Sachbericht der Technischen Universität Hamburg (TUHH)

Berichtszeitraum: 01.07.2022 – 30.06.2025

SPONSORED BY THE

Federal Ministry of Education and Research

Titel	Sachbericht der Technischen Universität Hamburg (TUHH)
Inhalt	Sachbericht zum Abschlussnachweis
Zuwendungsempfänger	Technische Universität Hamburg
Förderkennzeichen	16KISK104
Teilvorhaben	6G-ANNA – 6G Sub-Netzwerke für aeronautische Anwendungen
Berichtszeitraum	01.07.2022 – 30.06.2025
Letztes Update	28.11.2025
Autoren	Hanna Werner, Stefan Neumann, Rainer Grünheid

© 2025 6G-ANNA

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzbericht 4
1.1 Anwendungsfall: Zuverlässige Funkkommunikation für Fluggeräte 4
1.2 Anwendungsfall: Passive Sensorik und Lokalisierung in der Flugzeugkabine 5
2 Eingehende Darstellung 6
2.1 Vermessung von aeronautischen Funkkanälen 6
2.2 Mehrantennentechniken 8
2.2.1 Vergleich unterschiedlicher Beamformer 8
2.2.2 Winkelunsicherheiten bei Beamformern 10
2.2.3 Quantisierung von Beamformern zur Interferenzvermeidung 10
2.2.4 Verbesserung der Handover-Prozedur durch Beamforming 12
2.3 Entwurf und Optimierung der Medium Access Control-Schicht 13
2.4 Vermessung von Funkkanälen in der Flugzeugkabine 15
2.5 Passive Sensorik und Lokalisierung in der Flugzeugkabine 17
2.5.1 OFDM-basierte Detektion von Passagieren mit Machine Learning 17
2.6 Unterstützung beim Proof of Concept für kritische Dienste 20
2.6.1 Advanced Security for Critical Services Proof-of-Concept 20
2.6.2 Quantisierung von Kanalinformation für kryptografische Zwecke 20
2.7 Einbettung in Gesamtprojekt und Zusammenarbeit mit Projektpartnern 22
3 Literaturverzeichnis 23

© 2025 6G-ANNA

1 Kurzbericht

Ziel dieses Teilprojektes war es, innovative Subnetze für die Flugzeug-Boden Kommunikation, sowie für flugzeug-interne Sensornetzwerke zu entwickeln und zu untersuchen. Dabei wurden Evaluationen hinsichtlich einer optimierten Luft-Boden Kommunikation durchgeführt (z.B. für die Entlastung der Piloten bei Routineaufgaben). Ebenso wurde in diesem Zusammenhang die optimierte Funkübertragung für Drohnen untersucht. Für Netzwerke in der Flugzeugkabine wurden Lokalisierungs-Lösungen und deren Genauigkeit bei der Detektion von Passagieren und Objekten betrachtet. Eine solche Lokalisierung kann den Ablauf und die Sicherheit beim Boarding sowie bei Turbulenzen während des Fluges verbessern. All diese Anwendungen wurden außerdem im Kontext der Subnetz-Integration eines zukünftigen 6G-Standards analysiert. Dieser Kurzbericht dient der zusammenfassenden Darstellung der untersuchten Inhalte. Dabei wird auf die Ergebnisse des gesamten Zeitraums des Vorhabens vom 01.07.2022 bis zum 30.06.2025 eingegangen.

1.1 Anwendungsfall: Zuverlässige Funkkommunikation für Fluggeräte

Im Bereich „Zuverlässige Funkkommunikation für Fluggeräte“ wurden Szenarien für die Luft-Boden Kommunikation zwischen einem Fluggerät und einer Basisstation am Boden evaluiert. Dabei wurde die Funkverbindung auf Basis der für 6G untersuchten Technologien analysiert. Abbildung 1 zeigt mögliche Kommunikationsverbindungen zwischen z.B. einer Drohne und der Basisstation oder einem Flugzeug und der Basisstation, wobei beide Kommunikationspfade, zum und vom Fluggerät (Down- bzw. Uplink), betrachtet werden.
Die Anwendungen, die von dieser Funkverbindung Gebrauch machen können, sind potenziell missions- bzw. sicherheitskritisch. Daher gelten für eine derartige Kommunikation sehr strenge Anforderungen hinsichtlich der Zuverlässigkeit und tolerierbaren Verzögerungen, welche über den Gebrauch von Funktechnologien für private Nutzer weit hinaus gehen.

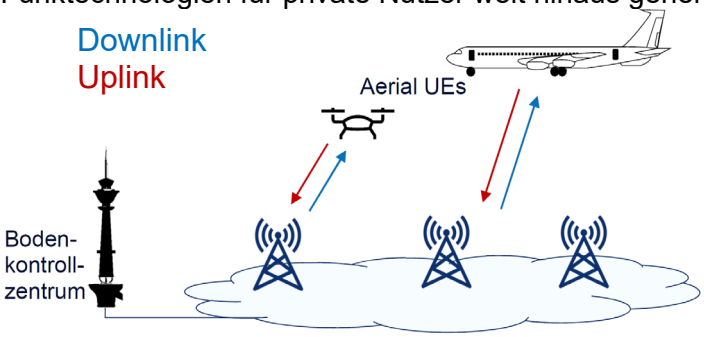

Abbildung 1: 6G-Verbindung für Kommunikation zwischen Bodenkontrollzentrum und Funkknoten (Aerial UEs) an Bord von Fluggeräten.

Innerhalb des Anwendungsfalls wurden mehrere Aspekte untersucht. Zunächst wurde Orthogonal Time Frequency Space Modulation (OTFS) als Übertragungsverfahren der physikalischen Protokollschicht für Szenarien mit hoher Mobilität evaluiert. Gegenüber Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) hat OTFS den prinzipiellen Vorteil, weniger anfällig für Frequenzaufspreizungen aufgrund des Dopplereffekts bei hohen Geschwindigkeiten zu sein. Durch die hohen Geschwindigkeiten von Flugzeugen ergibt sich hier ein entsprechendes Anwendungsszenario für die Luft-Boden-Kommunikation. Hierbei wurden verschiedene Aspekte bezüglich der Verarbeitung von OTFS-Signalen untersucht. Zum einen wurde die Schätzung der Funkübertragungsstrecke analysiert. Hierbei hat sich eine gute Performance beim Überabtasten des Signals im Doppler-Bereich gezeigt, wenn die auftretenden Dopplerfrequenzen ausreichend trennbar sind. Zur zeitlichen Synchronisation

© 2025 6G-ANNA

des OTFS-Signals wurde ein korrelationsbasiertes Verfahren eingesetzt. Um in der entsprechenden Korrelationsmetrik eine deutlicher erkennbare Amplitudenspitze zu erhalten, wurde die ursprünglich verwendete Pilotsequenz mit speziellen Codes (Pseudo-Rauschsequenzen) multiplikativ überlagert. Diese Modifikation hat sich als sehr vorteilhaft für die Robustheit und Genauigkeit der zeitlichen Synchronisation herausgestellt.
Darüber hinaus wurde die Kommunikation von einer dedizierten Bodenstation mit Flugzeugen im Landeanflug untersucht. Hier stellt eine leicht nach oben geneigte Ausrichtung der Antennen der Basisstation in Kombination mit räumlichem Multiplexing (zur gleichzeitigen Versorgung mehrerer Flugzeuge) eine vielversprechende Lösung für die Vielfachzugriffs (MAC)-Protokollschicht im Uplink dar.
Im Bereich der Boden-Luft-Kommunikation wurde außerdem die Interferenzvermeidung sowie -reduzierung auf der Flugroute evaluiert. Das Flugzeug wird im Normalfall von einer einzelnen Bodenstation versorgt. Durch die erhöhte Position besteht allerdings auch eine Sichtverbindung zu u.U. vielen anderen Bodenstationen, deren Sendesignale durch die Nebenkeulen der Antennencharakteristik zu Störungen am Flugzeug führen. Zur Verbesserung des Signal-zu-Interferenz-Verhältnisses wurde die Empfangscharakteristik der Antenne am Flugzeug durch Beamforming angepasst. Durch die Anwendung einer Fensterfunktion können die Interferenzen unterdrückt werden. Allerdings besteht bei hoher räumlicher Dichte der Bodenstationen die Gefahr, starke Interferenzen in der Hauptkeule zu empfangen. Ebenso wurde gezeigt, dass die gezielte Platzierung von Nullen in der Empfangscharakteristik auch zu einer geringeren Interferenz und damit zu einer höheren Verfügbarkeit der Verbindung führt. Hierbei muss allerdings mit Verzerrungen der Hauptkeule gerechnet werden. Für eine detaillierte Beschreibung des Anwendungsfalls „Zuverlässige Funkkommunikation für Fluggeräte“ können die Zwischenberichte aus den Jahren 2023 [1] und 2024 [2] und der Meilensteinbericht von Arbeitspaket 3 [3] aus dem Jahr 2025 herangezogen werden.

1.2 Anwendungsfall: Passive Sensorik und Lokalisierung in der Flugzeugkabine

Beim Anwendungsfall „Passive Sensorik und Lokalisierung in der Flugzeugkabine“ wurde ein 6G-System untersucht, welches Radar-Sensorik in ein Kommunikationssystem integriert.

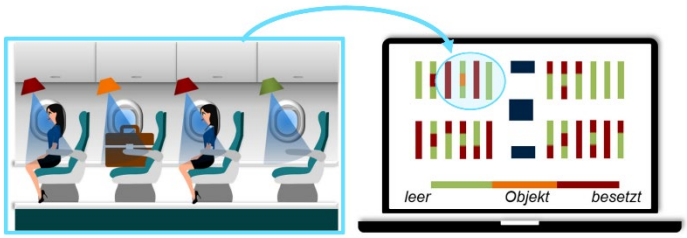

Abbildung 2: Detektion von sitzenden Passagieren in einer Flugzeugkabine.

Dabei kann das Kommunikationssystem Aufgaben im Bereich Entertainment bereitstellen oder Informationen über den Flug übertragen. Die Integration des Radarsystems ermöglicht z.B. die Erfassung von Passagieren (siehe Abbildung 2), um im Fall von Turbulenzen sicherzustellen, dass sich alle Personen auf ihren Sitzplätzen befinden. Hierbei werden die Mehrwegepfade der Ausbreitung im Flugzeug genutzt, um Informationen über das Umfeld der Funkwellen zu erhalten. Zur Auswertung werden Neuronale Netze eingesetzt, welche die verschiedenen Mehrwegekomponenten mit Trainingsdaten vergleichen und so eine Auswertung des Belegungszustands des Flugzeugs ermöglichen. In Simulationen hat sich herausgestellt, dass so auch mit einer geringen Bandbreite gute Ergebnisse in der Radaranwendung erzielt werden können. Bei Messungen in der Flugzeugkabine wurde gezeigt, dass in den Funksignaturen bei unterschiedlichen Sitzbelegungen deutliche Unterschiede erkennbar sind, was die Simulationsergebnisse validiert.

