird und im vorherigen Kapitel (siehe Abschnitt 5.2.2) erläutert wurde.

Die Bitrate wurde so ausgewählt, dass die Übertragungen der Cluster-MAC-Pakete innerhalb einer Sekunde abgeschlossen sind. Diese Einstellung ist bedingt durch die nicht implementierte Kanaltrennung in der Simulationsumgebung und die dort verwendete Slot-Verteilung. Im echten Einsatz bietet B-VHF höhere Bandbreiten, so dass dieser Parameter der Einfachheit so gewählt werden konnte.

Die Zahl der maximal zulässigen Mitglieder eines Clusters und die Zahl der in der Simulation verwendeten Kanäle betragen jeweils 20. Diese Einstellung wird im Laufe der Simulation nicht geändert.

Auf der Bitübertragungsschicht wurde eingestellt, dass der Wechsel von Sendestatus auf Empfangsstatus und umgekehrt 0 ms dauert. Dies diente der Vereinfachung der Implementierung, ändert aber nichts an der grundsätzlichen Funktionsweise.

Die Bitrate, die maximale Clustergröße, die Kanalanzahl und die Wechselzeit auf der Bitübertragungsschicht werden in allen Szenarien dieser Arbeit unverändert verwendet und daher nicht erneut explizit beschrieben.

Variable Parameter in Szenario 1

Um die Auswirkungen auf die Konnektierungszeit in Abhängigkeit der Leitstation-Wahrscheinlichkeit p_L und der Anzahl der im Streunetz befindlichen Teilnehmer zu ermitteln, werden die Tests mit drei unterschiedlichen Netzkonstellationen durchgeführt. So wird der erste Simulationsreihe mit zwölf Luftfahrzeugen, die zweite mit 36 und die dritte mit 60 Luftfahrzeugen vollzogen. In jeder Reihe laufen fünf Tests mit unterschiedlichen Werten für p_{master} bzw. $p_L \in \{0, 1; 0, 2; 0, 25; 0, 3; 0, 4; 0, 5\}$.

Nach Ablauf dieser Test wird die Zeit entnommen, bis alle Luftfahrzeuge die erste Verbindung zu einer Folgestation bzw. Leitstation aufgebaut haben. Da der Zeitpunkt des Verbindungsaufbaus in der Implementierung abhängig vom verwendeten Kanal ist (um Auslöschungen zu vermeiden), wird anschließend die kumulierte Konnektierungszeit zum Zeitpunkt des nächsten Scans aufgerundet. Die Ergebnisse der Simulationen werden in den folgenden drei Unterabschnitten betrachtet. Sie geben an, wieviele Luftfahrzeuge nach welchen Abtastvorgängen verbunden wurden.

6.1.2 Ergebnisse in Szenario 1

Testreihe 1a: Simulation mit 12 Luftfahrzeugen

Für die erste Testreihe wird die Anzahl der teilnehmenden Luftfahrzeuge auf zwölf festgesetzt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst. Wie man dort erkennen kann, liefern die Werte 0,25 und 0,3 für p_L die besten Resultate, da alle Flugzeuge bereits nach vier Scans Clustermitglieder sind oder haben. Für $p_L = 0, 1$ und $p_L = 0, 2$ ergibt sich eine Konnektierungszeit von jeweils sechs Abtastungen; $p_L = 0, 2$ konnektiert jedoch im zweiten Scan ein Flugzeug mehr. $p_L = 0, 4$ braucht zwar weniger Scans als $p_L = 0, 1$ für alle zwölf Flugzeuge, aber ist langsamer und konnektiert in den ersten drei Scans zwei Luftfahrzeuge weniger. $p_L = 0, 5$ liefert mit einer Konnektierung nach 9 Abtastungen das schlechteste Resultat dieser Testreihe.

| Scan | $p_L = 0, 1$ | $p_L = 0, 2$ | $p_L = 0, 25$ | $p_L = 0, 3$ | $p_L = 0, 4$ | $p_L = 0, 5$ |
|------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 10 | 9 | 10 | 10 | 8 | 8 |
| 3 | 10 | 10 | 11 | 11 | 8 | 9 |
| 4 | 10 | 10 | 12 | 12 | 11 | 10 |
| 5 | 11 | 11 | | | 12 | 11 |
| 6 | 12 | 12 | | | | 11 |
| ⋮ | | | | | | ⋮ |
| 9 | | | | | | 12 |

Tabelle 6.1: Testreihe 1a: Benötigte Abtastvorgänge zur Konnektierung der 12 Luftfahrzeuge

Die besten Resultate liefern damit $p_L = 0, 25$ und $p_L = 0, 3$, deren Simulationsergebnisse in allen auch hier nicht betrachteten Punkten identisch sind. Dies liegt daran, dass die Zahl zwölf nicht groß genug, um für die verschiedenen Wahrscheinlichkeiten

eine unterschiedliche Anzahl von Leitstationen zu initialisieren. Es kann daher noch keine eindeutige Entscheidung für 0,25 oder 0,3 getroffen werden. Die Resultate sind noch einmal graphisch in Abbildung 6.2 dargestellt.

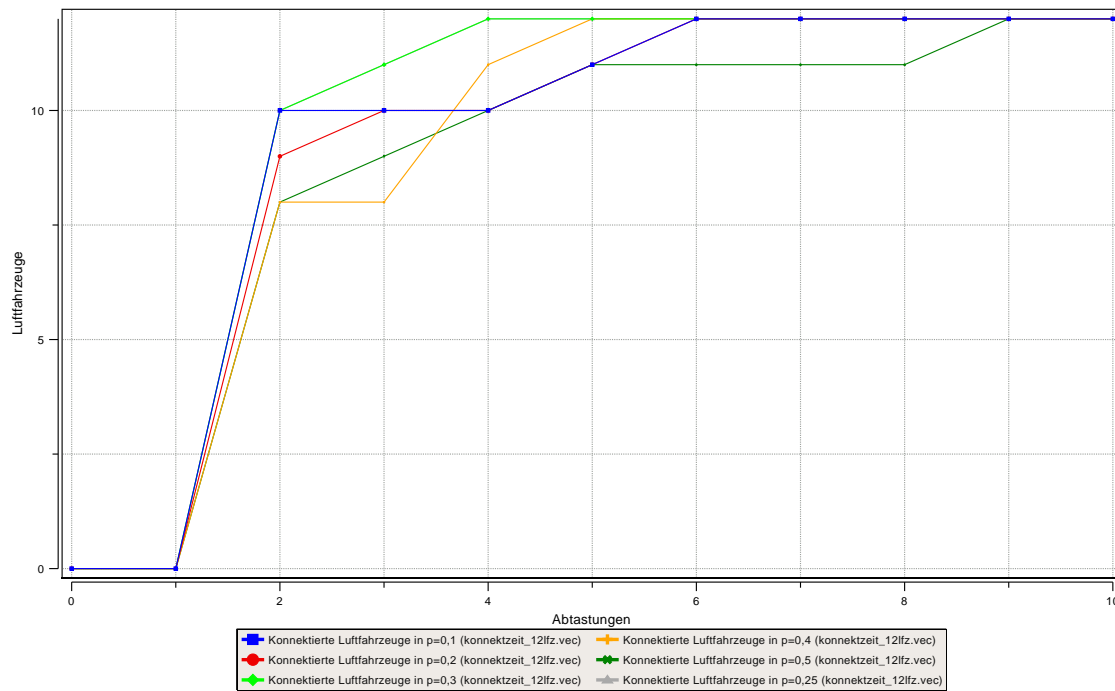


Abbildung 6.1: Simulation 1a: Graphische Darstellung des Konnektierungsverlaufs für 12 Luftfahrzeuge

