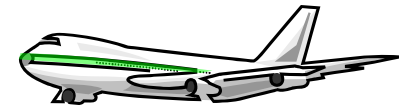


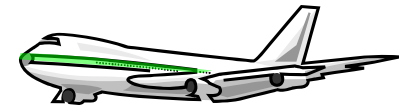
Selbstorganisierende Bord-Bord-Kommunikation für die Luftfahrt

Diplomarbeit
Juan C. Fries



Agenda

- Einleitung
- Anforderungen
- Randbedingungen
- Konzept zur Überführung des Systems
- Clustering / Streunetz
- Routing
- Implementierung der Simulation
- Simulationsgestützte Bewertung
- Zusammenfassung

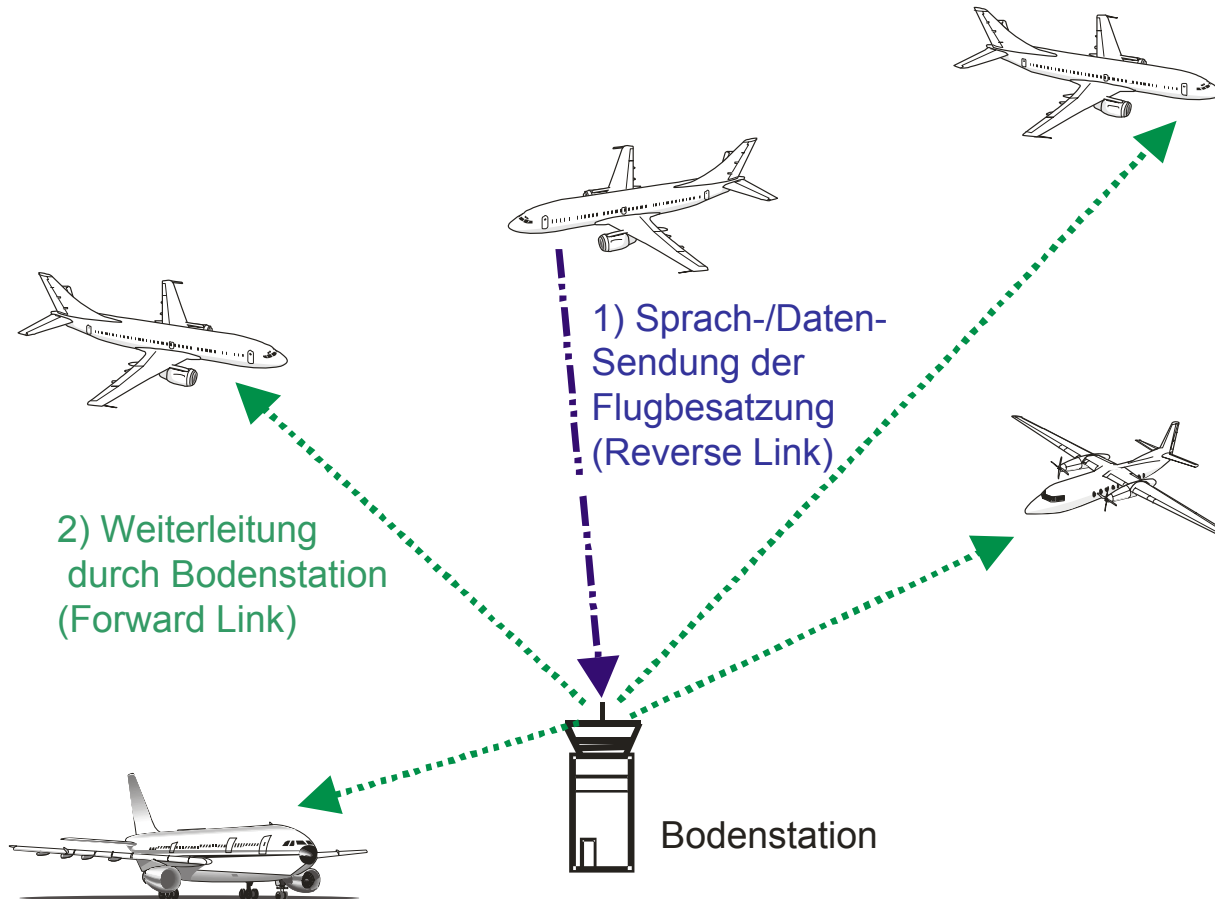


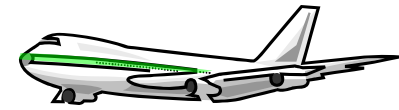
Einleitung

- Wachsender Flugverkehr auch über Ozeanen, Polarkappen und entlegenen Regionen mit geringer Flugsicherungsinfrastruktur
- Steigender Bedarf für Bord-Bord-Kommunikation durch neue Anwendungen (ADS-B, ASAS, AIRSEP, 4D Trajectory, Free Flight etc.)