© 2025 6G-ANNA

2 Eingehende Darstellung

Die eingehende Darstellung beschreibt nun genauer die erfolgten Untersuchungen bezogen auf die vereinbarten Arbeitspakete.

Die behandelten Arbeitspakete umfassen:

- Arbeitspaket II „Vermessung von aeronautischen Funkkanälen“
- Arbeitspaket IV.2 „Mehrantennentechniken“
- Arbeitspaket V „Entwurf und Optimierung der Medium-Access Control-Schicht“
- Arbeitspaket VI „Vermessung von Funkkanälen in der Flugzeugkabine“
- Arbeitspaket VII „Passive Sensorik und Lokalisierung in der Flugzeugkabine“
- Arbeitspaket VIII „Unterstützung beim Proof of Concept für kritische Dienste“

Die folgenden Abschnitte sind entsprechend der genannten Arbeitspakete gegliedert. Dabei werden die verfolgten Ansätze und erzielten Ergebnisse des gesamten Projektverlaufs dargestellt.

2.1 Vermessung von aeronautischen Funkkanälen

Zur Vermessung von aeronautischen Funkkanälen wurde im Jahr 2023 der Kauf von spezieller Hardware abgeschlossen. Dazu zählen ein sogenanntes „Software Defined Radio“ (SDR) vom Typ E312 von USRP und ein Quadcopter der Marke Premium Modellbau, welcher in Abbildung 3 gezeigt wird. Der Quadcopter wurde ausgewählt, um das SDR als Nutzlast für entsprechende Messungen zu tragen.

Abbildung 3: PM Q800 Quadcopter für Funkkanalmessungen (Bildquelle: [4]).

Beim ersten Drohnenflug am 14.06.2024 konnten nach sorgfältiger Vorbereitung und Klärung der rechtlichen Rahmenbedingungen die ersten Versuche auf dem Flugplatz des MFC Süderelbe e.V. erfolgreich gestartet werden (vgl. Abbildung 4). Dabei wurden wertvolle Erfahrungen mit der eingesetzten Hardware gesammelt. So zeigte sich, dass Windgeschwindigkeiten von über 30 km/h bei großen Drohnen mit höherer Nutzlast eine besondere Herausforderung darstellen, insbesondere bei begrenzten Steuerungserfahrungen. Zudem konnte eine Störquelle durch die Magnethalterung identifiziert werden, die zum Ausfall der Steuerung führte. Diese Erkenntnisse ermöglichten eine gezielte Optimierung für die weitere Messkampagne.

© 2025 6G-ANNA

Abbildung 4: Erster Flugtest auf dem Flugplatz des MFC Süderelbe e.V.

Für den zweiten Termin am 16.04.2025 (siehe Abbildung 5) stand nach umfangreicher Vorbereitung ein dediziertes Privatgelände in Ehestorf (Rosengarten) zur Verfügung. Die gewonnenen Erkenntnisse aus dem ersten Flug wurden dabei konsequent berücksichtigt. Nach erfolgreichen Vortests traten erneut Steuerungsprobleme auf, die zu einem Absturz führten. Trotz der Schäden an der Drohne konnte das Messvorhaben jedoch flexibel angepasst werden: Die Messungen wurden am Boden durchgeführt, wobei durch leichte Höhenunterschiede zwischen Sender und Empfänger die Bedingungen eines Drohnenflugs realitätsnah nachgebildet wurden.

Abbildung 5: Test der Funktionalität der Drohne beim zweiten Drohnenflug.

Aus den durchgeführten Messkampagnen zeigt Abbildung 6 beispielhaft einige Teilergebnisse, indem der Anstieg des Pfadverlusts über der Distanz aufgetragen ist. Aufgrund der direkten Sichtverbindung sind die Resultate mit echten Drohnenmessungen vergleichbar. Die Limitierung durch den nicht exakt bestimmbaren Antennengewinn wurde dokumentiert und bietet eine wichtige Grundlage für zukünftige Optimierungen.

© 2025 6G-ANNA

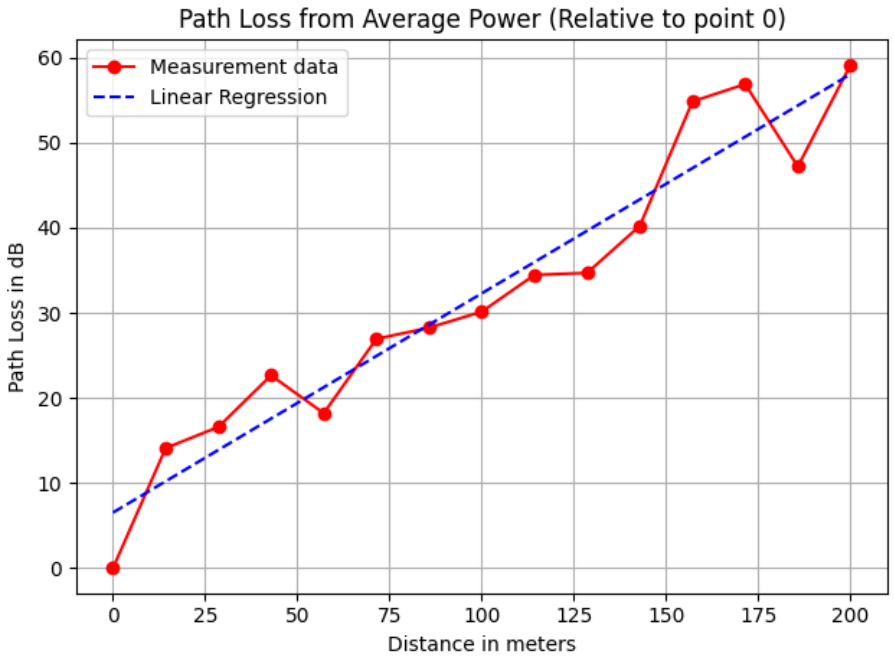

Abbildung 6: Pfadverlust ("Path Loss") in Dezibel in Abhängigkeit der Distanz.

Zusammenfassend konnten in diesem Arbeitspaket trotz technischer Herausforderungen wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden. Besonders hervorzuheben sind die Erfahrungen im Umgang mit den umfangreichen rechtlichen Rahmenbedingungen für Drohnenflüge sowie die praxisnahen Einsichten in den Betrieb einer Modellbaudrohne mit schwerer Nutzlast. Die flexible Anpassung der Messstrategie ermöglichte dennoch einige aussagekräftige Ergebnisse zu charakteristischen Funkkanaleigenschaften und bildet damit eine Basis für weiterführende Arbeiten.

2.2 Mehrantennentechniken

Im Arbeitspaket Mehrantennentechniken wurden verschiedene Aspekte bezüglich der Interferenzvermeidung bei Sichtverbindung zu vielen Bodenstationen in der Luftfahrt untersucht. Die Relevanz des Arbeitspakets ergibt sich aus einer von 3GPP durchgeführten Studie [5], welche nahelegt, das künftige Datenübertragungen in der Luftfahrt bestehende terrestrische Frequenzbänder nutzen werden. Wenn ein Flugzeug eine Verbindung zu einer terrestrischen Basisstation aufbaut, wird es mit hoher Wahrscheinlichkeit aufgrund der Sichtverbindung zu vielen anderen Bodenstationen zu störenden Interferenzen kommen. Mehrantennentechniken, insbesondere die Beeinflussung der Empfangscharakteristik der Antenne und verbesserte Handover-Prozeduren, stellen vielversprechende Ansätze zur Interferenzvermeidung dar und wurden in diesem Arbeitspaket untersucht.

2.2.1 Vergleich unterschiedlicher Beamformer

Mithilfe von adaptiven Beamformern soll ein Strahlungsmuster erzeugt werden, das ein günstiges Signal-zu-Interferenz-und-Rauschleistungsverhältnis (SINR) liefert. Insbesondere wurden drei Techniken untersucht. Abbildung 7 veranschaulicht die verschiedenen Verfahren. Die erste Technik ist „Null-Steering“, bei dem die Störsignale aus bestimmten Richtungen mithilfe eines kleinste-Quadrate-Ansatzes unterdrückt werden. Der „Minimum Variance Distortionless Response (MVDR) Beamformer“ [6] maximiert dagegen das SINR bei perfekter Kanalkenntnis. Das Verfahren weist jedoch aufgrund von Matrixinversionen potenziell eine hohe Rechenkomplexität auf. Die dritte Methode umfasst die Verwendung von Fensterfiltern

© 2025 6G-ANNA

wie dem Dolph-Chebyshev-Fenster. Dadurch lässt sich die Nebenkeulenstärke reduzieren, allerdings auf Kosten einer größeren Hauptkeulenbreite.

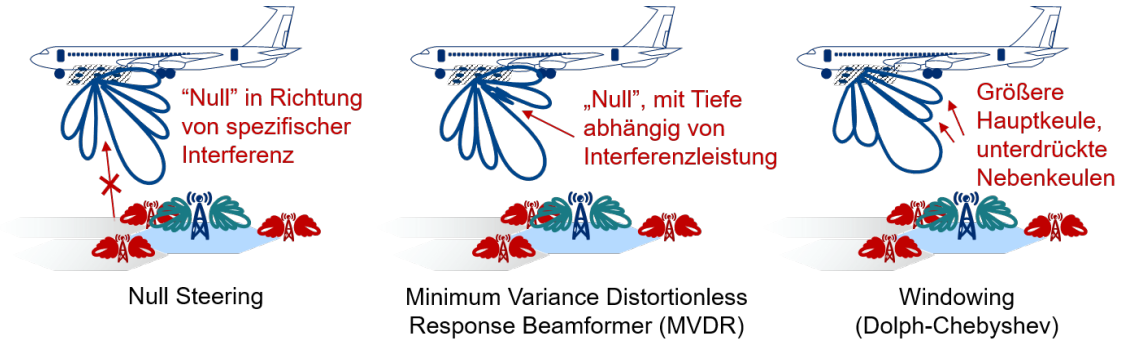

Abbildung 7: Adaptive Beamformer zur Verbesserung des SINR.

Als Vergleichsgrundlage dient Maximum-Ratio-Combining (MRC) Beamforming. Dabei wird der konjugierte Array-Antwortvektor als Beamformer verwendet, um den Gewinn in der Zielrichtung zu maximieren. In den Simulationen wurde die Verfügbarkeit (Availability) während des Szenarios gemessen, indem der Anteil der Zeit ermittelt wurde, in der ein bestimmter SINR-Schwellenwert überschritten wurde (um somit eine bestimmte Dienstanforderung zu erreichen). Dies wurde mit der Verfügbarkeit verglichen, die bei der Nutzung der adaptiven Beamformer erzielt wurde, mit MRC-Beamforming als Referenzmethode. Es wird angenommen, dass der Beamformer jeweils perfekte Kenntnisse über die Positionen und Leistungen der Basisstationen hat. Ergebnisse aus Simulationen mit realen Flugtrajektorien in Frankreich sind in Abbildung 8 dargestellt.