Testreihe 1b: 36 Luftfahrzeuge

Die zweite Testreihe läuft mit 36 Flugzeugen, die sich gleichzeitig im Kommunikationssystem befinden. Die Ergebnisse sind der Tabelle 6.2 zu entnehmen und sind in Abbildung 6.2 dargestellt. Nach drei Scans sind bei $p_L = 0,1$ bereits alle Luftfahrzeuge verbunden. Bei $p_L = 0,2$ werden vier Scans benötigt und alle anderen benötigen fünf Abtastungen. Unter diesen wächst die Zahl der verbundenen Teilnehmer mit $p_L = 0,3$ am schnellsten und liefert ab dem dritten Scan die gleichen Werte wie $p_L = 0,25$. Das schlechteste Resultat liefert $p_L = 0,5$.

| Scan | $p_L = 0,1$ | $p_L = 0,2$ | $p_L = 0,25$ | $p_L = 0,3$ | $p_L = 0,4$ | $p_L = 0,5$ |
|------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 34 | 32 | 30 | 33 | 26 | 19 |
| 3 | 36 | 35 | 33 | 33 | 28 | 22 |
| 4 | | 36 | 34 | 34 | 32 | 30 |
| 5 | | | 36 | 36 | 36 | 36 |

Tabelle 6.2: Testreihe 1b: Benötigte Abtastvorgänge zur Konnektierung der 36 Luftfahrzeuge

Im Gegensatz zur Testreihe mit zwölf Flugzeugen liefern $p_L = 0,1$ und $p_L = 0,2$ nun die besseren Ergebnisse. Gemeinsam ist den Ergebnissen beider Testreihen, dass die Konnektierleistung mit steigendem p_L (ab 0,4) wieder abnimmt. Es darf daher vermutet werden, dass höhere Werte mit $p_L \geq 0,4$ keine besseren Ergebnisse liefern

werden. Das ergibt sich auch aus der Überlegung, dass es keinen Sinn ergibt, mehr Leitstationen als Folgestationen bilden zu lassen, da Leitstationen mit bis zu 20 Folgestationen verbunden sein können, Folgestationen aber nicht mit mehr als drei Leitstationen verbunden sein sollten.

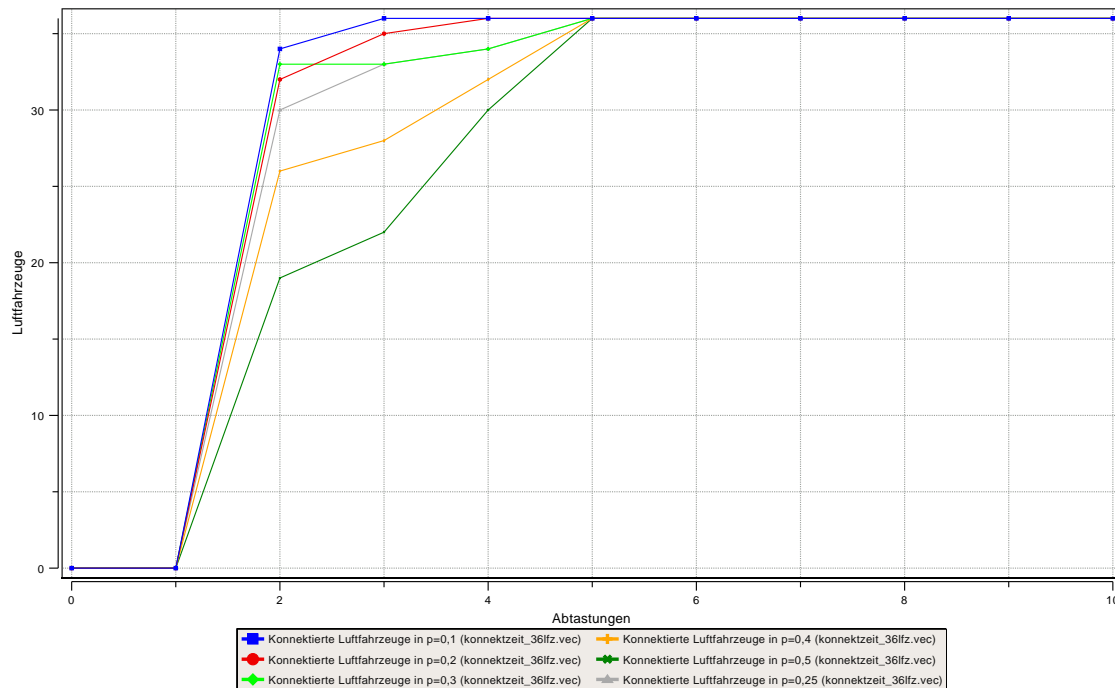


Abbildung 6.2: Simulation 1b: Graphische Darstellung des Konnektierungsverlaufs für 36 Luftfahrzeuge

Testreihe 1c: 60 Luftfahrzeuge

Die dritte Testreihe erfolgt mit 60 Luftfahrzeugen, die sich gleichzeitig im System befinden und sich gegenseitig in Reichweite haben. Der Tabelle 6.3 kann entnommen werden, dass die Simulation $p = 0,2$ in dieser Testreihe mit elf Abtastvorgängen am längsten braucht, um alle Teilnehmer in das Streunetz aufzunehmen. Bis zum fünften Scan entwickelt es sich jedoch besser als $p \in \{0,4; 0,5\}$. Betrachtet man nur den Zeitraum zwischen dem dritten und dem fünften Scan, konnektiert $p_L = 0,2$ sogar schneller als $p = 0,3$. Es bleibt jedoch ein einzelnes Luftfahrzeug bis zur elften Abtastung nicht konnektiert.

