

INFORMATIONSTECHNISCHES POTENTIAL INTEGRIERTER KOMMUNIKATIONSSYSTEME ZUR ZUSTANDSERKENNUNG IM KONTEXT DER VERNETZTEN FLUGZEUGKABINE

Paul Schwarzbach*, Jonas Ninnemann*, Oliver Michler*, Michael Schultz†

* Professur für Informationstechnik für Verkehrssysteme, Technische Universität Dresden

† Professur für Luftverkehrskonzepte, Universität der Bundeswehr München

Zusammenfassung

Effiziente und prognostizierbare Abfertigungszeiten sind zentrale Merkmale des modernen Flugverkehrs und der Schlüssel zu dessen Zukunftsfähigkeit. Im Kontext der vernetzten Flugzeugkabine ermöglicht der Einsatz von vernetzten Sensoren und Endgeräten eine umfassende Zustandserkennung sowie die Bereitstellung digitaler Services. Dabei weisen breitbandige und integrierte Kommunikationssysteme ein erhebliches informationstechnisches Potential auf. Neben der Bereitstellung hoher Datenraten für Entertainment Anwendungen, können die physikalischen Eigenschaften der ausgestrahlten Funksignale im Sinne einer hybriden Weiternutzung verwendet werden. Dies bezieht sich zum einen auf die aktive Lokalisierung von Endgeräten, welche kabinendedizierte Prozesse (z.B. Trolleys oder Schwimmwesten) bzw. Crew-Member oder Passagiere orten. Zum anderen werden Ansätze des passiven Radio Sensings, welches ein integraler Bestandteil von Beyond 5G Funktechnologien sein wird, vorgestellt. Diese Verfahren erlauben auf Basis der Eigenschaften des Übertragungskanal geometrische Rückschlüsse über die Ausbreitungs Umgebung und ermöglichen somit eine Zustandserfassung ohne aktives Endgerät. Der Beitrag diskutiert diese skizzierten Trends zukünftiger Funktechnologien sowie deren Herausforderungen und Potentiale für den Einsatz innerhalb der vernetzten Flugzeugkabine.

Keywords

Integrierte Kommunikationssysteme, Radio Sensing, Lokalisierung, Drahtlose Sensornetzwerke, Vernetzte Kabine

1. EINFÜHRUNG

Die Leistungsfähigkeit des Flugbetriebs wird durch ein angemessenes Luftverkehrsmanagement und eine effiziente Bodenabfertigung bestimmt. Insbesondere die nahtlose Kopplung von Flugzeug- und Passagiertrajektorien stellt eine der größten Herausforderungen im zukünftigen Mobilitätsmanagement dar. Wie sich derzeit deutlich zeigt, haben die Anforderungen an die Passagierbeförderung einen erheblichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des gesamten Verkehrsnetzes. Ein effektives und effizientes Management von Passagierabfertigungsprozessen ist der Schlüssel zu betrieblichen Verbesserungen. Ein zentrales Problem im Flugverkehr ist die effiziente Passagierabfertigung in der engen Flugzeugkabine [1].

Die Digitalisierung und Weiterentwicklung von Kommunikationstechnologien bietet in diesem Kontext hinsichtlich der Zustandserkennung, -überwachung und der Vernetzung von Prozessen und Personen erhebliches informationstechnisches Potential. Letztere ermöglicht darüber hinaus eine verteilte Zustandswahrnehmung sowie eine zentrale Überwachung und Steuerung. Eine digitale, vollständig vernetzte Flugzeugkabine ist die zwingend notwendige Infrastruktur, um den Kabinenbetrieb grundlegend zu verbessern, ein effektives Prozess- und Passagiermanagement zu ermöglichen [2, 3]. Mögliche Anwendungsfälle reichen von der Optimierung von Boarding und Crew-Operationen über die Wartungsplanung hin zur

Verbesserung des Passagiererlebnisses. Die technologische Grundlage stellt dabei jeweils ein drahtloses Kommunikationsnetzwerk (Wireless Sensor Network, WSN) zur Verbindung verschiedener Geräte in der Kabine, wie z. B. Handheld-Geräte der Passagiere, Steuergeräte der Besatzungsmitglieder, Unterhaltungssysteme während des Fluges oder Wartungssensoren, dar.

Dieser Beitrag stellt die aktuellen Trends im Bereich drahtloser Kommunikations- und Lokalisierungstechnologien hin zu Perzeptiven Netzwerken und die damit einhergehenden Potentiale und Herausforderungen innerhalb der vernetzten Flugzeugkabine dar. Weiterhin werden aktuelle Simulations- und Untersuchungsergebnisse an zwei exemplarischen Anwendungsfällen diskutiert: Aktive Funklokalisierung während eines Boardingvorgangs und Radio Sensing für die Sitzplatzbelegung. Der Beitrag ist dabei wie folgt strukturiert: Nach der Einführung in Abschnitt 1 folgt in Abschnitt 2 eine Vorstellung aktueller Forschungs- und Entwicklungstrends im Kontext integrierter Kommunikationssysteme. Weiterführend beinhaltet Abschnitt 3 eine Diskussion möglicher Use Cases für unterschiedliche funkgestützte Funktionalitäten, sowie dedizierte Herausforderungen der Signalausbreitung innerhalb der Flugzeugkabine. In Abschnitt 4 werden Untersuchungsergebnisse für zwei dieser Use Cases vorgestellt und diskutiert. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung in Abschnitt 5.