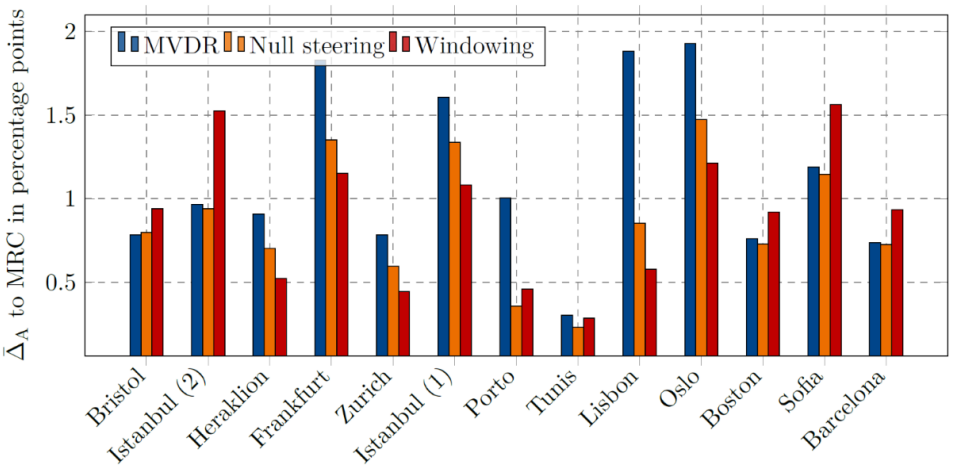

Abbildung 8: Unterschied $\bar{\Delta}_A$ der Verfügbarkeit (Availability) in Prozentpunkten der betrachteten Beamformer im Vergleich zum MRC-Beamforming für verschiedene Flugtrajektorien.

Darüber hinausgehend zeigen weitere detaillierte Resultate, dass Windowing in Szenarien angewendet werden kann, in denen sich die bedienende Basisstation in der Breitseite des Antennenarrays befindet und die Störer im Endfeuerbereich konzentriert sind. Der MVDR-Beamformer zeigt den größten Gewinn in weniger günstigen Szenarien, da er Interferenzen reduzieren kann, ohne dabei zu denselben Verzerrungen oder einer Verbreiterung der Hauptkeule zu führen, wie es beim Null-Steering oder Windowing der Fall ist.

© 2025 6G-ANNA

2.2.2 Winkelunsicherheiten bei Beamformern

Ebenso ist der Einfluss von Winkelunsicherheiten (z.B. durch Messfehler) beim Einfallswinkel der Nutz- bzw. Störsignale am Flugzeug und die daraus resultierende Robustheit der jeweiligen Beamformer wichtig. Kleine Abweichungen von den tatsächlichen Winkeln führen dazu, dass ein Störer nicht mehr in einer Nullstelle des Strahlungsmusters erscheint, sondern stattdessen in einer Nebenkeule mit erheblichem Array-Gewinn in dieser Richtung. Abbildung 9 zeigt die Simulationsergebnisse der SINR-Werte (γ) für präzise (schwarze Linie) und unpräzise Winkelkenntnis. Die unpräzise Winkelkenntnis, modelliert durch normalverteilte Steuerwinkel, führt zu einer Verteilung bzw. einer Schwankungsbreite des SINRs, die durch den hell schattierten Bereich dargestellt wird. Die dunklere rote Linie stellt das 5. Perzentil der jeweiligen Verteilung zu jedem Zeitpunkt der Trajektorie dar und kann als weiche untere Schranke zum Vergleich mit den Ergebnissen der präzisen Steuerwinkel betrachtet werden.

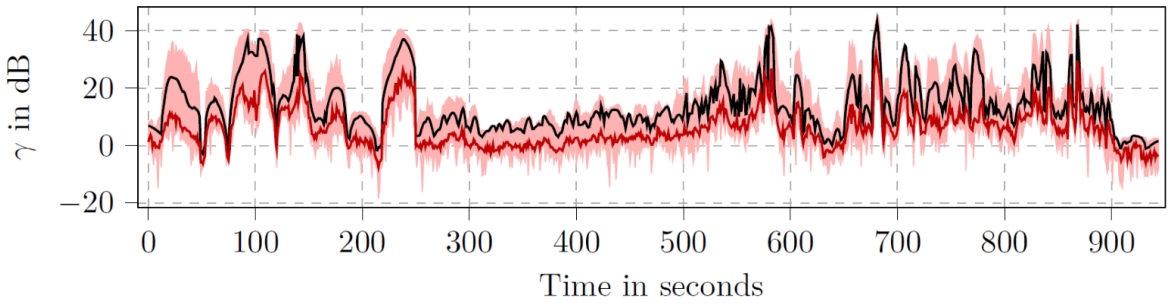

Abbildung 9: Beamformer-Simulationsergebnisse (SINR-Werte γ) für präzise (schwarz) und ungenaue Winkelkenntnis (rot).

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass einige der zufälligen Winkel zu einem höheren γ und damit zu einer besseren Leistung bis 10dB Gewinn führen. Dies deutet darauf hin, dass es Steuerwinkel gibt, die die Performance verbessern können. Diese Steuerwinkel führen offenbar zu einem günstigeren Kompromiss zwischen der empfangenen Nutzleistung (Signal der versorgenden Basisstation) und den Interferenzen (Signale der anderen Basisstationen). Weitere Untersuchungen in möglichen nachfolgenden Projekten sind erforderlich, um diese Winkel vorherzusagen und ihre jeweiligen Leistungsgewinne zu bestimmen.

2.2.3 Quantisierung von Beamformern zur Interferenzvermeidung

Für die Anwendung der Beamformer bei hohen Frequenzen im Bereich der Millimeterwellen stehen aufgrund des meist analogen Beamformings nicht beliebig viele Stufen zur Einstellung der gewünschten Phase zur Verfügung. Daher wurde für den Bereich der Mehrantennentechniken auch eine Untersuchung bezüglich der Beeinflussung der Gewinne durch eine Quantisierung der Phasenstufen untersucht. Es wird angenommen, dass einzelne Antennenelemente mit Phasoren angesteuert werden können. Diese können unterschiedlich viele diskrete Phasenstufen für die Ausbildung der Empfangscharakteristik zur Verfügung stellen. Die Stufen richten sich danach, wie viele Bit für die einzelnen Phasoren aufgewendet werden können. In diesem Arbeitspaket wurden die Empfangscharakteristiken für 1 bis 5 Bit Quantisierung untersucht, da diese typischerweise den praktisch verwendeten Wertebereich abbilden. Hier stellt 1 Bit die geringste Auflösung dar. Dabei wurde sowohl die Auswirkung der Quantisierung auf die Empfangscharakteristik, als auch die Robustheit der einzelnen Beamformer gegenüber geringer Quantisierung analysiert.

© 2025 6G-ANNA

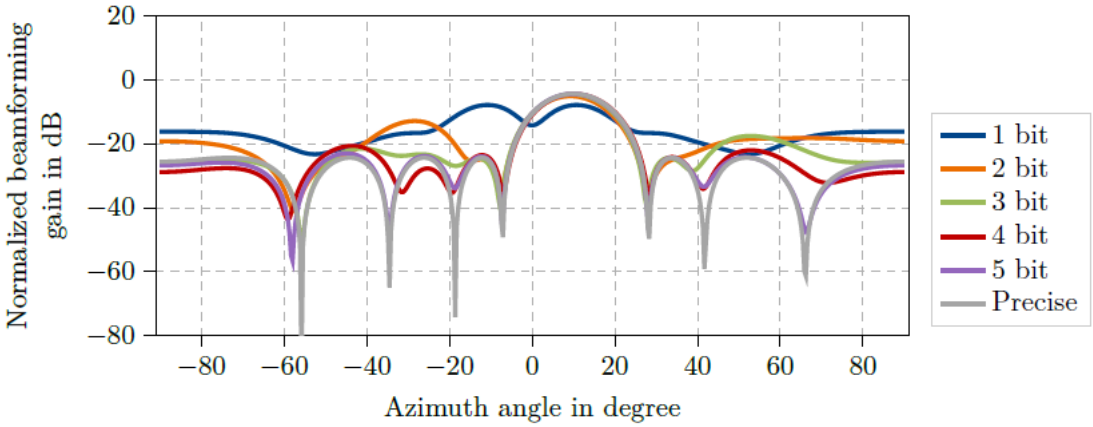

Abbildung 10: Auswirkung von unterschiedlichen Quantisierungsbits für den Beamformer "Windowing"

Abbildung 10 zeigt beispielhaft die Empfangscharakteristik des Windowing Beamformers bei 1 bis 5 Bit Quantisierung. Daneben ist in grau die präzise Berechnung der Charakteristik ohne Phasenbeschränkung zu sehen. Es ist erkennbar, dass bei 4 und 5 Bit Quantisierung nur eine kleine Erhöhung der Nebenkeulen im Vergleich zum präzisen Muster auftritt. Die Nebenkeulen erhöhen sich weiter, wenn nur noch mit 3 Bit quantisiert wird und zeigen deutliche Veränderungen bei 2 Bit. Bei einem Bit ist außerdem nur noch eine Andeutung der Hauptkeule zu erkennen.

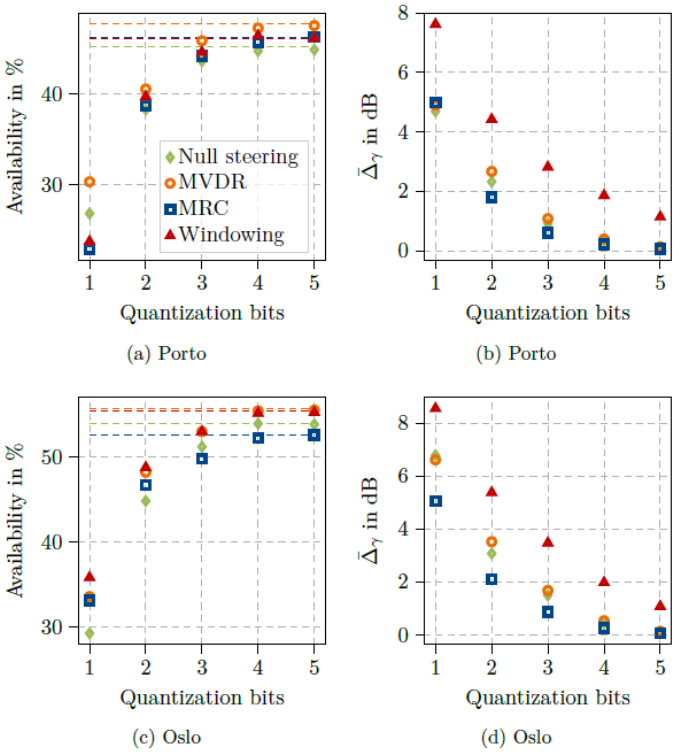

Abbildung 11: Robustheit der Beamformer gegenüber Quantisierung auf zwei verschiedenen Flugtrajektorien (Oslo und Porto). Dabei wird einmal die Verfügbarkeit (Availability) und die Abweichung zum präzisen Wert ($\bar{\Delta}_\gamma$) berechnet.