Der graphischen Darstellung in Abbildung 6.3 ist zu entnehmen, dass für $p \in \{0,2; 0,25; 0,3\}$ die Zahl der verbundenen Luftfahrzeuge schnell wächst. Am schnellsten wächst sie für $p_L = 0,25$. Bei $p_L = 0,25$ sind zudem alle Luftfahrzeuge nach fünf Abtastvorgängen verbunden. Daher liefert $p_L = 0,25$ hier ein besseres Ergebnis als $p_L = 0,1$.

6.1.3 Diskussion der Ergebnisse

Auffällig in den oben beschriebenen Testreihen ist, dass die Konnektierleistung mit steigendem p ab $p = 0,4$ schlechter wurde. Für eine große Anzahl beteiligter Luftfunkstellen, erweist sich $p = 0,25$ als beste Wahl, da dort bereits nach dem zweiten Scan 86,7 % der Flugzeuge verbunden sind. Bei $p = 0,1$ sind es nur 60 %.

| Scan | $p_L = 0,1$ | $p_L = 0,2$ | $p_L = 0,25$ | $p_L = 0,3$ | $p_L = 0,4$ | $p_L = 0,5$ |
|------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 36 | 48 | 52 | 49 | 31 | 29 |
| 3 | 50 | 57 | 56 | 53 | 39 | 33 |
| 4 | 59 | 58 | 58 | 55 | 50 | 33 |
| 5 | 60 | 59 | 60 | 59 | 59 | 59 |
| 6 | | 59 | | 60 | 60 | 60 |
| ⋮ | | ⋮ | | | | |
| 11 | | 60 | | | | |

Tabelle 6.3: Testreihe 1a: Benötigte Abtastvorgänge zur Konnektierung der 60 Luftfahrzeuge

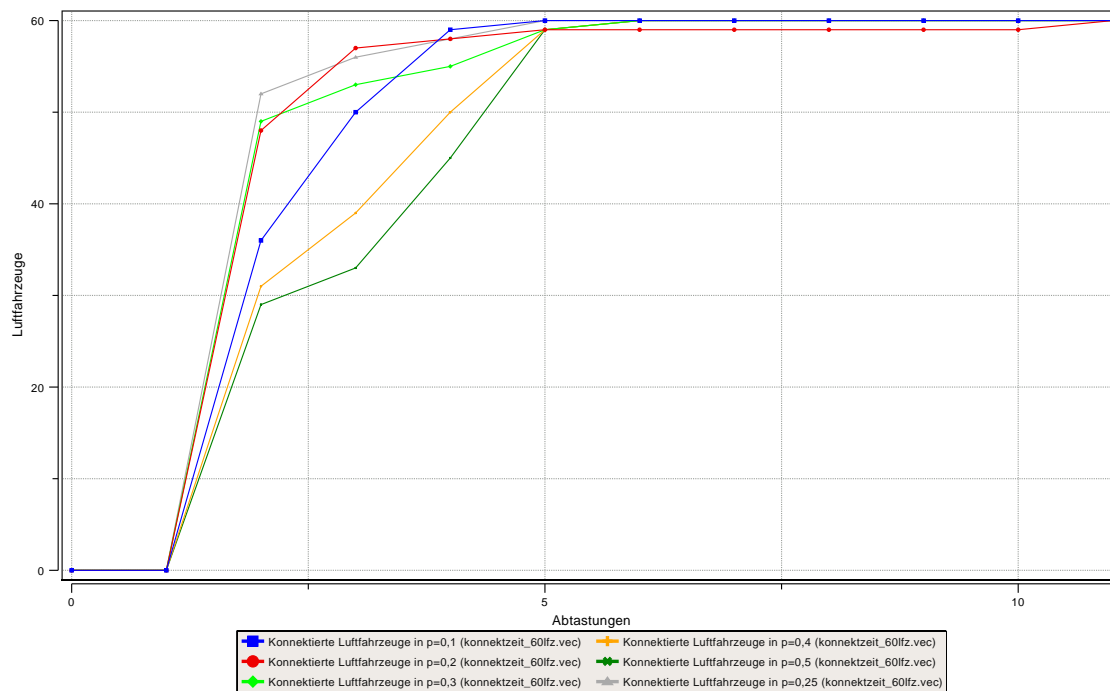


Abbildung 6.3: Simulation 1c: Graphische Darstellung des Konnektierungsverlaufs für 60 Luftfahrzeuge

In der dritten Testreihe wurde außerdem die Zahl der verbleibenden Leitstationen am Ende der Simulationszeit betrachtet. Das Ergebnis ist in Tabelle 6.4 zusammengefasst. Dort sieht man, dass für $p_L = 0,1$ fünf Leitstationen übrig bleiben und für $p_L = 0,25$ noch acht Leitstationen im System aktiv sind. Anfangs waren es sechs ($p_L = 0,1$) bzw. fünfzehn ($p_L = 0,25$) Leitstationen. Diese Werte werden sogar bereits nach einem Viertel der Simulationszeit erreicht. Daraus lässt sich die Vermutung ableiten, dass sich das System sehr schnell auf eine Zahl benötigter Leitstationen einpendelt. Zu beachten ist, dass in diesem Szenario alle Luftfahrzeuge sich gegenseitig in Reichweite hatten. Für solche Szenarien kann $p = 0,1$ tatsächlich sinnvoll sein. In weniger besiedelten Fluggebieten sollte dieser Wert jedoch höher gewählt werden. Hierfür bietet sich $p = 0,25$ an.

| | $p = 0,1$ | $p = 0,2$ | $p = 0,25$ | $p = 0,3$ | $p = 0,4$ | $p = 0,5$ |
|---------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|
| Leitstationen | 5 | 8 | 8 | 8 | 12 | 12 |

Tabelle 6.4: Anzahl der verbleibenden Master Aircraft nach 100 Sekunden

6.2 Szenario 2: Betrachtung der Clusterstabilität

In diesem Abschnitt wird mittels Simulation untersucht, durch welche Faktoren die Stabilität der Cluster in dieser Arbeit beeinflusst werden.

6.2.1 Szenariobeschreibung

Die dieses Szenario definierenden festen Parameter werden nachfolgend aufgelistet.