2. ENTWICKLUNGEN BEI DRAHTLOSEN KOMMUNIKATIONSSYSTEMEN

Bei der aktuellen Entwicklung von Kommunikationssystemen existieren verschiedene Trends, Anforderungen, Technologien, Anwendungen und Paradigmen, welche in der Forschung diskutiert werden [4–6] und in Abb. 1 zusammengefasst sind. Die Anforderungen an drahtlose Kommunikationssysteme steigen weiter an, was insbesondere bei den Key Performance Indicators (KPI) sichtbar wird. Indikatoren wie die maximalen Datenrate oder Gerätedichte steigen, die Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Energieeffizienz, spektrale Effizienz und Mobilität werden verbessert und die Latenz wird deutlich verringert. Neben diesen quantitativen Anforderungen besteht gleichzeitig die Notwendigkeit die Sicherheit und Privatsphäre der Netze zu verbessern.



BILD 1. Trends und Entwicklungen bei zukünftigen drahtlosen Kommunikationssystemen.

Simultan steigen die Herausforderungen durch neue Paradigmen, wie eine globale Abdeckung durch Satelliten, Unbemannten Luftfahrzeugen (UAV), terrestrische und maritime Kommunikationssysteme und sogar einer akustischen Kommunikation Unterwasser. Ein weiterer Trend ist die zunehmende Verdichtung der Netze durch immer mehr und deutlich unterschiedliche Gerätearten, wie Smartphones, Wearables, UAV, IoT, VR/AR.

Um diesen Anforderungen und Herausforderungen zu begegnen, wird der Einsatz von verschiedenen Technologien bei der Signalübertragung und auf Hardwareebene diskutiert und vorangetrieben. Die Erschließung von höheren Frequenzbereichen im Spektrum (mmWave, THz, Optical) ermöglicht die Verwendung von größeren Bandbreiten und damit die Steigerung der Datenrate. Der Einsatz von immer größeren Antennearrays (Ultra-massive MIMO), neuen Modulationsverfahren durch eine räumliche Trennung der Antennenbeams (Orthogonal Time Frequency Space Modulation, OTFS) und von Intelligent Reflecting Surfaces (IRS) ermöglichen den Umgang

mit mehr Endgeräten und steigern die Effizienz bei der Übertragung. Ein komplett neues Paradigma stellt die semantische Kommunikation dar, bei der die physikalisch zu übertragenen Informationen durch den Einsatz von KI Methoden auf die semantische Bedeutung reduziert wird. So kann zum Beispiel ein Bild durch eine Wortfolge oder durch Segmentierung beschrieben werden und nur diese abgeleiteten Informationen übertragen werden. Eine Vorstufe und weitere Verbesserung der digitalen Signalverarbeitung ist das Compressed Sensing bei dem wenige zufällige Abtastwerte ausreichen, um ein Signal vollständig zu rekonstruieren. Alle Innovationen, Paradigmen und Technologien zusammen ermöglichen den Einsatz von Kommunikationssystemen in neuen Verticals, wie IoT, vernetztes und autonomes Fahren, Smart Cities, Smart Grids, Cloud VR uvm.

Besonders die zunehmende Integration von neuen Funktionalitäten in drahtlose Kommunikationssysteme erschließt neue Anwendungsbereiche (vgl. Abb. 2). Neben der Kommunikation zum Informationsaustausch zwischen zwei Geräten ist auch eine Abstandsmessung und Lokalisierung schon Teil von modernen Kommunikationssystemen, wie 5G, Bluetooth oder Ultra-wideband (UWB). Durch die Auswertung von verschiedenen Signalparametern kann der Abstand zwischen mehreren stationären Geräten und einem mobilen Endgerät in einem WSN bestimmt werden und die Position des Mobiles durch robuste Positionierungsalgorithmen abgeschätzt werden. Beim Radio Sensing werden ähnliche Signal- und Kanalparameter verwendet, um Rückschlüsse auf die Ausbreitungs Umgebung des Kommunikationssignals zu ziehen. Dabei muss das Zielobjekt keinen Sensor tragen, da die Ermittlung der Position, des Detektionsstatus oder der Umgebungskarte allein passiv erfolgt. Ein Ansatz zum Radio Sensing, welcher im Abschnitt 4.2 für die Sitzplatzbelegtdetektion in der Flugzeugkabine vorgestellt wird, ist die Auswertung von Mehrwegen durch Reflexionen an Objekten. Die Integration solcher radarähnlichen Funktionalitäten zur Objekterkennung in Kommunikationssysteme wird als Integrated Sensing and Communication (ISAC) oder Joint Communication and Sensing (JCAS) bezeichnet. Die Vision hinter der zunehmender Integration sind Perzeptive Netzwerke, welche dem Kommunikationssystem erlauben die Umgebung zu sehen und zu verstehen ohne das dafür dedizierte Hardware, Spektrum, Energie notwendig ist.