Dies kann auch als Grundlage für die Ergebnisse in Abbildung 11 gedeutet werden, wo die Robustheit der Beamformer gegenüber den verschiedenen Abstufungen der Quantisierung zu sehen ist. Dabei gilt eine hohe Verfügbarkeit (Availability) bzw. niedrige Abweichung von γ zum präzisen Wert ($\bar{\Delta}_\gamma$) bei niedriger Quantisierung als robust. Im Vergleich zu Maximum

© 2025 6G-ANNA

Ratio Combining (MRC) zeigt sich Windowing als robuster, da die Verfügbarkeit über die verschiedenen Quantisierungsstufen konstant höher ist. Bei den Beamformern, die Null Steering und MVDR nutzen, verschieben sich durch die Quantisierung teilweise die Nullstellen, was deren Robustheit beeinflusst. Bei beiden steigt beispielsweise mit zunehmend gröberer Quantisierung die Abweichung von γ zum präzisen Wert ($\overline{\Delta}_\gamma$) schneller als bei MRC, wodurch die Robustheit geringer ist. Die Ergebnisse dieses Teils sind damit insbesondere relevant für praktische Anwendungen, da die entsprechenden Beschränkungen der Hardware zum Teil durch die Quantisierung berücksichtigt werden.

2.2.4 Verbesserung der Handover-Prozedur durch Beamforming

Im Rahmen der Studie zur Interferenzminderung mit MIMO wurde auch der Einfluss auf Handover (und das sog. „Conditional Handover“) untersucht. Durch die hohen Geschwindigkeiten der Flugzeuge kann von einem häufigen Wechsel (Handover) der versorgenden Mobilfunkzelle ausgegangen werden. Da es sich hier um einen neuen Anwendungshintergrund handelt, sind die bisher z.B. in 5G standardisierten Mechanismen aus dem terrestrischen Mobilfunk nicht für den Luftraum ausgelegt bzw. geeignet. Zur Verbesserung des konventionellen Verfahrens bei einem Handover wurde im Rahmen des 6G-ANNA-Projektes an der TUHH ein Verfahren zu beamforming-gestütztem Conditional Handover (BFE CHO) entwickelt. Statt nur die Empfangsstärke des Signals (Reference Signal Received Power, RSRP) zur Auswahl der nächsten versorgenden Basisstation heranzuziehen, wird das Signal-zu-Interferenzleistungsverhältnis (SIR) in Kombination mit Beamforming genutzt. Abbildung 12 zeigt Simulationsergebnisse zur Verfügbarkeit (Availability) auf verschiedenen Flugtrajektorien, mit Beamforming im Conditional-Handover-Verfahren (BFE CHO). Es resultiert für alle drei Flugrouten (Ph./Ve./Ro.) eine durchgängige Erhöhung der Verfügbarkeit gegenüber dem konventionellen Verfahren (CHO), wobei der Anstieg insbesondere bei höheren SINR-Schwellenwerten (γ_{min}) besonders ausgeprägt ist.

Simulationen mit realen Flugtrajektorien und Basisstationsverteilungen zeigen, dass unser Ansatz die Verbindungsstabilität erheblich erhöht. Die Verfügbarkeit (Availability) steigt um bis zu 32 Prozentpunkte, während die Handover-Häufigkeit leicht reduziert wird. Die Häufigkeit konnte durch Anwendung einer Filtermethode ebenso herabgesetzt werden. Die gemeinsame Arbeit mit Airbus zu diesem Thema wurde bei der IEEE Vehicular Technology Conference Fall 2024 veröffentlicht [7].

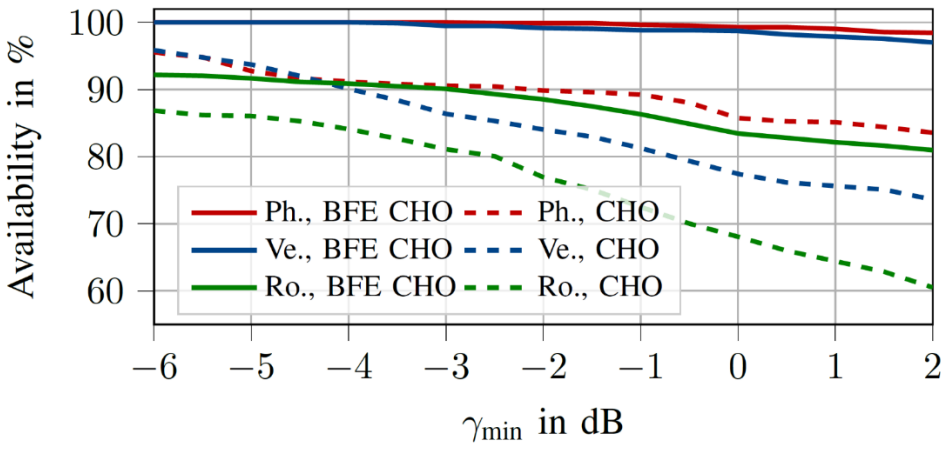

Abbildung 12: Verfügbarkeit (Availability) über verschiedene SINR-Schwellenwerte für beamforming-unterstützte Conditional Handover (BFE CHO) und konventionelle CHO (CHO) auf verschiedenen Flugtrajektorien.

© 2025 6G-ANNA

2.3 Entwurf und Optimierung der Medium Access Control-Schicht

Ein zentraler Aspekt der Luft-Boden-Kommunikation in zukünftigen 6G-Netzen ist die effiziente Nutzung des Funkkanals z.B. an Flughäfen, wo eine große Anzahl von Boden- und Luftfahrzeugen koexistieren. In diesem Arbeitspaket wurden Konzepte zur Medium Access Control (MAC)-Protokollschicht untersucht, die eine gleichzeitige zuverlässige und performante Anbindung von mehreren ankommenden Flugzeugen ermöglichen. Unser Ansatz basiert auf einer einzelnen Bodenstation am Flughafen, die mit einem großen, leicht nach oben geneigten („up-tilted“) Antennen-Array wie in Abbildung 13 ausgestattet ist. Durch räumliches Multiplexing können mehrere Flugzeuge gleichzeitig auf derselben Frequenz bedient werden. Die zentrale Herausforderung auf der MAC-Schicht besteht darin, den Zugriff auf die gemeinsam genutzte Funkressource effizient zu koordinieren, Kollisionen zu vermeiden und Interferenzen mit dem bodengebundenen Netz zu minimieren.

Da die Standorte der Flugzeuge genau bekannt sind, kann Beamforming gezielt in deren Richtung erfolgen, wodurch eine räumliche Trennung der Signale erreicht wird. Dadurch ergibt sich eine Alternative zu klassischen contention-basierten Zugriffsverfahren: Anstelle eines zufallsbasierten Zugangs (z. B. ALOHA-ähnlicher Mechanismen) kann eine deterministische Zuweisung von Ressourcen erfolgen, die auf der vorhersehbaren Trajektorie der Flugzeuge basiert.

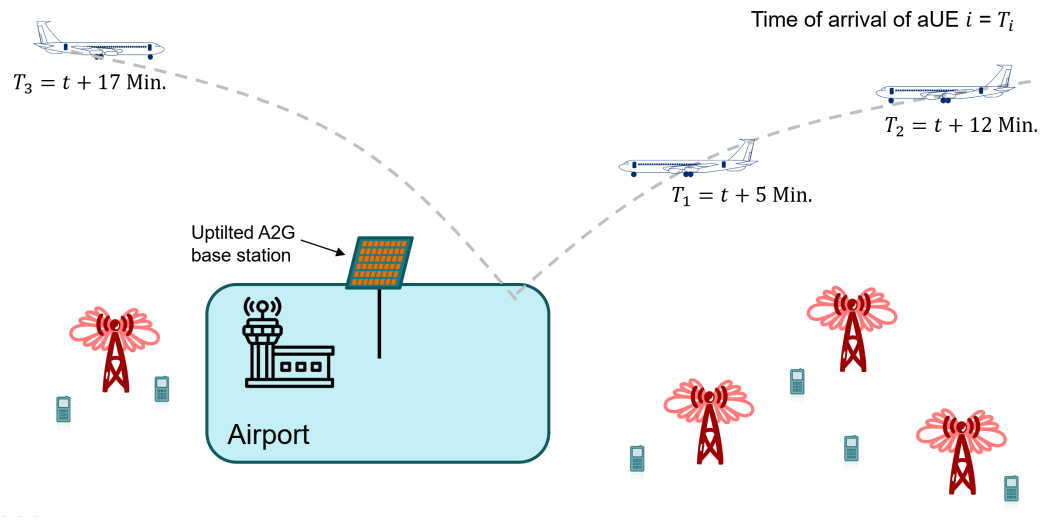

Abbildung 13: Übersicht über das Szenario in welchem mehrere Flugzeuge im Landeanflug von einer dedizierten Basisstation bedient werden.

Es wurden im Rahmen dieses Arbeitspaketes Simulationen für unterschiedliche Szenarien durchgeführt. Ein wichtiger Gegenstand der Untersuchung war der Einfluss von Größe und Installationsort des Antennensystems an den Flugzeugen. Dazu wurden unterschiedliche Konstellationen simuliert: (a) eine einzelne Antenne oder ein einzelnes Antennen-Array (forward array) an der Nase der Flugzeuge, ausgerichtet zur Flugrichtung sowie (b) ein Antennen-Array an der Nase der Flugzeuge und jeweils ein Antennen-Array an der linken und rechten Seite der Flugzeuge (left/right array), ausgerichtet zum Horizont. Letzteres wird im Folgenden als „Multi-Antennen-Array“ bezeichnet. Die Ausrichtung der Antennen an der Flugzeugfront ist in Abbildung 14 dargestellt.