Feste Parameter

```

sim-time-limit = 600s
airClusterSim.playgroundSizeX = 2000
airClusterSim.playgroundSizeY = 1000
airClusterSim.numHosts = 60
airClusterSim.airHost[*].mobility.speed = uniform(0.1, 0.4)
airClusterSim.airHost[*].nic.mac.p_master = 0.25
airClusterSim.airHost[*].nic.mac.alpha = 1.0
airClusterSim.airHost[*].nic.mac.abandonMaster = 2

```

Das zugrunde gelegte Bewegungsmodell ist die ozeanische Bewegung in LinearAirMobility. Die Simulationszeit beträgt 600 Sekunden (10 Minuten). Das Simulationsfeld hat eine Größe von $2000 \cdot 1000$ und gleicht der ozeanischen Bedingung. Die Breite wurde so gewählt, dass einige Luftfahrzeuge mindestens 60 Minuten konstant durch das Gebiet fliegen können ohne an eine Kante zu stoßen. Die Zahl der Luftfahrzeuge beträgt 60 und die Geschwindigkeit entspricht der Einstellung im vorigen Szenario.

variable Parameter

In der folgenden Auflistung finden sich die Parameter, die in Szenario variabel sind, sowie ihre eingesetzten Werte.

```

airClusterSim.airHost[*].nic.mac.sortImmediately  $\in \{true, false\}$ 
airClusterSim.airHost[*].nic.mac.xOfTop  $\in \{1; 2; 3\}$ 

```

Es werden die Parameter betrachtet, die den Zeitpunkt der Sortierung (`sortImmediately`) und die Zahl gleichzeitiger Anmeldungen an einer Leitstation (`xOfTop`, kurz: `x`) bestimmen. Die Ergebnisse der Simulationsläufe werden in der Tabelle 6.5 zusammengefasst.

6.2.2 Vergleich und Diskussion der Ergebnisse in Szenario 2

Die Ergebnisse der Testreihen im oben beschriebenen Szenario werden in der Reihenfolge der Zeilen behandelt.

| Sortierung | später sortiert | | | sofort sortiert | | |
|---------------------------|-----------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|
| | x=1 | x=2 | x=3 | x=1 | x=2 | x=3 |
| x für <code>xOfTop</code> | | | | | | |
| Clusterwechsel/Minute | 0,33 | 0,24 | 0,2 | 0,22 | 0,22 | 0,18 |
| Statuswechsel/Minute | 0,31 | 0,12 | 0,1 | 0,2 | 0,11 | 0,1 |
| Verbindungszeit (%) | 68,46 | 85,13 | 96,02 | 97,64 | 99,24 | 99,29 |
| Verbindungsausfall (%) | 31,54 | 14,87 | 3,98 | 2,36 | 0,76 | 0,71 |
| Effizienz der Master (%) | 55,94 | 89,72 | 99,43 | 90,61 | 99,12 | 99,43 |
| Master Aircraft gewesen | 30 | 19 | 18 | 20 | 18 | 18 |
| erreichte Clustergröße | 8 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Bewegungsänderungen | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |

Tabelle 6.5: Stabilität während 600 Sekunden

Clusterwechsel

Wenn man die erfolgten Clusterwechsel betrachtet, beobachtet man, dass eine Erhöhung des Parameters `xOfTop` weniger Clusterwechsel zur Folge hat. Dies ist besonders signifikant, wenn `sortImmediately` wahr ist, d. h. die Liste der verfügbaren Leitstationen sofort bei jeder Änderung neu sortiert wird. Wenn diese Liste nach jedem Scan sortiert wird, verringert die Anzahl der Clusterwechsel von 0,22 auf 0,18 Clusterwechsel je Minute.

Weiterhin ist festzustellen, dass die Zahl der Clusterwechsel allgemein geringer ist, wenn die Liste verfügbarer Master Aircraft sofort sortiert wird. Dies gilt für alle in den Simulationsläufen verwendeten Werte von `xOfTop`.

Somit darf der Schluss gezogen werden, dass die sofortige Sortierung die Zahl der Clusterwechsel verringert, obwohl im Entwurf vermutet worden war, dass die spätere Sortierung zu stabileren Clustern führen würde. Die sofortige Sortierung und die Unterhaltung von drei gleichzeitigen Verbindungen zu Leitstationen liefern die stabilsten Cluster. Zu beachten ist, dass aufgrund des in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen maximalen Verbindungsgrads, kein `xOfTop` verwendet wurde, das größer als drei ist.

Statuswechsel

Wenn man die Statuswechsel je Minute bei $x = 1$ vergleicht, ist zu erkennen, dass die sofortige Sortierung die Zahl der Statuswechsel von 0,31 auf 0,2 je Minute verringert. Bei $x = 2$ verringert sich der gemessene Wert um 0,01 von 0,12 auf 0,11 Clusterwechsel je Minute. Bei $x = 3$ ist kein Unterschied mehr zu erkennen.

Für $x \leq 2$ sollte daher die Sortierung sofort erfolgen, wenn die Stabilität der Cluster erhöht werden soll. Verwendet man $x = 3$, dann spielt die Sortierung scheinbar keine Rolle mehr.

Verbindungszeit

Der Tabelle 6.5 lassen sich sowohl die gemessenen Verbindungszeiten für die simulierten Netze als auch die Ausfallrate der Verbindung entnehmen. Hier fällt auf, dass die spätere Sortierung zu mehr Ausfallzeiten führt als die sofortige Sortierung. Mit $x = 3$ ist die Verbindungszeit von 96,02 % der späteren Sortierung geringer als die geringste Verbindungszeit von 97,64 % im Fall sofortiger Sortierung (mit $x = 1$).

Insgesamt liefert die spätere Sortierung verhältnismäßig hohe Ausfallraten, die eine stabile Kommunikation nur bedingt ermöglichen. Eine Ausfallrate von 0,71 % entspricht einer Ausfallzeit von 25,56 Sekunden je Stunde.

Daher sollte auch bezüglich der Ausfallzeit die Sortierung sofort erfolgen und Verbindungen zu drei Leitstationen gleichzeitig unterhalten werden, um die Leistungsfähigkeit des Kommunikationsnetzes zu maximieren.

Effizienz der Master Aircraft

Zur Betrachtung der Effizienz der Leitstationen wird u. a. die Zeit, die ein Cluster Mitglieder hat in das Verhältnis mit der Zeit als Leitstation gesetzt und betrachtet (siehe Gleichung 5.1).

Im folgenden werden zur Bestimmung der Effizienz auch sowohl die Anzahl der Luftfahrzeuge betrachtet, die im Laufe eines Simulationslaufs mindestens einmal als Leitstation fungiert haben, als auch der Höchstwert, den eine Clustergröße erreicht hat.

Es fällt auf, dass desto mehr Leitstationen im System einmal im Zustand einer Leitstation sind, je kleiner x ist. Gleichzeitig sinkt mit kleiner werdendem x die Zeit, in der ein Cluster Mitglieder hat. Mit $x = 1$ und sofortiger Sortierung, beträgt das Zeitverhältnis mit Mitgliedern nur 55,94 %. Es werden also Leitstationen gebildet, die in bis zu 44 % ihrer Zeit als Leitstation von keiner Folgestation als Leitstationen genutzt werden. Dies bedeutet auch, dass die Leitstationen während dieser Zeit nicht verbunden waren. Ein geringes Verhältnis ist daher unerwünscht. Es lässt sich erkennen, dass die sofortige Sortierung allgemein zu einer höheren Effizienz führt. Das beste Resultat liefert $x = 3$ mit 99,43 %. Interessanterweise sind für $x = 3$ die Messergebnisse bei sofortiger und späterer Sortierung in allen Werten identisch. Für $x = 3$ spielt die Sortierung somit keine Rolle.