- Überführung eines Kommunikationssystems (Broadband VHF) vom bodengesteuerten Ansatz zur Selbstorganisierung



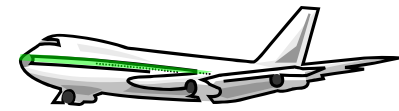
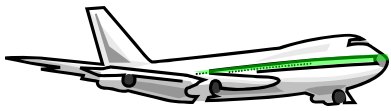
Indirekte Bord-Bord-Kommunikation über Bodenstation





Anforderungen

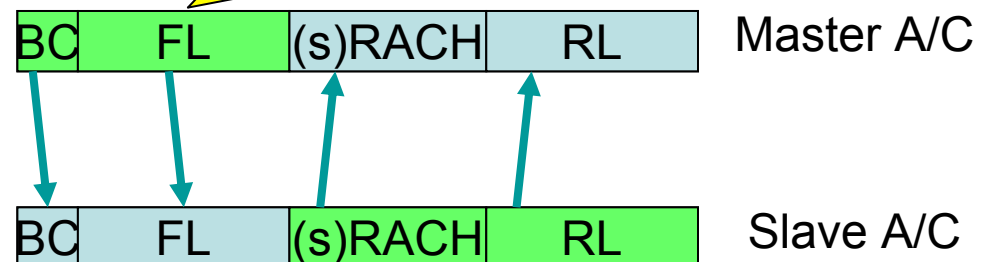
- Direkte Kommunikation zwischen Luftfahrzeugen unabhängig von Bodenstationen
→ Mobiles Ad-hoc-Netz (MANET)
- Mobilitätsbasiertes Clustering mit multi-hop-Verbindung und dediziertem „Master Aircraft“
- Konzept für Sicherungs- und Netzwerkschicht (MAC und Routing)
- Anpassung an Bedürfnisse der zivilen Luftfahrt