© 2025 6G-ANNA

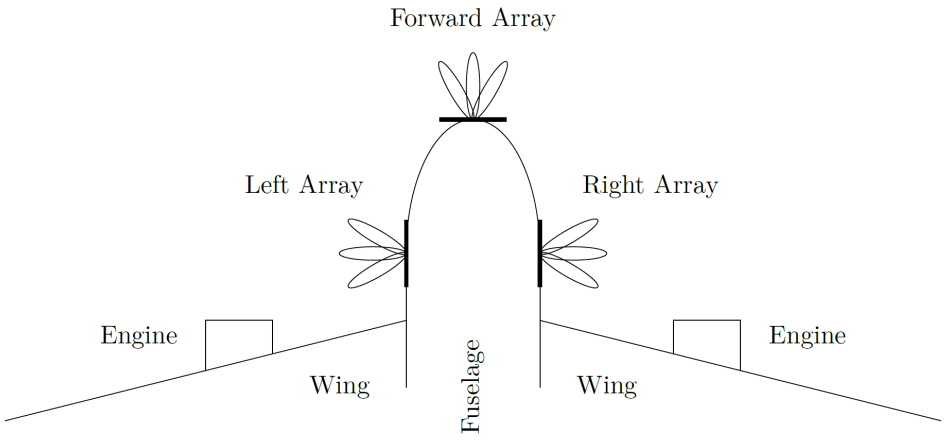

Abbildung 14: Antennensysteminstallation am Flugzeug, von oben betrachtet.

Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen das sogenannte „Ausfall-SINR“ $\gamma_o^{\mathrm{UL/DL}}$, d.h. das SINR, welches mit einer Sicherheit von 99,999% mindestens erreicht wird. Grundsätzlich lässt sich im Uplink und im Downlink erkennen, dass das Ausfall-SINR bis zum Zeitpunkt der Landung ansteigt. Dies erklärt sich mit dem absinkenden Pfadverlust aufgrund der abnehmenden Distanz zur bedienenden Basisstation.

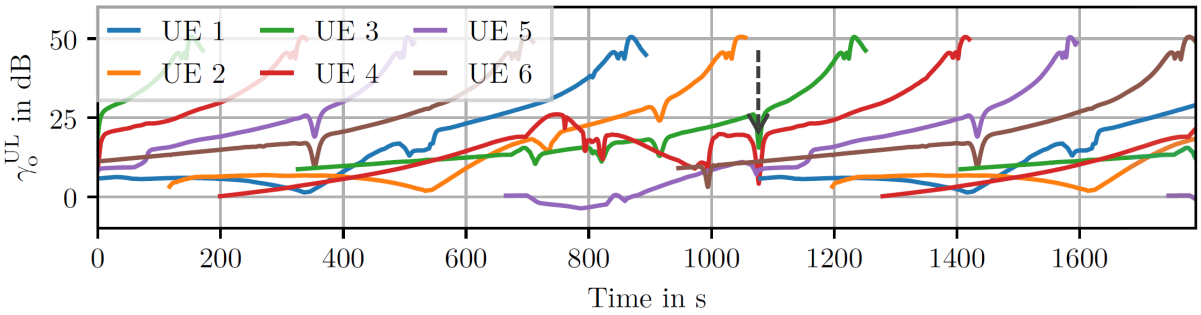

Abbildung 15: Ausfall-SINR mit einer 64x64 ATG Basisstation und einem 4x4 Multi-Antennen-Array am aUE im Uplink.

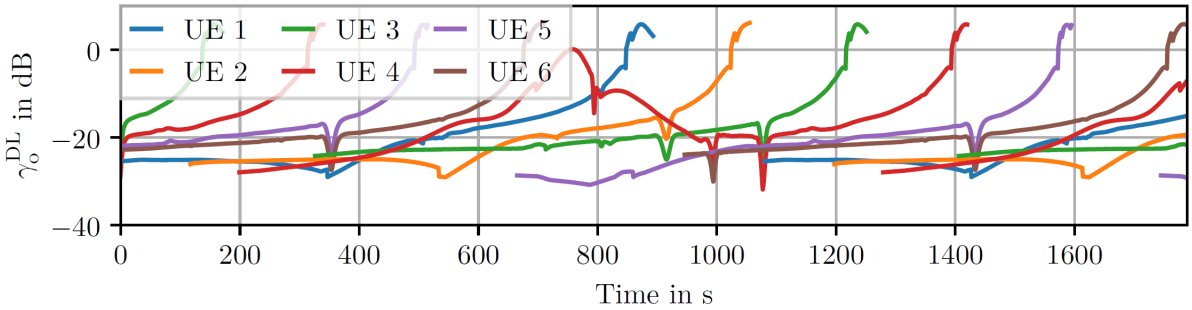

Abbildung 16: Ausfall-SINR mit einer 64x64 ATG Basisstation und einem 4x4 Multi-Antennen-Array am aUE im Downlink.

Der Uplink (Datenübertragung vom Flugzeug zur Basisstation) ist grundsätzlich weniger problematisch, da die Air-to-Ground (ATG) Basisstation terrestrische Interferenz im sogenannten Endfire-Bereich in Richtung des Antennen-Arrays und die geringe Interferenz der anderen Flugzeuge gut reduzieren kann. Die Simulationsergebnisse in Abbildung 15 zeigen den besten Fall, nämlich dass die 4x4 Multi-Antennen-Array-Installation am vorteilhaftesten ist, besonders für Situationen, in denen ein Flugzeug für die Vorbereitung der Landung am Flughafen vorbei zum Start der Einflugschneise fliegt und dementsprechend mit der Nase weg von der Basisstation am Flughafen zeigt.

© 2025 6G-ANNA

Der Downlink (Datenübertragung von der Basisstation zum Flugzeug) stellt eine Herausforderung dar, da wie in Abbildung 16 zu sehen, selbst mit der Multi-Antennen-Array-Installation über weite Teile der Flugtrajektorien ein Ausfall-SINR über 0 dB nicht erreichbar war. Dies lässt sich mit dem Einfangen von terrestrischen Interferenzen aus Sicht der Antennen-Arrays an den Flugzeugen erklären.

Ein weiterer seltener, interessanter Effekt ist das gegenseitige „Abschatten“ von Flugzeugen, welche direkt nacheinander landen und teilweise auf nahezu gleichen Elevationswinkeln zur Basisstation fliegen, was die Separierbarkeit beim Beamforming erschwert. Die resultierenden gemeinsamen Abfälle im SINR (beispielhaft markiert mit einem Pfeil in Abbildung 15) lassen sich durch ein besonders großes Antennen-Array, z.B. 64x64, an der ATG Basisstation in der Dauer und Tiefe (in dB) reduzieren. Darüber hinaus wäre konventionelles Multiplexing in Zeit- und Frequenz eine unterstützende Lösung.

Insgesamt zeigen unsere Simulationen, dass Spatial Multiplexing bzw. Massive MIMO mit einer dedizierten Basisstation am Flughafen eine vielversprechende Lösung für die Medium-Access-Control-Schicht darstellt.

2.4 Vermessung von Funkkanälen in der Flugzeugkabine

In [8] wurde gezeigt, dass die Lokalisierung von Passagieren auf Flugzeugsitzen mithilfe der Kanalimpulsantwort möglich ist. Im Rahmen des Projekts wurden ähnliche Messungen mit erweiterten Sender-Empfänger-Konfigurationen in einem Flugzeugrumpf-Teil durchgeführt, um die Kanalimpulsantworten bei verschiedenen Belegungsszenarien der Sitzplätze zu untersuchen. Dabei wurden drei verschiedene Sender-Empfänger-Konfigurationen betrachtet, welche in Abbildung 17 dargestellt sind.

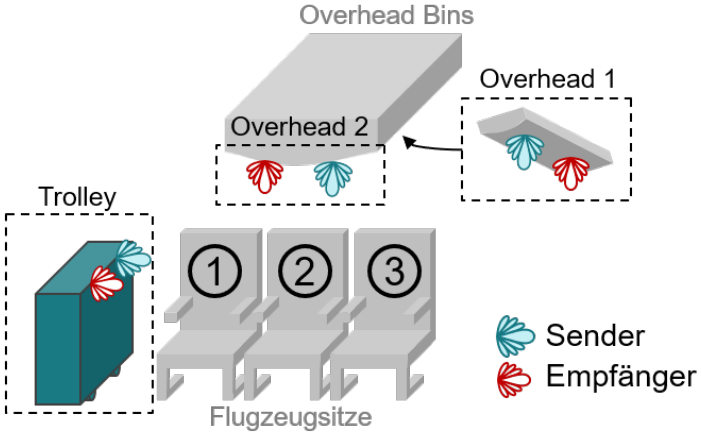

Abbildung 17: Sender-Empfänger-Konfigurationen für Messungen der Kanalimpulsantwort bei verschiedenen Belegungs-Szenarien in der Flugzeugkabine.

Hier sind Sender und Empfänger beim Trolley-Szenario seitlich an einem Flugzeugtrolley befestigt und auf die Sitzreihe gerichtet, in der die Detektion durchgeführt werden soll. Weiterhin werden zwei Szenarien mit Empfänger und Sender an den Overhead Bins durchgeführt. Dabei sind bei Overhead 1 Sender und Empfänger orthogonal zu der zu vermessenden Sitzreihe hintereinander angebracht, während sie bei Overhead 2 nebeneinander, parallel zur Sitzreihe an den Overhead Bins befestigt sind.

Die Messungen der Kanalimpulsantworten werden mit Ultra Wideband (UWB) Technologie mit einer Auflösung von ca. 1ns (Bandbreite von 500 MHz) durchgeführt. Die Auswertung erfolgt mithilfe der in [8] vorgestellten Metriken, wobei die komplexwertigen Messwerte als Differenz der Absolutwerte zu einer Referenzmessung mithilfe einer Min-Max-Skalierung normalisiert dargestellt werden.

© 2025 6G-ANNA

Für jede der Konfigurationen wurden Messungen in einer Sitzreihe im Mittelgang und am Fenster durchgeführt. Für die Personendetektion hat sich eine Person nacheinander auf die drei bzw. zwei Sitze am Mittelgang und am Fenster gesetzt. Für die Objektdetektion wurde ein Koffer, welcher mit Kleidung, Elektronik und Wasserflaschen gefüllt war, nacheinander auf den Sitzen platziert. Die Messungen wurden außerdem mit Alufolie auf den Sitzflächen der Flugzeugsitze wiederholt, da geprüft werden soll, ob sich dadurch günstigere Kanaleigenschaften für die Detektion ergeben. In allen Szenarien wurde zunächst eine Referenzmessung ohne Objekte durchgeführt.

Ergebnisse für das Trolley-Szenario in Abbildung 18 zeigen, dass sowohl für den Koffer als auch für die Person Unterschiede in der Kanalimpulsantwort zur Referenzmessung feststellbar sind. Dabei sorgt die Alufolie auf den Sitzen in diesem Szenario für gut ausgebildete Differenz-Spitzen für die jeweiligen Sitze.