Betrachtet man nun die maximal erreichte Größe der Cluster, so sieht man, dass in keinem Fall die maximal erlaubte Größe von 20 Clustermitgliedern erreicht wurde. Die simulierten Cluster hatten maximal zehn Mitglieder. Dies ist insbesondere für die zuvor diskutierten Fälle interessant, in denen die Effizienz bei 99,43 % lag. Es kann somit festgestellt werden, dass eine hohe Auslastung der Leitstationen nicht zum Erreichen eines Engpasses führte. Die gewählten Parameter sind insofern miteinander verträglich.

Betrachtet man nur die Effizienz der Leitstationen, so wird $x = 3$ ungeachtet der Sortierung empfohlen. Unter Berücksichtigung der Messungen für Clusterwechsel, Statuswechsel und Verbindungszeit liefert die sofortige Sortierung im Kombination mit $x = 3$ die höchste Leistung.

6.2.3 Variation von α im SQUC-Kriterium

Es sei `airClusterSim.airHost[*].nic.mac.alpha` $\in \{0,5; 1,0; 1,5; 2,0\}$

In den Simulationsläufen wurden auch verschiedene Werte für α im SQUC-Kriterium eingesetzt. In den Messergebnissen sind keine Unterschiede zu erkennen, da sie identisch sind. Daraus kann die Folge gezogen werden, dass ein konstanter Wert für α keinen Beitrag zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit oder Stabilität des Clusterings leistet. Variable Funktionen als α waren im Entwurf nicht vorgesehen. Diese könnten in einer anderen Arbeit betrachtet werden.

6.2.4 Schlussfolgerung

Zur Erreichung der maximalen Leistungsfähigkeit und Stabilität des Systems sollten $x = 3$ und sofortige Sortierungen verwendet werden.

6.3 Szenario 3: Auswirkung der Flugbewegung

In einem dritten Szenario, das dem vorherigen ähnelt, wird die Leistungsfähigkeit des Systems unter der Verwendung der drei vorgegebenen Bewegungsmodelle untersucht. Gegenüber dem zweiten Szenario wird das Bewegungsmodell variiert und die Simulationszeit auf 3600 Sekunden ausgedehnt, so dass nun eine Langzeitmessung vorliegt. Außerdem wird die Liste verfügbarer Leitstationen sofort sortiert und die Verbindung zu drei Leitstationen aufrecht erhalten. Nachfolgend sind die Änderungen an `omnet.ini` aufgelistet.

```
sim-time-limit = 3600s
airClusterSim.airHost[*].nic.mac.sortImmediately = true
airClusterSim.airHost[*].nic.mac.xOfTop = 3
```

6.3.1 Beschreibung des Szenarios (Flugbewegung)

Im ersten Simulationslauf bewegen sich die Flugzeuge nach dem `LinearAirMobility`-Bewegungsmodell mit Kursen wie sie dem ozeanischen Verkehr entsprechen. Die Luftfahrzeuge fliegen dabei mit einer Abweichung von $\pm 10^\circ$ Richtung Westen oder Osten.

Hierzu müssen in der Datei `AirHost.ned` das entsprechende Untermodul geladen werden und in `omnet.ini` der Bewegungswinkel gesetzt werden.

```
submodules:
    mobility: LinearAirMobility;

[Run 1]
description = oceanic mobility
**.airHost*.mobilityType = "oceanic"
**.airHost[*].mobility.angle = crossAngle(10, 0)
```

Die typische Flugbewegung für den polaren Fall wird dem zweiten Simulationslauf zugrunde gelegt. Die Luftfahrzeuge bewegen sich darin mit einem festen Kurs, der gleichverteilt im Bereich $[0, 360)$ liegt.

```
[Run 2]
description = polar mobility
**.airHost*.mobilityType = "polar"
**.airHost*.mobility.angle = uniform(0, 360)
```

Im dritten Simulationslauf wird das „Random Waypoint Mobility“-Modell verwendet, das auch schon in Szenario 1 (siehe Abschnitt 6.1) angewandt wurde. Hierfür muss nur in die Datei `AirHost.ned` das zu verwendende Modul geladen werden.

```
submodules:
    mobility: ConstAirSpeedMobility;
```

6.3.2 Ergebnisvergleich unterschiedlicher Bewegungsmodelle

Die Ergebnisse dieser drei Simulationsläufe sind in Tabelle 6.6 zusammengefasst und werden im weiteren erläutert und diskutiert.

| Bewegungsmodell | ozeanisch | polar | Wegpunkt |
|---------------------------|-----------|-------|----------|
| Clusterwechsel absolut | 462 | 532 | 672 |
| Clusterwechsel/Minute | 0,16 | 0,19 | 0,25 |
| Statuswechsel absolut | 125 | 159 | 122 |
| Statuswechsel/Minute | 0,07 | 0,06 | 0,08 |
| Verbindungszeit (%) | 99 | 98,87 | 99,1 |
| Verbindungsausfall (%) | 0,9987 | 1,13 | 0,9 |
| Effizienz der Master (%) | 98,27 | 87,92 | 94,59 |
| Master Aircraft insgesamt | 28 | 41 | 27 |
| erreichte Clustergröße | 14 | 10 | 12 |
| Bewegungsänderungen | 26 | 58 | 101 |

Tabelle 6.6: Stabilität während 3600 Sekunden (1 Stunde)

Clusterwechsel

Wie aus Tabelle 6.6 ersichtlich ist, erfolgen bei ozeanischer Flugbewegung mit 0,16 die wenigsten Clusterwechsel je Luftfahrzeug und Minute. Bei polarer Bewegung erhöht sich diese Rate auf 0,19. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich bei dieser Bewegungsart die Zahl der Bewegungsänderungen zugleich mehr als verdoppelt hat.

Diese erfolgen, wenn ein Luftfahrzeug die Kante des Simulationsfelds erreicht hat und bei unveränderter Bewegungsrichtung auf die gegenüberliegende Seite projiziert wird. Im polaren Fall wurden im gesamten System 58 Bewegungsänderungen vorgenommen. Dies lässt sich durch die Form des Simulationsfelds erklären. Während im ozeanischen Fall (mit 26 Bewegungsänderungen) meist an der linken oder rechten Kante gespiegelt werden, da die Flugzeuge von Osten nach Westen oder umgekehrt fliegen, fliegen im ozeanischen Szenario die Luftfahrzeuge in alle Richtungen, so dass wesentlich mehr Flugzeuge auch die obere und untere Kante erreichen, die aufgrund der Ausmaße von 2000×1000 näher beieinander liegen.