Randbedingungen

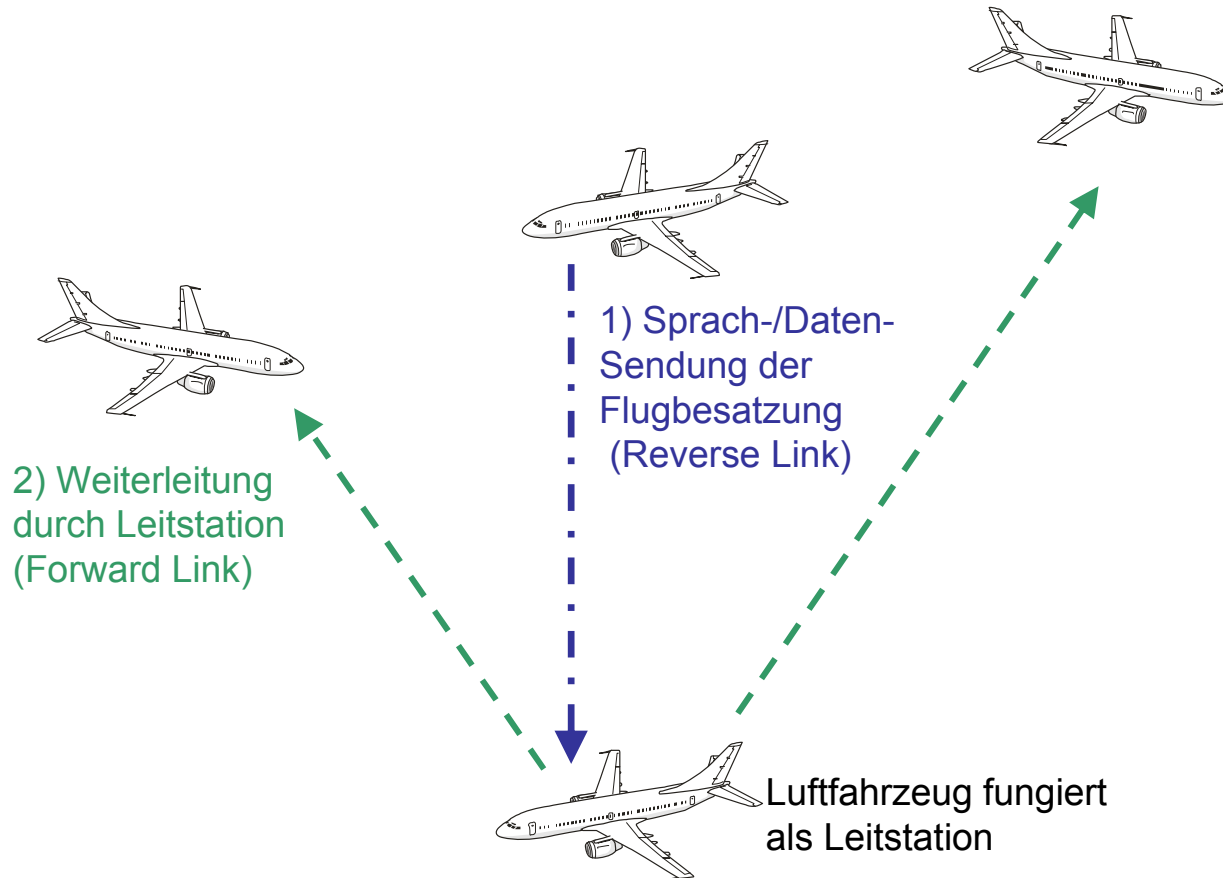
- Broadband VHF als Basis-System
- UKW-Reichweite ca. 500 nautische Meilen in (Flugfläche) FL400
- Quasi-optische Ausbreitung
- Relais-Modus: Kommunikation and Ressourcenbelegung durch Leitstation
- Herausforderung: asymmetrische Senderichtung Forward Link / Reverse Link

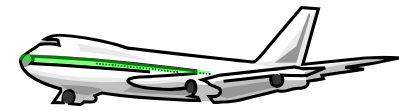
- Folgestation empfängt nur Leitstation
- Leitstation kann keine Leitstation hören