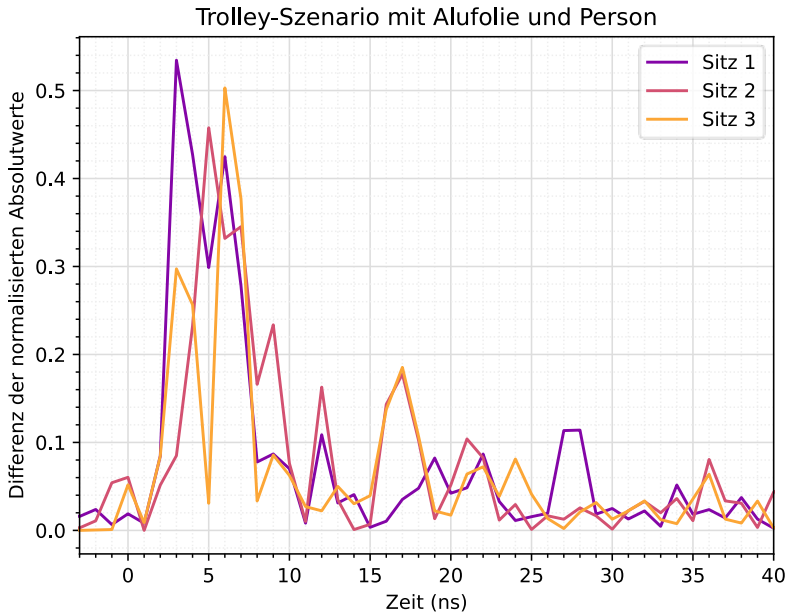

Abbildung 18: Differenz der Kanalimpulsantworten für eine Person auf Sitz 1-3 im Mittelgang. Die Sitze sind mit Alufolie ausgekleidet und es wurde das Trolley-Szenario verwendet.

Bei den Ergebnissen in Abbildung 19 für das Overhead 1-Szenario fluktuiert die Differenz zum Referenzmesswert stärker, wodurch einzelne dedizierte Spitzenwerte nicht immer erkennbar sind. Ähnliche Ergebnisse wurden auch für Overhead 2 erzielt. Für die Auskleidung mit Alufolie zeigen sich generell mehr über den gesamten Bereich verteilte Differenz-Spitzen und damit zusätzliche Reflexionen. Interessant wäre hier zukünftig eine weitere Untersuchung mit mehreren Empfangsantennen, um eine detailliertere Winkelauflösung und Positionierung zu ermöglichen, was aktuell aufgrund von limitierter Hardware nicht möglich war.

Generell zeigen die Messungen, dass es Unterschiede in der Kanalimpulsantwort bei den verschiedenen Objekt- und Personenbelegungen der Sitze gibt. Diese Statusinformationen des Kanals können sich folglich für passive Detektion der Passagierbelegung eines Flugzeugs eignen.

© 2025 6G-ANNA

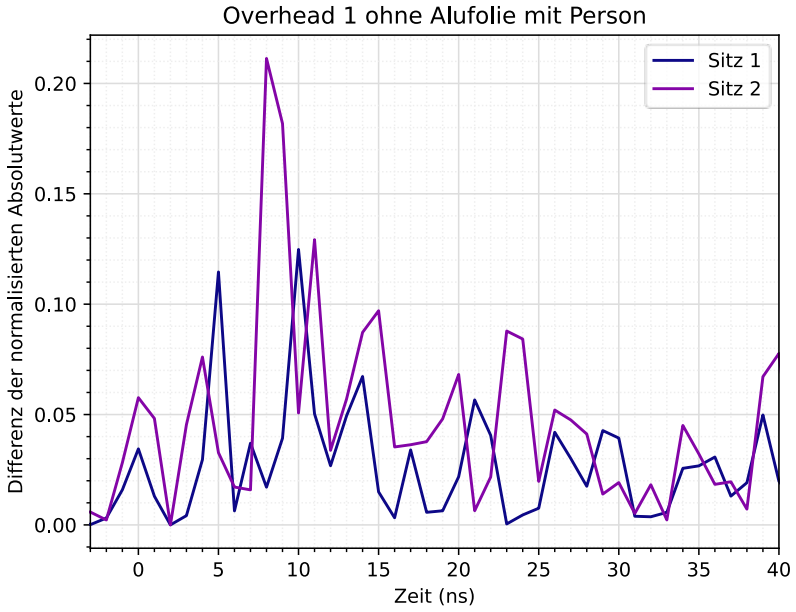

Abbildung 19: Differenz der Kanalimpulsantworten für eine Person auf Sitz 1-2 der Sitze am Fenster. Die Sitze sind nicht mit Alufolie ausgekleidet und es wurde Overhead 1 verwendet.

2.5 Passive Sensorik und Lokalisierung in der Flugzeugkabine

Die Integration von Sensing-Funktionalitäten in zukünftige 6G-Kommunikationssysteme in Flugzeugkabinen verspricht Vorteile. Diese sind insbesondere in sicherheitsrelevanten Situationen von Bedeutung. Hier kann mithilfe von Lokalisierungstechnologien erkannt werden, ob sich alle Passagiere auf ihren Plätzen befinden. Da viele Bordnetze mit begrenzter Bandbreite arbeiten, um Interferenzen mit sicherheitskritischen Systemen wie dem Funkhöhenmesser (Radio Altimeter) zu vermeiden, wurde in diesem Arbeitspaket untersucht, welche Möglichkeiten verschiedene Technologien auf Basis künstlicher Intelligenz bieten. Diese sollten auch bei einer im Vergleich zu Ultrabreitband (UWB)-Systemen geringeren Bandbreite eine ausreichend zuverlässige Lokalisierung von Personen und Objekten gewährleisten.

2.5.1 OFDM-basierte Detektion von Passagieren mit Machine Learning

Die Detektion von Passagierbelegungen in einer Flugzeugkabine wurden in einer Simulation evaluiert. Dafür wurde ein Simulationsmodell einer Boeing 737-400 verwendet. Dabei diente ein OFDM-System (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) mit der Trägerfrequenz von 5 GHz und einer Bandbreite von 64 MHz bis 2 GHz als Grundlage. Die Passagiere wurden durch Modelle dargestellt, welche in Ausrichtung und Größe variabel waren.

Ziel der Simulationen war es, durch Anwendung von Machine-Learning-Verfahren wie k-Nearest Neighbor (kNN) [9], Residual Neural Networks (ResNet) [10] und Transformer Neural Networks (TNN) [11] die Sitzbelegung auf Basis des Kanalzustands beziehungsweise der Impulsantwort des Kanals zu erkennen. Es wurde zunächst das 1. Overhead-Panel-Szenario betrachtet, bei dem sich der Sender an einem Trolley und der Empfänger an der Kabinen-Decke befindet. Ebenso wurde das bistatische Trolley-Szenario evaluiert, bei dem sich Sender

© 2025 6G-ANNA

und Empfänger gemeinsam in der Seite des Trolleys befinden und sich mit diesem durch den Gang bewegen.

In beiden Fällen wurde der Trolley so bewegt, dass mehrere Sitzreihen nacheinander erfasst und analysiert werden konnten. Dabei entspricht das Trolley-Szenario dem Trolley-Szenario aus Abbildung 17 in Sektion 2.4, während das Overhead-Panel-Szenario als eine Kombination aus dem Trolley-Szenario (Sender) und Overhead 1 (Empfänger) interpretiert werden kann.

Die Simulationen zum Vergleich der Algorithmen wurden mit unterschiedlichen Bandbreiten (64 MHz, 512 MHz, 2 GHz), MIMO-Dimensionen (genutzte Antennen an Sender und Empfänger) und Signal-zu-Rauschleistungsverhältnissen (SNR von –5 dB bis 20 dB) durchgeführt. Der Datensatz für die Simulationen bestand aus 500 Kabinenmodellen.

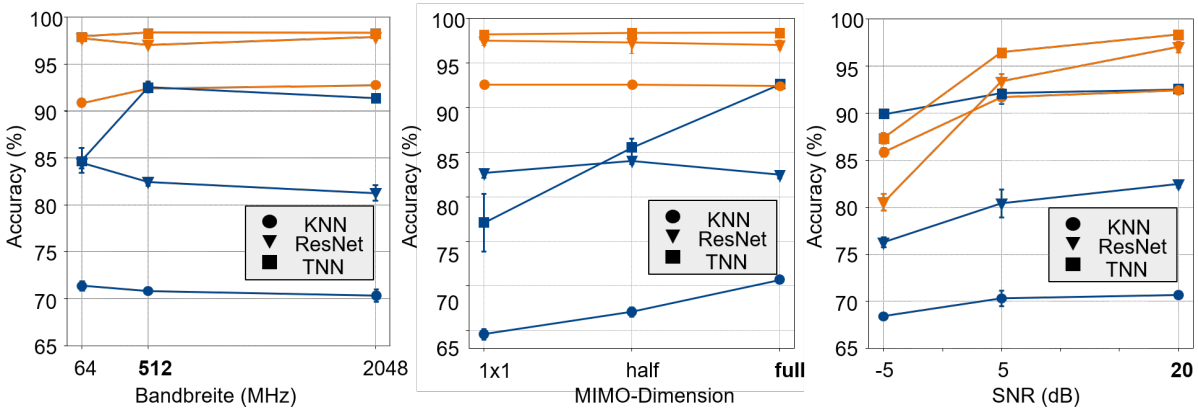

Abbildung 20: Ergebnisse für OFDM-basierte Passagier-Detektion über Bandbreite, MIMO-Dimension und SNR. Die orange Linie zeigt die Ergebnisse für das bistatische Radar, während die blaue Linie die Ergebnisse für das Overhead-Panel-Szenario abbildet. Die MIMO-Dimension bezieht sich auf die Anzahl benutzter Elemente im Antennen-array (2x2 bei Sender und Empfänger im Bistatischen Radar, 2x2 beim Sender und 1x8 beim Empfänger im Overhead-Panel-Szenario).

Die Ergebnisse in Abbildung 20 zeigen, dass der Transformer (TNN) in allen Szenarien die höchste Genauigkeit bei guter Kanalqualität, erreicht. Die Genauigkeit (Accuracy) bezeichnet hierbei die Übereinstimmung mit der tatsächlichen, exakten Belegung. Ebenso ist schon bei einer Bandbreite von 64 MHz mit dem TNN im bistatischen Szenario eine verlässliche Vorhersage möglich. Im Overhead-Panel-Szenario ist die Genauigkeit insgesamt etwas geringer und stärker von der Anzahl der verfügbaren Antennen abhängig. Bei schlechten Kanalbedingungen, wie einem schlechten SNR, kann es beim ResNet zu Konvergenzproblemen kommen. Der kNN-Ansatz zeigt sich als generell schwächer, aber stabiler bei niedrigem SNR.