Im dritten Bewegungsmodell sind die meisten Clusterwechsel (0,25) zu erkennen. Die hohe Zahl der Bewegungsänderungen von 101 liegt in der Natur dieses Bewegungsmodells, da neue Wegpunkte zufällig angefliegen, sobald der alte Wegpunkt erreicht ist, der stets in den Grenzen des Simulationsfelds liegt (siehe auch Abschnitt 5.2.2).

Statuswechsel

Betrachtet man die absolute Zahl erfolgter Wechsel von Leitstation zur Folgestation oder umgekehrt (Statuswechsel), dann gab es im Wegpunkt-Modell mit 122 Statusänderungen die wenigsten Wechsel. Wenn man zudem aber auch berücksichtigt wie viele der beteiligten Flugzeuge zu einem Zeitpunkt der Simulation Leitstationen waren, so fällt auf, dass sich diese Statusänderungen auf 27 Flugzeuge beschränken. Bei polarer Bewegung verteilen sich die Statusänderungen immerhin auf 41 Flugzeuge. Insofern verteilen sich die Statuswechsel bei polarer Bewegung (0,06) besser als bei

ozeanischer (0,07) oder Wegpunkt-Bewegung (0,08). Die Unterschiede sind allerdings nicht sehr signifikant, so dass man davon ausgehen kann, dass die hier beschriebene Arbeit in Bezug auf die Statuswechsel in allen getesteten Bewegungsmodellen Anwendungen finden kann.

Effizienz der Master Aircraft

Die Effizienz der Leistationen wird wie in Abschnitt 6.2.2 gemessen. Man erkennt, dass im polaren Bewegungsmodell die Leitstationen im Durchschnitt zu fast 88 % von keiner Folgestation genutzt werden. Dies könnte daran liegen, dass kein anderes Flugzeug sich in Reichweite befindet, die Leitstation für keine Folgestation dem Clusterkriterium genügt oder nur Leitstationen in Reichweite sind. Durch Einführung der Brückenleitstation könnte die Effizienz der Leitstationen erhöht werden. Diese Einstellung wird in dieser Arbeit jedoch aus Zeitgründen nicht mehr untersucht. Im Fall polarer Bewegung beträgt das Verhältnis aus der Zeit mit Mitgliedern und der Zeit als Leistation 94,59 % und bei ozeanischer Bewegung 98,27 %, so dass hier zufriedenstellende Ergebnisse geliefert werden.

Verbindungszeit und Ausfallrate

Die kritischste Kennzahl zur Messung der Leistungsfähigkeit eines Kommunikationssystems ist die Verbindungszeit bzw. Ausfallrate. Wie aus Tabelle 6.6 ersehen werden kann, beträgt die Ausfallrate bei Wegpunkt-Bewegung 0,9 %. Dies entspricht 32,51 Sekunden Ausfall je Stunde. Bei ozeanischer Bewegung liegt die Ausfallrate bei 0,9987 % (35,95 Sekunden je Stunde) und bei polarer Bewegung beträgt sie 1,13 % (40,64 Sekunden je Stunde). Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass eine Verfügbarkeit von mehr als 99 % nicht garantiert werden kann. Angesichts der Aufgabenstellung und der Tatsache, dass ein hochmobiles Ad-hoc-Netz vorliegt, ist eine Verbindungsrate von 99 % ein durchaus akzeptables Ergebnis.

6.4 Zusammenfassung

Für große Netze liefert $p=0,25$ die schnellste Konnektierung. In kleinen Netzen kann auch $p=0,1$ verwendet werden. Die maximale Leistungsfähigkeit im Netz liefern die Einstellung zur sofortigen Sortierung und die Unterhaltung von Verbindungen zu mehreren (drei) Leitstationen ($x=3$). Die in dieser Arbeit eingeführte und verwendete Kommunikation mittels Clustering ist auf alle vorgestellten in der Luftfahrt üblichen Bewegungsmodelle anwendbar. Angesichts der Aufgabenstellung und der Tatsache, dass ein hochmobiles Ad-hoc-Netz vorliegt, ist eine Verbindungsrate von 99 % ein durchaus zufriedenstellendes Ergebnis.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war die Erweiterung eines in Planung befindlichen Kommunikationssystems für die Luftfahrt, das vom Konzept mit Basisstationen in einen Ansatz mit Bord-Bord-Kommunikation transformiert werden sollte. Hierzu mussten dedizierte Luftfahrzeuge als Leitstationen eingeführt werden, die die Bodenstation als weiterleitende Station ersetzen und gewisse Aufgaben der Bodenstation übernehmen. Neben den besonderen Begebenheiten und Bedingungen der Luftfahrt musste auch das asynchrone Verbindungsschema mit getrennten Senderichtungen (Forward Link und Reverse Link) des B-VHF-Systems berücksichtigt und an die Bord-Bord-Kommunikation angepasst werden. So mussten die Leitstationen in die Lage versetzt werden, wie eine Bodenstation auf dem Forward Link zu senden und auf dem Reverse Link zu empfangen, um in die Lage versetzt zu werden mit anderen Luftfahrzeugen zu kommunizieren. Zu diesem Zweck wurde der Ansatz des Clusterings aufgegriffen und an die spezielle Kommunikationsumgebung angepasst. Die Leitstationen stellen in diesem Ansatz die Clusterköpfe dar, die die anderen Luftfahrzeuge als Clustermitglieder (sogenannte Folgestationen) in ihren Cluster aufnehmen. Zur Auswahl dieser Leitstationen wurde eine Bernoulli-Wahrscheinlichkeit p_L eingeführt, die darüber entscheidet, welches Luftfahrzeug sich zur Leitstation erklärt, wenn keine andere Leitstation verfügbar ist. Die Bestimmung der Leitstationen erfolgt somit zufällig gesteuert.

Da eine weiterreichende Kommunikation über die Bodenleitungen der Bodenstationen nicht mehr möglich ist, wurde außerdem ein Ansatz verfolgt, der die multihop-Kommunikation im selbstorganisierenden Streunetz ermöglicht. Hierzu wurden Brückenstationen eingeführt, die als Brückenfolgestationen mehrere Leitstationen oder als Brückenleitstationen Leitstationen mit Folgestationen verbinden können. Die Einbindung der Bodenstation in die Kommunikation wurde ebenso beschrieben wie die Behandlung verschiedener Problemfälle, die sich bei Nutzung des gemeinsamen Mediums „Äther“ im Funk ergeben können.