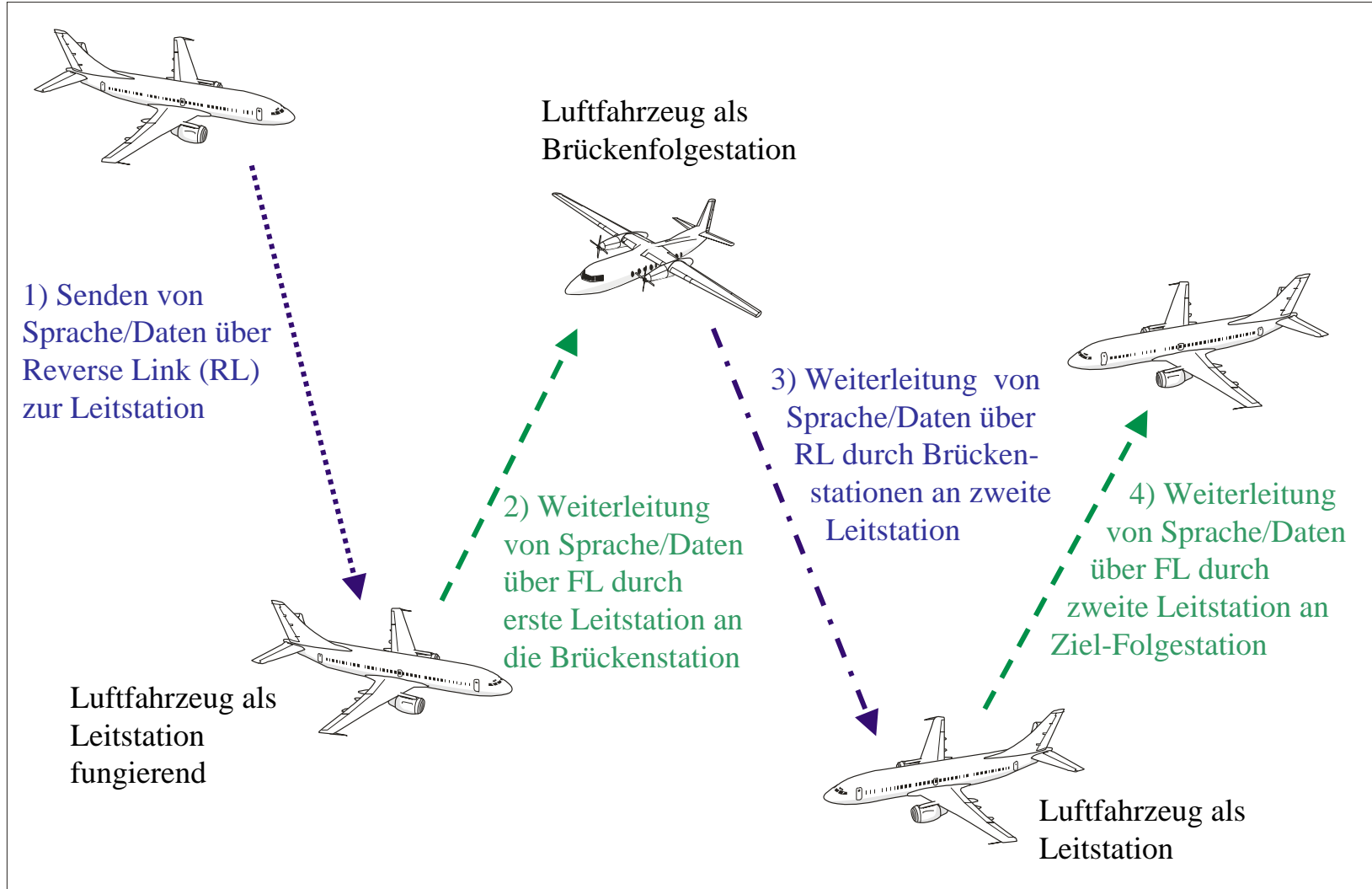


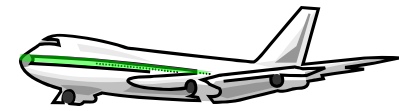
Indirekte Bord-Bord-Kommunikation über Leitstation