Zur Verstärkung der Reflexionen bei unbesetzten Sitzen wurden metallische Sticker auf den Sitzflächen im Kabinenmodell angebracht. Diese sollen die Rückstreuung verbessern, wenn sich kein Passagier auf dem Sitz befindet, und so die Unterscheidbarkeit zwischen belegten und unbelegten Sitzen verbessern. Zur Analyse des Einflusses der Sticker wurden zwei Szenarien verglichen:

- **Profil 1**: 64 MHz Bandbreite, –5 dB SNR, nur eine Antenne
- **Profil 2**: 512 MHz Bandbreite, 20 dB SNR, vollständiges MIMO mit 8 Antennen

Die Auswertung in Tabelle 1 zeigt, dass die metallischen Sticker insbesondere in Profil 1 zu einer deutlichen Steigerung der Detektionsrate führen, während der Effekt in Profil 2 nur gering ausfällt. Dies kann darauf hindeuten, dass solche passiven Maßnahmen vor allem in Systemen mit Limitierung der Bandbreite oder des SNRs hilfreich sein können.

© 2025 6G-ANNA

Tabelle 1: Accuracy für die verschiedenen Ressourcen-Profile mit und ohne metallische Sticker auf den Sitzflächen.

Ressourcen	Profil 1		Profil 2	
Konfiguration	Mit metallischen Stickern	Ohne metallische Sticker	Mit metallischen Stickern	Ohne metallische Sticker
KNN	64.37%	58.99%	70.12%	69.76%
ResNet	82.20%	73.36%	80.79%	80.86%
TNN	79.25%	69.44%	92.10%	91.70%

Das Overhead Szenario ist stark abhängig von der Anzahl an verfügbaren Empfängern, die in die Auswertung des Signals miteinbezogen werden können. Daher wurden weitere Simulationen zur Abhängigkeit der einzelnen neuronalen Netze von der Anzahl an Empfängern durchgeführt. Abbildung 21 zeigt die Ergebnisse für 4, 7, 13 und 26 verwendete

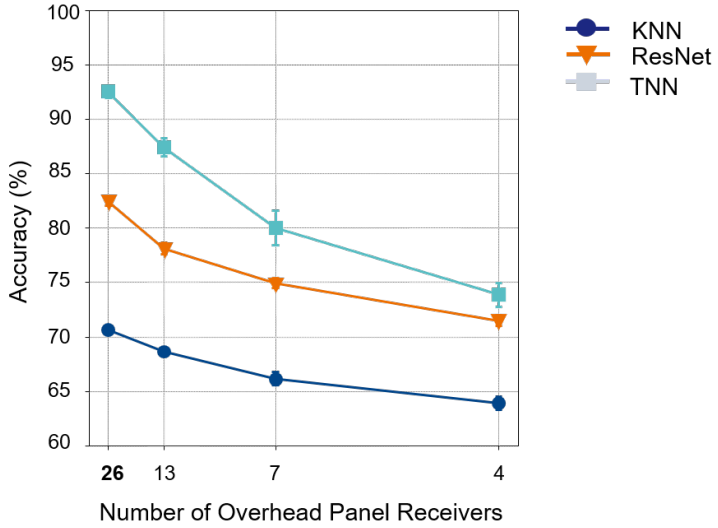

Abbildung 21: Accuracy für unterschiedliche Anzahl an Empfängern im Overhead Szenario.

Empfänger in den Overhead-Paneln. Generell ist zu erkennen, dass die Performance mit sinkender Empfängerzahl abnimmt. Dabei zeigt der TNN-Algorithmus die stärkste Abnahme. KNN stellt sich als am robustesten gegenüber einer geringeren Empfängerzahl heraus.

Allgemein lässt sich als Fazit für die gezeigten Untersuchungen sagen, dass die Implementierung der hier simulierten Systeme vielversprechend erscheint, vor allem im Hinblick auf autonome Sicherheitssysteme und die Optimierung von Abläufen im Flugzeug. Weitere Untersuchungen könnten sich u.a. mit der Verarbeitung verstärkter Reflexionen und der Verbesserung der Datenauswertung durch geeignete Preprocessing-Algorithmen befassen.

© 2025 6G-ANNA

2.6 Unterstützung beim Proof of Concept für kritische Dienste

2.6.1 Advanced Security for Critical Services Proof-of-Concept

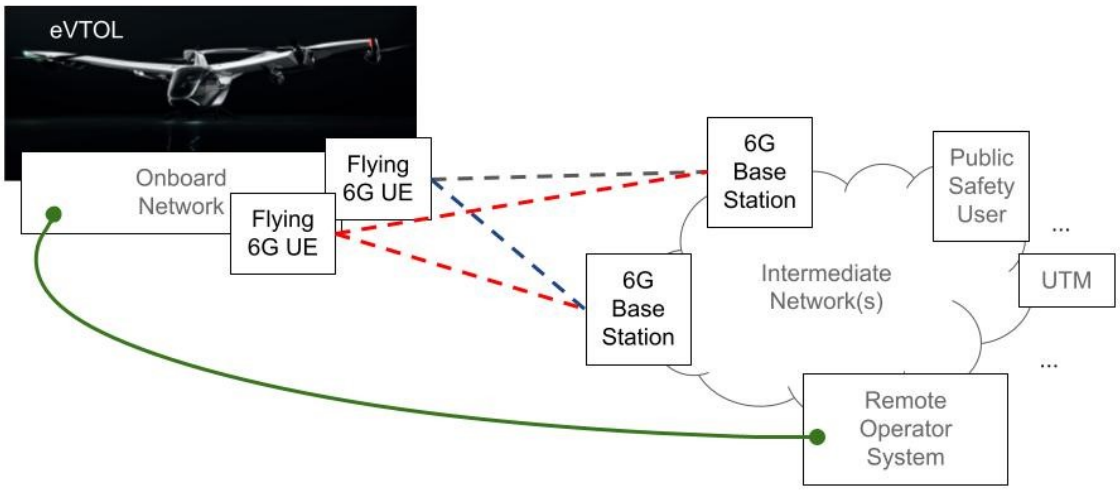

Abbildung 22: Use Case 9 "Advanced Security for Critical Services" [12].

6G-Technologie könnte entscheidend zur Ende-zu-Ende-Sicherheit für kritische Dienste in einem Netzwerk aus Netzwerken beitragen, insbesondere in industriellen Anwendungsbereichen. Ein Beispiel hierfür ist ein elektrisches Vertical Take-Off and Landing (eVTOL) Luftfahrzeug, das sicher mit einem entfernten Steuerungssystem und weiteren Endpunkten, wie einem Uncrewed Aircraft System Traffic Management (UTM) System oder einem Nutzer aus dem Bereich der öffentlichen Sicherheit verbunden sein muss.

Die TUHH hat einen Beitrag zu diesem Proof-of-Concept bezüglich der Erzeugung des kryptografischen Schlüssels aus Kanalinformation geleistet, welcher nachfolgend weiter erläutert wird. Die grundlegende Architektur des Proof-of-Concept ist in Abbildung 22 dargestellt.

2.6.2 Quantisierung von Kanalinformation für kryptografische Zwecke

Die Quantisierung von Kanalinformationen zur Erzeugung kryptografischer Schlüssel, im Englischen auch als „Physical Layer Key Generation“ bekannt, ist ein innovativer Ansatz der drahtlosen Sicherheit. Hierbei nutzen zwei Kommunikationsparteien die zufälligen Schwankungen des physikalischen Funkkanals als Grundlage zur Erstellung gemeinsamer, geheimer Schlüssel. Der Grundgedanke ist, dass die Kanalcharakteristiken, wie z.B. Signalstärke und Phase, in kurzen Zeitintervallen wechselseitig und einzigartig sind. Diese Messungen werden quantisiert und durch Austausch von Informationen über das Quantisierungsniveau synchronisiert, um eine identische Bitfolge zu erzeugen. Dieses Verfahren bietet eine Alternative zu konventionellen kryptografischen Schlüsselaustauschmethoden, da der Schlüssel ohne vorherige Verteilung generiert werden kann und potenziell vor Abhörern geschützt ist, die nicht direkt am Kommunikationsweg beteiligt sind. Eine vereinfachte Darstellung der unterschiedlichen, reziproken Kanäle zwischen den zwei Teilnehmern Alice und Bob und einem hypothetischen Abhörer Eve mit einem ausreichend unkorreliertem Kanal zu den beiden Teilnehmern findet sich in Abbildung 23. Mathur et al. stellten 2008 den sogenannten „Levels-crossing“-Algorithmus vor, welcher eine einfache und robuste Implementierung ermöglicht [13], [14]. Das Grundprinzip beruht darauf, ähnliche Schwankungen der Kanalinformation über bestimmte Schwellenwerte bei beiden Kommunikationsparteien zu identifizieren und zu quantisieren. Die Ausdehnung der

© 2025 6G-ANNA

Schwankungen in eine Richtung, im Englischen „Excursions“ genannt, ist dabei ein Parameter, mit welchem die Robustheit des Algorithmus eingestellt werden kann.

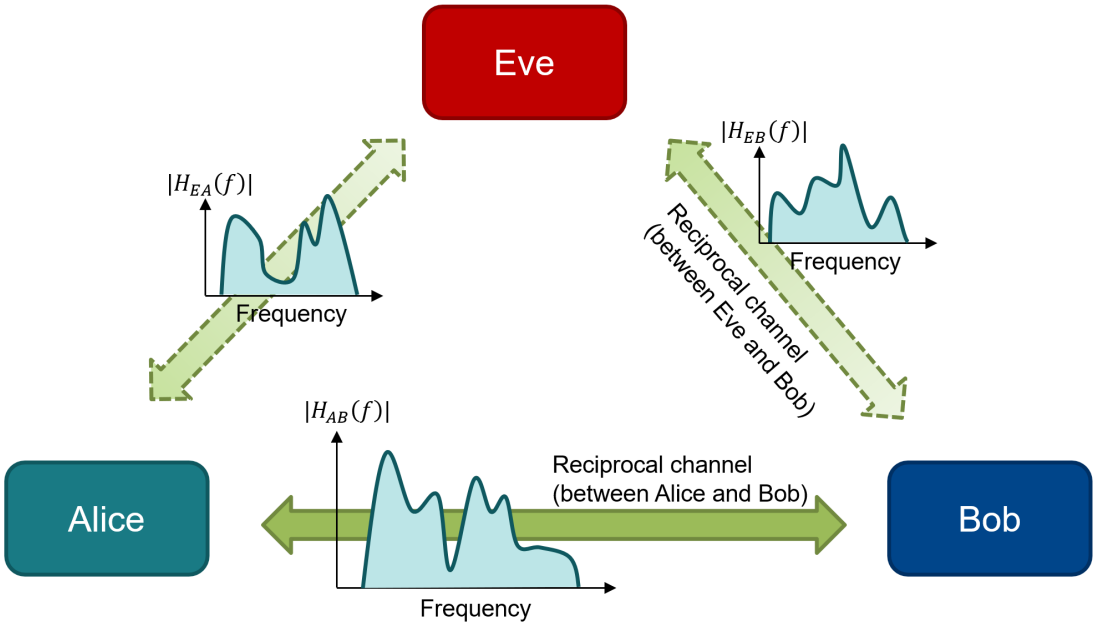

Abbildung 23 Schematische Darstellung der Kanalunterschiede zwischen Alice, Bob und Eve auf deren Basis kryptografisch quantisiert wird.