Des Weiteren wurde innerhalb eines Rahmenwerks ein Konzept für ein hybrides Wegwahlverfahren innerhalb dieses Kommunikationsnetzes entworfen, das in Abhängigkeit des Kommunikationsbereichs proaktive, positionsgestützte und reaktive Routingverfahren miteinander kombiniert. Insbesondere die lokale Routingebene wurde

an die hier entworfene Sicherungsschicht mit Clustering angepasst. Dort wurde die Kooperation und der Nachrichtenaustausch zwischen der Sicherungsschicht und der Netzwerkschicht eruiert, die zur Bildung von Kommunikationspfaden und zur Auswahl der Brückenstationen verwendet werden können. Die Erbringung der Dienstgüte (Quality of Service) wird erleichtert, jedoch nicht garantiert.

Das in dieser Arbeit zur Initialisierung der Clusternetzes beschriebene Verfahren wurde mittels Simulation getestet und durch die Wahl verschiedener Parameter optimiert. So zeigt sich, dass für große Netze eine Leitstationwahrscheinlichkeit von $p_L = \frac{1}{4}$ die schnellste Verbindungsrate ergibt, die sofortige Sortierung der verfügbaren Leitstationen nach dem Cluster-Kriterium „SQUC“ und die Aufrechterhaltung der Verbindungen zu mehreren (maximal drei) Leitstationen die höchste Stabilität in den Clusternetzen bewirkt. Es wurde außerdem gezeigt, dass mit den gewählten Parametern, unter denen das Kommunikationssystem seine höchste Leistungsfähigkeit erreicht, der in dieser Arbeit beschriebene Entwurf für selbstorganisierende Bord-Bord-Kommunikation bei den in der Luftfahrt üblichen Bewegungsmodellen (bei Überlandflügen bzw. Überseeflügen) eine Verbindungsausfallrate von ca. 1 % aufweist und somit für die Luftfahrt anwendbar ist.

Nicht simuliert wurden die Parameter zur Bestimmung von Brückenstationen und Brückenleitstationen, die dies den Rahmen einer Diplomarbeit überschritten hätte. Insbesondere die Untersuchung und Ermittlung Wahrscheinlichkeit für Brückenleitstationen ist eine interessante Aufgabe für eine weitere Arbeit.

Aspekte wie Netzsicherheit, Integrität, Authentizität, Vertraulichkeit und Ablaufplanung wurden nicht berücksichtigt und bieten daher genügend Raum für weitere Betrachtung und Forschung.

A. Konventionen der Luftfahrt

A.1 Maßeinheiten und Umrechnungen

| Maßeinheit | Umrechnung |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| 1 Flugfläche (FL) | 100 Fuß (bei Standardluftdruck) |
| 1 Fuß | 30,48 cm |
| 1 Nautische Meile (NM) | 1,852 km |
| 1 Knoten (kt) | 1 NM/h |
| Internationaler Standardluftdruck | 1013,25 hPa |

Tabelle A.1: Aeronautische Einheiten

A.2 Abkürzungen

| | |
|--------|--|
| A/C | Aircraft (englisch, deutsch: Luftfahrzeug) |
| AIRSEP | Air-to-air self-separation |
| AOA | Autonomous operations area |
| ADS-B | Automatic Dependent Surveillance Broadcast |
| BFS | Brückenfolgestation |
| BLS | Brückenleitstation |
| CPDLC | Controller Pilot Data Link Communication |
| FMS | Flight Management System |
| FS | Folgestation |
| GS | Ground Station |
| KS | Kontrollstation |
| LS | Leitstation |
| Lfz | Luftfahrzeug |
| ORP | Oceanic/polar and remote region |
| UKW | Ultrakurzwelle |
| VHF | Very High Frequency (UKW) |

Tabelle A.2: Abkürzungsverzeichnis

Literatur

- [Agge05] George Aggelou. *Mobile ad hoc networks : from wireless LANs to 4G networks*. McGraw-Hill. 2005.
- [AlJM05] Géraud Allard, Philippe Jacquet und Bernard Mans. Routing in Extremely Mobile Networks. Technischer Bericht 5539, INRIA Rocquencourt, März 2005.
- [BaPe02] Stefano Basagni und Chiara Petrioli. Multihop scatternet formation for Bluetooth networks. *IEEE 55th Vehicular Technology Conference, 2002. VTC Spring 2002.*, Band 1, May 2002, S. 424–428.
- [BCGS04] Stefano Basagni, Marco Conti, Silvia Giordano und Ivan Stojmenovic (Hrsg.). *Mobile ad hoc networking*. John Wiley. 2004.
- [BlBG05] Ljubica Blazevic, Jean-Yves Le Boudec und Silvia Giordano. A Location-Based Routing Method for Mobile Ad Hoc Networks. *IEEE Trans. Mob. Comput.*, 4(2), 2005, S. 97–110.
- [CaBD02a] Tracy Camp, Jeff Boleng und Vanessa Davies. A survey of mobility models for ad hoc network research. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2(5), 2002, S. 483–502.
- [CaBD02b] Tracy Camp, Jeff Boleng und Vanessa Davies. A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research. *Wireless Communication & Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications*, 2(5), September 2002, S. 483–502.
- [CaLW03] Zhijun Cai, Mi Lu und Xiaodong Wang. Channel Access-Based Self-Organized Clustering in Ad Hoc Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2(2), April-Juni 2003, S. 102–113.
- [ChHD04] Xiuzhen Cheng, Xiao Huang und Ding-Zhu Du (Hrsg.). *Ad hoc wireless networking*. Kluwer Academic Publishers. 2004.
- [Cram03] Curt Cramer. Bedarfsorientiertes gruppenmobilitätsbasiertes Clustering in mobilen Ad-hoc-Netzen. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), August 2003.
- [Deut01] Bundesrepublik Deutschland. Verordnung über die Betriebsdienste der Flugsicherung vom 17. Dezember 1992 (BGBl. I S. 2068), geändert durch Artikel 457 der Verordnung vom 29. Oktober 2001 (BGBl. I S. 2785). BGBl. I S. 2068, BGBl. I S. 2785, Oktober 2001.