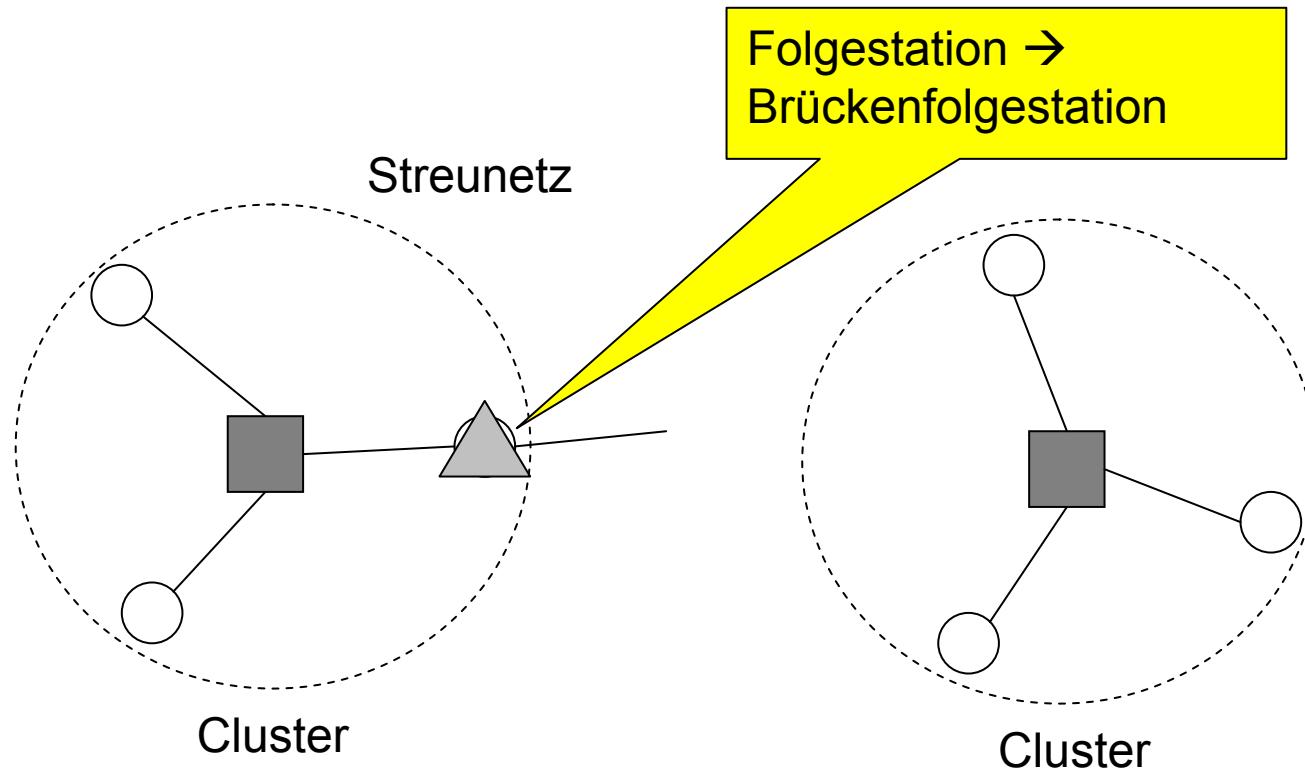


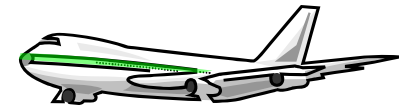
Multi-hop mit Brückenstation





Inter-Cluster- Verbindung





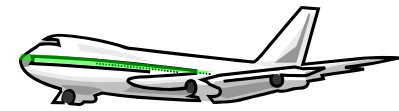
Cluster-Initialisierung

- Luftfahrzeug **tastet** BC Slots auf reservierten Frequenzen **nach Leitstationen ab**.
- Wenn keine Leitstation gefunden wurde, **erklärt es sich selbst zur Leitstation** mit Wahrscheinlichkeit p_L
- Sobald eine Leitstation im BC-Slot sendet, **melden sich** nicht gruppierte Luftfahrzeuge **bei Leitstation an**.
- Wenn mehr als eine Leitstation gefunden wurde, meldet sich das Luftfahrzeug bei der Leitstation mit dem besten Clusterkriterium an (SQUC: signal quality and uniformity criterion) → **stabiles Clustering**.
- SQUC: $c = \alpha \cdot \text{Signalstärke} / |\text{Signaldifferenz}|$