Abbildung 24 und Abbildung 25 stellen die Funktionsweise der Levels-Crossing-Algorithmen beispielhaft dar. Der Kanal zwischen Alice und Bob soll reziprok sein. Aus Sicht von Bob wird die Schätzung des Kanals als verrauscht angenommen. Nun werden auf Basis von Statistiken der Kanalschätzung zwei Schwellwerte q_- (q_minus) und q_+ (q_plus) definiert.

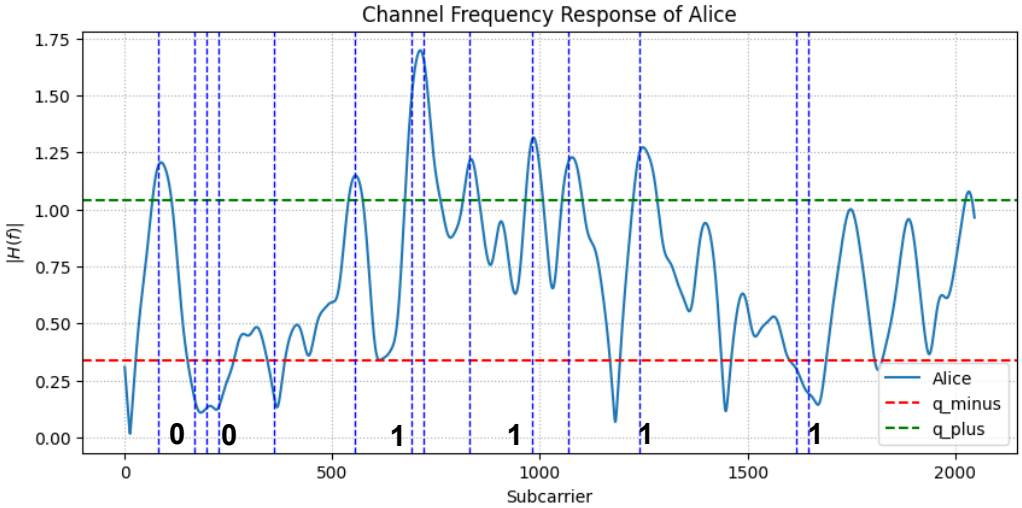

Abbildung 24: Beispielhafter Frequenzgang für den Kanal von Alice zu Bob über verschiedene Subträger.

Jedes Mal, wenn der sich relativ langsam verändernde Frequenzgang für eine gewisse Anzahl an Abtastwerten über oder unter diese Schwellwerte bewegt wird der Anfang dieser „Excursion“ von Alice und Bob jeweils unabhängig voneinander markiert. Aufgrund von imperfekter Kanalschätzungen ist aber zu erwarten, dass diese Menge an Startpunkten bei beiden nicht exakt gleich ist. Zur besseren Findung eines Konsenses zwischen Alice und Bob wurde dafür eine Toleranz zum Finden eines Startpunkts eingebaut. Zum Schluss vergleichen Alice und Bob ihre Menge an Exkursions-Startpunkten unter Berücksichtigung der Toleranz

© 2025 6G-ANNA

und interpretieren Exkursionen über und unter den Schwellwerten jeweils zum Beispiel als eine 1 und eine 0. In dem Beispiel in den Abbildungen entsteht so ein Konsens zwischen Alice und Bob, dass die Bitfolge [0, 0, 1, 1, 1, 1] sein soll. Die entsprechenden Stellen und Entscheidungen für eine 0 oder 1 sind in den Abbildungen entsprechend markiert.

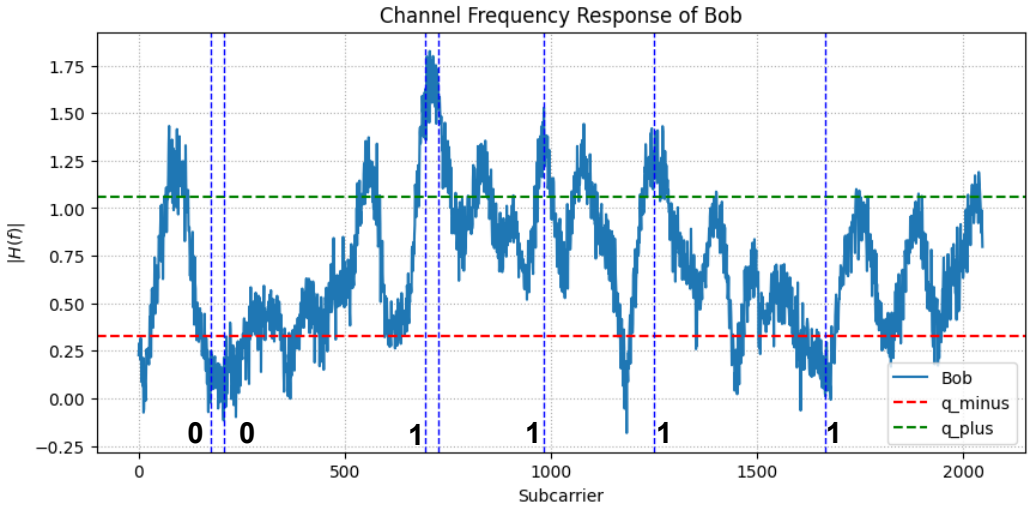

Abbildung 25: Reziproker Frequenzgang für Kanal von Bob zu Alice über verschiedene Subträger. In diesem Fall wir Rauschen auf die Frequenzantwort gelegt.

Dieser Algorithmus wurde im Proof-of-Concept mit der Firma Airbus eingebaut, um aus realen in Echtzeit gemessenen Kanälen die Bitfolgen zu generieren. Aufgrund der geringen zeitlichen Varianz des realen Kanals sind die erstellten Bitfolgen in ihrer Länge beschränkt gewesen. Die grundsätzliche Funktion dieses Prinzips wurde aber somit bewiesen.

2.7 Einbettung in Gesamtprojekt und Zusammenarbeit mit Projektpartnern

Die Forschungsbeiträge der TUHH im Kontext des Gesamtprojektes haben sich vor allem auf Arbeitspaket 3.1, d.h. der Entwicklung des Konzeptes der 6G Subnetzwerke fokussiert. Dabei spielte der aeronautische Anwendungsfall nach wie vor eine wichtige Rolle als ein Extremfall für ein Subnetzwerk mit großer geografischer Ausdehnung.

Das Arbeitspaket VIII („Unterstützung beim Proof of Concept für kritische Dienste“, siehe Abschnitt 2.6.2) wurde in enger Abstimmung und Kollaboration mit der Firma Airbus und weiteren Partnern behandelt. Damit wurde seitens der TUHH ein wesentlicher Support zur Fertigstellung des entsprechenden Proof of Concepts („Advanced Security for Critical Services“ [12]) geleistet.

Wie thematisch in Abschnitt 2.2.4 diskutiert, gab es im Rahmen der Veröffentlichung eines Konferenzartikels (IEEE Vehicular Technology Conference Fall in Washington, D.C. im Oktober 2024) eine enge Zusammenarbeit mit der Firma Airbus im Zentrum für Angewandte Luftfahrforschung (ZAL).
Mit dem ebenfalls in Finkenwerder ansässigen Institut für Flugzeug-Systemtechnik wurde für die Kanalmessungen in der Flugzeugkabine (Abschnitt 2.4) kooperiert. Dabei hat das Institut für Flugzeug-Systemtechnik sein realistisches Flugzeugkabinenmodell für unsere Messungen bereitgestellt.

© 2025 6G-ANNA

3 Literaturverzeichnis

[1] TUHH, “6G-ANNA TUHH Zwischenbericht 2023.” Apr. 2023.

[2] “Zwischenbericht der Technischen Universität Hamburg (TUHH) Berichtszeitraum: 01.01.2024 – 31.12.2024.”

[3] “WP3–Network of Networks Milestone Report D3.1c/D3.2c (Third/Final Project Year) June 2025.”

[4] “PM Q800 Quadcopter Herstellerbild.” [Online]. Available: https://www.premium-modellbau.de/media/image/7d/c9/8b/Q800-2.jpg

[5] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), “Air-to-ground network for NR, 3GPP TR 38.876 Version 18.0.0.” Dec. 2023.

[6] H. L. Van Trees, *Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory*, 1st ed. Wiley, 2002. doi: 10.1002/0471221104.

[7] S. Neumann, T. Meyerhoff, S. A. Ali Shah, R. Grünheid, and G. Bauch, “Beamforming-enhanced Conditional Handover for Air-to-Ground Communications in 6G,” in *2024 IEEE 100th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Fall)*, Washington, DC, USA: IEEE, Oct. 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/VTC2024-Fall63153.2024.10757681.

[8] J. Ninnemann, P. Schwarzbach, M. Schultz, and O. Michler, “Multipath-Assisted Radio Sensing and State Detection for the Connected Aircraft Cabin,” *Sensors*, vol. 22, no. 8, Art. no. 8, Jan. 2022, doi: 10.3390/s22082859.

[9] E. Fix and J. L. Hodges, “Discriminatory Analysis. Nonparametric Discrimination: Consistency Properties,” *International Statistical Review / Revue Internationale de Statistique*, vol. 57, no. 3, pp. 238–247, 1989, doi: 10.2307/1403797.

[10] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, “Deep Residual Learning for Image Recognition,” in *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA: IEEE, Jun. 2016, pp. 770–778. doi: 10.1109/CVPR.2016.90.

[11] A. Vaswani *et al.*, “Attention is All you Need,” in *Advances in Neural Information Processing Systems*, Curran Associates, Inc., 2017. Accessed: Apr. 11, 2025. [Online]. Available: https://proceedings.neurips.cc/paper/2017/hash/3f5ee243547dee91fbd053c1c4a845aa-Abstract.html

[12] “6G-ANNA Milestone Report WP1, Deliverable D1a.” Jun. 2023.

[13] S. Mathur, W. Trappe, N. Mandayam, C. Ye, and A. Reznik, “Radio-telepathy: extracting a secret key from an unauthenticated wireless channel,” in *Proceedings of the 14th ACM international conference on Mobile computing and networking*, San Francisco California USA: ACM, Sep. 2008, pp. 128–139. doi: 10.1145/1409944.1409960.

[14] Chunxuan Ye, S. Mathur, A. Reznik, Y. Shah, W. Trappe, and N. B. Mandayam, “Information-Theoretically Secret Key Generation for Fading Wireless Channels,” *IEEE Trans.Inform.Forensic Secur.*, vol. 5, no. 2, pp. 240–254, Jun. 2010, doi: 10.1109/TIFS.2010.2043187.

© 2025 6G-ANNA