- [dNfL06] Büro der Nachrichten für Luftfahrer. Luftfahrthandbuch / Aeronautical Information Publication der Bundesrepublik Deutschland, Deutsche Flugsicherung, 2006.
- [DuCM05] Greg Dunstone, Jim Cieplak und Chris Moody. ASTERIX Format for sharing ADS-B data in Asia Pacific Region. In *Third Meeting of Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) Study and Implementation Task Force (ADS-B TF/3)*. ICAO, März 2005.
- [Dude04] Dudenredaktion. *Duden, Die deutsche Rechtschreibung*, Band 1. Bibliographisches Institut, Mannheim. 23. Auflage, 2004.
- [FCOC06] Communications Operating Concept and Requirements for Future Radio System. Studie 1.0, EUROCONTROL / FAA, März 2006.
- [Flic01] Rainer Flicker. Eingabeinstrumente für Data-Link-Anweisungen zum Ersatz des Sprechfunks an modernen Fluglotsenarbeitsplätzen. Diplomarbeit, Institut für Luft- und Raumfahrt an der Technischen Universität Berlin, <http://www.ilr.tu-berlin.de/FF/download/eingabewerkzeuge.pdf>, April 2001.
- [Free96] Free Flight Action Plan, RTCA, August 1996.
- [Freq05] Frequentis. Interference on the B-VHF Overlay System. Report D-09, B-VHF Consortium, Mai 2005.
- [GeTs95] Mario Gerla und Jack Tzu-Chieh Tsai. Multicluster, mobile, multimedia radio network. *Wireless Networks*, 1(3), 1995, S. 255–265.
- [HoXG02] Xiaoyan Hong, Kaixin Xu und Mario Gerla. Scalable routing protocols for mobile ad hoc networks. *IEEE Network*, 16(4), jul/aug 2002, S. 11–21.
- [Ilya02] Mohammed Ilyas (Hrsg.). *The handbook of ad hoc wireless networks*. CRC Press. 2002.
- [IYKA⁺06] Michael Iordanakis, Dimitrios Yannis, Kimon Karras, Massimiliano Amirfeiz, Giorgio Colangelo und Stefano Baiotti. Ad-hoc Routing Protocol for Aeronautical Mobile Ad-Hoc Networks. In *5th International Symposium Communication Systems Networks and Digital Signal Processing*. University of Patras, Greece, Juli 2006.
- [Jepp06] Jeppesen. *Bottlang airfield manual : for VFR flights within Europe*, Jeppesen, Hildesheim, April 2006.
- [JGKB05] Sewook Jung, Mario Gerla, Csaba Kiss Kalló und Mauro Brunato. Decentralized optimization of dynamic Bluetooth scatternets. *The Second Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services, 2005. (MobiQuitous 2005)*., July 2005, S. 305–313.
- [KaSG03] Rohit Kapoor, M. Y. Medy Sanadidi und Mario Gerla. An Analysis of Bluetooth Scatternet Topologies. *IEEE International Conference on Communications, 2003. ICC '03.*, Band 1, Mai 2003, S. 266–270.

- [KaZG04] Rohit Kapoor, Andrea Zanella und Mario Gerla. A fair and traffic dependent scheduling algorithm for Bluetooth scatternets. *Mobile Networks and Applications*, 9(1), Feb 2004, S. 9–20.
- [Kjel98] Rikard Kjellberg. Capacity and Throughput using a Self Organized Time Division Multiple Access VHF Data Link in Surveillance Applications. Diplomarbeit, Dept. of Computer and System Sciences, University of Stockholm, April 1998.
- [MaWH01] Martin Mauve, Jörg Widmer und Hannes Hartenstein. A Survey on Position-Based Routing in Mobile Ad-Hoc Networks. *IEEE Network Magazine*, 15(6), November 2001, S. 30–39.
- [McZn99] A. Bruce McDonald und Taieb Znati. A Mobility-Based Framework for Adaptive Dynamic Cluster-Based Hybrid Routing in Wireless Ad-Hoc Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 17(8), Aug 1999, S. 1466–1487.
- [MiMi03a] Jelena Masic und Vojislav Masic. Bridges of Bluetooth county: topologies, scheduling, and performance. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 21(2), Feb 2003, S. 240–258.
- [MiMi03b] Vojislav B. Masic und Jelena Masic. Polling and Bridge Scheduling Algorithms in Bluetooth. Technischer Bericht 03/04, Dep. of Computer Science, University of Manitoba, <http://www.cs.umanitoba.ca/vmasic/pubs/tr0304.pdf>, Sep 2003.
- [MoSe02] Ian Moir und Allan Seabridge (Hrsg.). *Civil avionics systems*. AIAA education series. 2002.
- [MoSe04] Ian Moir und Allan Seabridge (Hrsg.). *Design and development of aircraft systems : an introduction*. AIAA education series. 2004.
- [MuMa04] C. Siva Ram Murthy und B. S. Manoj. *Ad Hoc wireless networks : architectures and protocols*. Prentice Hall. 2004.
- [NAaS05] National Aeronautics and Space Administration (Hrsg.). Technology Assessment for the Future Aeronautical Communications System. Contractor Report, ITT Industries and Glenn Research Center, Mai 2005.
- [Ogie04] R. Ogier. Topology Dissemination Based on ReversePath Forwarding (TBRPF, 2004).
- [PeMS04] K. Persson, D. Manivannan und M. Singhal. Bluetooth Scatternet Formation: Criteria, Models and Classification. *Consumer Communications and Networking Conference, 2004. CCNC 2004.*, Band 1, Jan 2004, S. 59–64.
- [Perk98] C. E. Perkins. Mobile Ad Hoc Networking Terminology. Internet Draft, IETF, November 1998.
- [Perk00] Charles Perkins (Hrsg.). *Ad hoc networking*. Addison-Wesley. 2000.

- [Rich01] M. Richharia. *Mobile satellite communications : principles and trends*. Addison Wesley. 2001.
- [SaHR05] Miodrag Sajatovic, Bernhard Haindl und Christoph Rihacek. B-VHF Operational Concept. Report D-07, B-VHF Consortium, www.b-vhf.org, Oktober 2005.
- [Schi03] Jochen Schiller. *Mobilkommunikation*. Addison-Wesley. 2003.
- [ShHu01] Ray E. Sheriff und Y. Fun Hu. *Mobile satellite communication networks*. John Wiley. 2001.
- [ShNa02] S. H. Shah und K. Nahrstedt. Predictive location-based QoS routing in mobile ad hoc networks. *IEEE International Conference on Communications, 2002. ICC 2002.*, Band 2, Mai 2002, S. 1022–1027.
- [SSSE⁺05] Miodrag Sajatovic, Michael Schnell, Judith Schwarzer, Max Ehammer, Carl-Herbert Rokitansky und Christoph Rihacek. B-VHF Functional Principles and Architecture. Report D-06, B-VHF Consortium, März 2005.
- [SuLG00] W. Su, S.-J. Lee und M. Gerla. Mobility prediction in wireless networks. *MILCOM 2000. 21st Century Military Communications Conference Proceedings*, Band 1, 2000, S. 491–495.
- [Varg05] András Varga. *OMNeT++ Discrete Event Simulation System User Manual*, 3.2. Auflage, März 2005.
- [Weni04] Kilian Weniger. *IP-Autokonfiguration in mobilen Ad-hoc-Netzwerken*. Aachen, Germany. ISSN 3-8322-3167-6, September 2004.
- [ZhCa02] Wensheng Zhang und Guohong Cao. A flexible scatternet-wide scheduling algorithm for Bluetooth networks. *IEEE*, April 2002, S. 291–298.