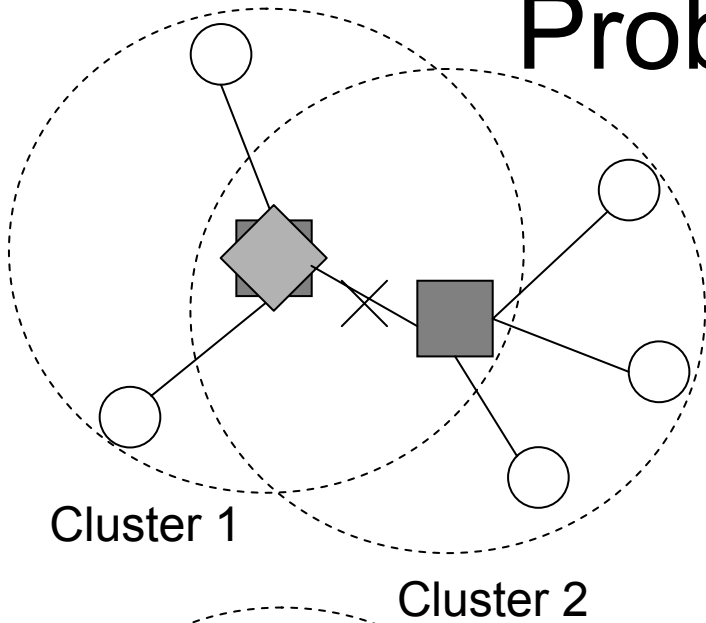


Pflege des Streunetzes

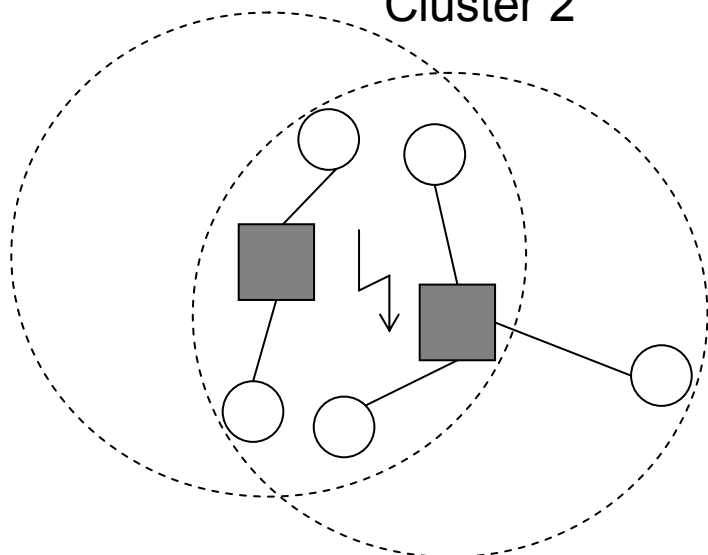
- Folgestation **hört** (während Hintergrundabtastung) alle **BC-Slots ab** und **sammelt Daten** über:
 - Signalstärke (Signalqualität)
 - Signalkonstanz (Verbindungsstabilität)
 - Kennung erreichbarer Luftfahrzeuge (Verbindungsqualität)
- Verbindungskriterien
 - Clustering: Beste Signalstärke und -Konstanz
 - Bridging: Beste Signalstärke und höchster Verbindungsgrad
- Brückenfolgestation kann sich bei bis zu **3 Leitstationen** anmelden.
- Brückenstation informiert die Leitstation über ihr **Wechselverhalten**.
- Folgestationen **reagieren dynamisch** auf Änderungen durch stetes Wechseln auf jeweils beste Leitstation.
- Eine Leitstation, die alle **Clustermittglieder verliert**, gibt den Status einer Leitstation auf, wird ungruppiert und **startet die Initialsuche**.



Weitere Problemlösungen



- Brückenleitstation: abwechselnd Leitstation für Cluster 1 und Folgestation in Cluster 2.
- Bei Kollisionen auf selbem BC-Slot, senden Folgestationen eine Störungsnachricht (interference message) auf RACH

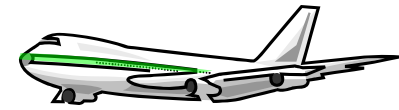




Rahmenwerk für das Routing

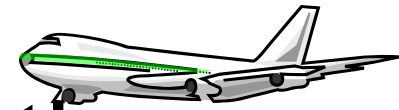
3-Schichten hierarchisches Routing

0. Intra-Cluster (auf MAC-Ebene)
1. Lokal: proaktiv (2-Cluster Reichweite)
2. Positionsgestützt (regional, skalierbar)
Vorschlag: Terminode Remote Routing mit
Predictive Location-based QoS Routing und
Restricted Local Flooding
3. Global: reaktiv (überregional)
basiert auf Lokationsdiensten der
Bodeninfrastruktur



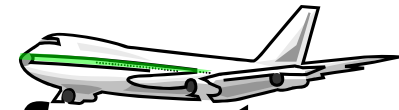
Lokales Routing

- Proaktives lokales Routing
 - ICAO Aircraft ID (24 bit) als eindeutige Kennung
 - Leitstation sammelt Kennungen seiner Clusterm Mitglieder und propagiert diese an die Brückenstationen.
 - Brückenstation propagiert diese Routinginformationen nur an seine direkt verbundenen Leitstationen.
→ 2-cluster range knowledge routing
- Robust gegenüber Positionsfehlern
- Aggregiert eine kleine Zahl von Teilnehmern
- Redundanz durch mehrere Brückenverbindungen



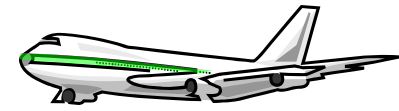
Implementierung/Simulation

- Mobility Framework 2 in OMNeT++
- Testreihen
 - 1: Variation von p_L
 - p_L in (0,1; 0,2; 0,25; 0,3; 0,4; 0,5)
 - 2: Clusterstabilität
 - Sofort sortieren = wahr / falsch
 - xOfTop in (1; 2; 3)
 - 3: Flugbewegung (variable Geschwindigkeiten)
 - Ozeanisch
 - Polar
 - Zufällige Wegpunkt-Navigation



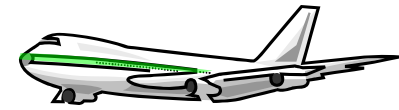
Ergebnisse zusammengefasst

- $p_L = 0,25$
 - Nach durchschnittlich fünf Scans sind alle Flugzeuge verbunden und die Anzahl der Leitstationen bleibt konstant.
- $xOfTop = 3$
 - Je mehr Anmeldungen an Leitstationen erfolgen dürfen, desto geringer ist die Ausfallzeit und die Leitstationen werden effizienter genutzt.
- Sofort sortieren
 - Drastischer Leistungsabfall durch spätere Sortierung
- Variation von (konstantem) α irrelevant



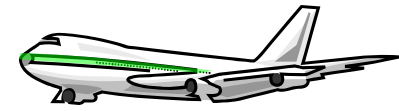
Vergleich der Flugbewegungen

	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 (%)	1 %	1,13 %	0,9 %
Effizienz der Leitstationen	98,27 %	87,92 %	94,59 %
Leitstationen insgesamt	28	41	27
Erreichte Clustergröße	14	10	12
Bewegungsänderungen	26	28	101



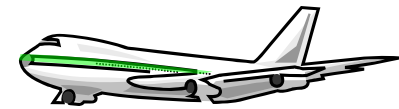
Zusammenfassung

- Mobilitätsbasiertes Clustering, das sich dynamisch an das hochmobile Bewegungsverhalten in der Luftfahrt anpasst.
- Rahmenwerk für hybrides Routing mit Integration durch lokales Routing.
- Multi-hop-Verbindung durch Brückenstationen.
- Ausfallrate von 1 % im selbstorganisierten Kommunikationskonzept bei typischem Flugbewegungsverhalten.
- Offen: Netzsicherheit und Ablaufplanung



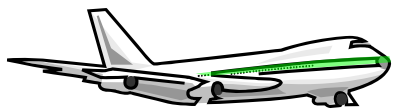
Fragen?



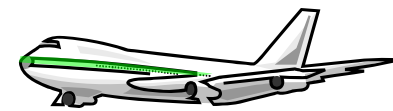


Position-assisted Routing

- TRR connects remote TLR zones
- TRR bit set, if destination is not TLR-reachable
- after TLR no TRR again → loop-free
- Anchored Geodesic Packet Forwarding (AGPF)
 - Position-based: routing considers current position (LDA).
 - On-demand: path-discovery with anchors
- Position-based QoS Routing (PLBQR)
 - Prediction of future position considering movement and propagation time at packet arrival
- Restricted Local Flooding (RLF)
 - Flooding of a packet to destination cluster and neighbored clusters before switching to TLR. (Handling high mobility)

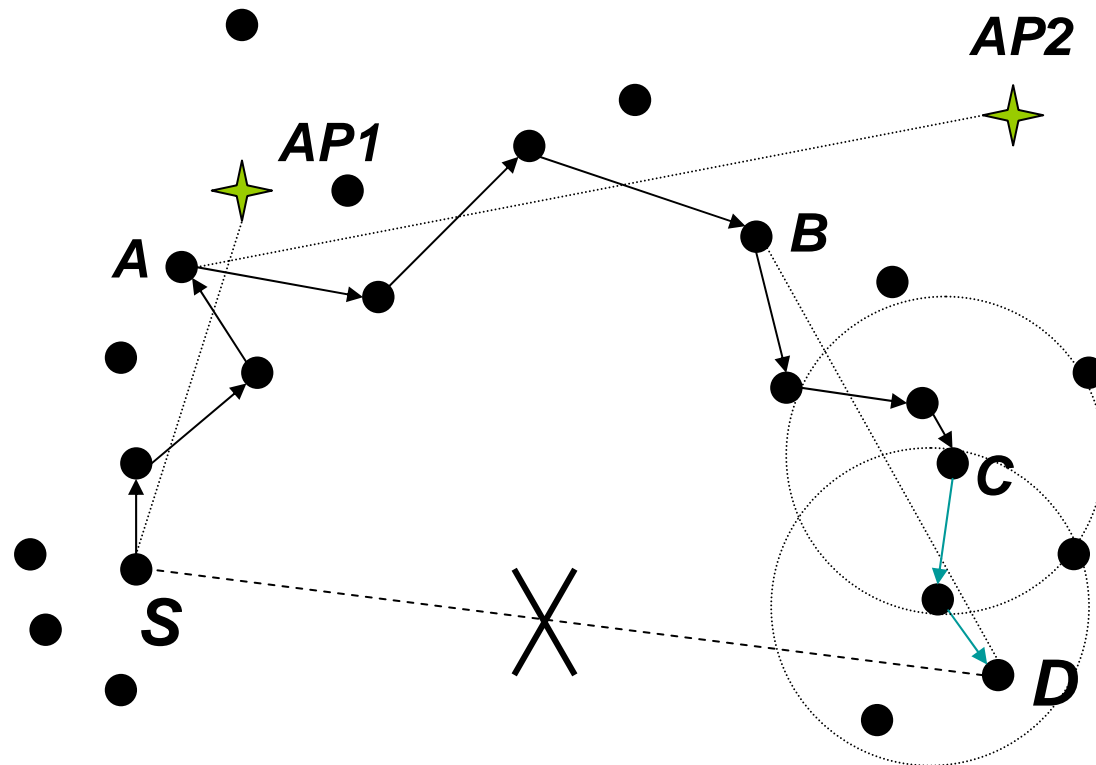


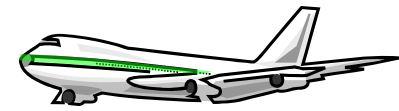
Anchored Geodesic



Packet Forwarding (AGPF)

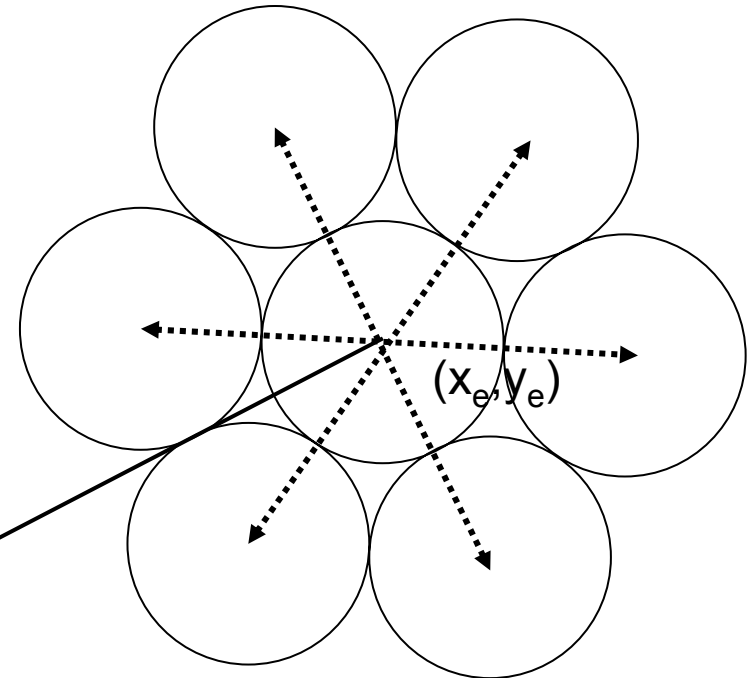
- S sets anchor point in path vector
- A removes AP1
- B removes AP2
- D is TLR-reachable for C





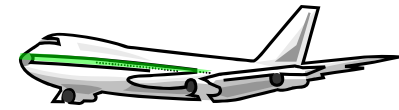
PLBQR and RLF

- Position-based QoS Routing (PLBQR)
 - Prediction of future position considering movement and propagation time at packet arrival
- Restricted Local Flooding (RLF)
 - Flooding of a packet to destination cluster and neighbored clusters before switching to TLR. (Handling high mobility)



(x_0, y_0)

$$\begin{aligned}x_e &= x + v (t_e - t) \cos \theta \\Y_e &= y + v (t_e - t) \sin \theta\end{aligned}$$



Anwendungen

- Flugsicherheit:
 - Autonome Selbst-Staffelung (ASAS)
 - mehr Effizienz durch Reduzierung der Abstände (lateral und longitudinal)
 - Weitere sicherheitsrelevante Daten (Wetter etc.)
- Navigation:
 - Free Flight, (wind-) optimale Routen
 - Electronic Flight Rules (EFR), ILS unabhängig
- Kommunikation:
 - Controller to Pilot Data Link Communications (CPDLC),
 - Airline Operations Communications (AOC),
 - Airborne Passenger Communications (APC),
 - Party-Line zwischen Flugbesatzungen