BILD 2. Integrationsstufen drahtloser Kommunikationssysteme.

3. POTENTIALE UND HERAUSFORDERUNGEN DER VERNETZTEN KABINE

3.1. Potentiale & Use Cases

Integrierte Kommunikationssysteme erfüllen verschiedene Funktionen bzw. Aufgaben, welche von der Lokalisierung über die Detektion bis hin zur Zählung von Objekten und Personen reichen. In der vernetzten Flugzeugkabine können diese Funktionen auf eine Vielzahl von Use Cases (vgl. Tabelle 1) angewendet werden. So kann zum Beispiel der Boardingprozess überwacht werden, die Sitzplatzbelegung detektiert werden, Sicherheitsüberprüfungen automatisiert werden und die Crew durch eine bessere Kabinenübersicht unterstützt werden. Die Funktion bestimmt dabei die zum Einsatz kommenden Messverfahren und Algorithmen, um so aus den gemessenen Signalparametern die notwendigen Informationen zu ermitteln und bereitzustellen.

TAB 1. Anwendungsmöglichkeiten von integrierten Kommunikationssystemen in der Flugzeugkabine.

Funktion	Use Case in der Flugzeugkabine
Mapping	Crew Member Mapping zur Übersicht und Anruf-Initialisierung
Lokalisierung	Boardingüberwachung - Lokalisierung der Passagiere
Tracking	Trolley-Tracking
Detektion	Präsenzdetektion eines Passagiers in verbotenen Bereichen z.B. hinter der Cockpittür und Automated Safety Announcements
Klassifizierung	Erkennung der Sitzplatzbelegung in einer Reihe
Identifikation	Prüfung der Sitzplatzzuordnung
Zählung	Boardingüberwachung - Zählung der Passagiere in definierten Bereichen oder an der Tür

3.2. Herausforderungen drahtloser Informations- und Kommunikationstechnik in der Kabine

Die grundlegende Herausforderung von drahtlosen Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) innerhalb der Flugzeugkabine liegen in den vorhandenen Umgebungseinflüssen und dessen Auswirkungen auf den Funkkanal. Aufgrund ihrer Form, des begrenzten Raums und der metallischen Materialien stellt die Kabine eine komplexe und anspruchsvolle Umgebung für Funkssysteme dar [3, 7, 8]. Dies führt zu ungünstigen Ausbreitungsphänomenen, die die Qualität der Verbindung und die Lokalisierungsgenauigkeit verschlechtern. Gleichzeitig birgt dies jedoch auch Potenzial für eine mehrwege-basierte und passive Objekterkennung. Die resultierenden Ausbreitungseffekte und deren Effekte auf die Vernetzung und Lokalisierung sind nachfolgende zusammengefasst aufgeführt:

- **Mehrwegeempfang:** Hervorgehend aus der metallischen, konvexen und konische Form der Kabine ergeben sich verstärkte Reflexionen, die wiederum die Signalqualität erheblich beeinflussen. Dies ist exemplarisch mittels einer Raytracing Simulation in Abb. 3 dargestellt. Der resultierende Effekt für die Kommunikation sind eine generelle Abschwächung und weiterführende Schwankungen der Empfangsfeldstärke. In Abhängigkeit des verwendeten Lokalisierungsverfahren kann dies zu Messfehlern von mehreren Metern führen [3].
- **Abschattung:** Durch die enge Bauweise und hohe Objektdichte innerhalb der Flugzeugkabine entsteht zusätzlich eine hoher Abschattungsgrad zwischen Sendern und Empfängern, sodass die direkten Signalpfade nicht empfangen werden können. Besonders für Lokalisierungsanwendungen bedeutet dies erhebliche Genauigkeitsreduzierungen (vgl. [9]).
- **Dämpfung:** Zusätzlich zu den auftretenden Reflexionen und Abschattungen führt die Dichte an Passagieren zu einer erheblich Zusatzdämpfung der Signale, sodass die Ausbreitungsreichweite in Abhängigkeit der verwendeten Frequenz zusätzlich eingeschränkt wird. Zur Realisierung von Kommunikations- und Lokalisierungsfunktionalitäten resultiert dies in einer höheren Dichte an benötigter Infrastruktur. Eine exemplarische Gegenüberstellung und Veranschaulichung der Ausbreitung wird mittels Funkausbreitungssimulation anhand eines WLAN Access Points und Ultra-wideband (UWB) in Abbildung Abb. 4 dargestellt.
- **Gerätedichte:** Zusätzlich zu den ohnehin herausfordernden räumlichen Eigenschaften führt ein steigender Ausstattungsgrad innerhalb der Flugzeugkabine zwangsweise zu Interferenzen, welche sich wiederum negativ auf die Empfangs- und Lokalisierungsqualität auswirken.

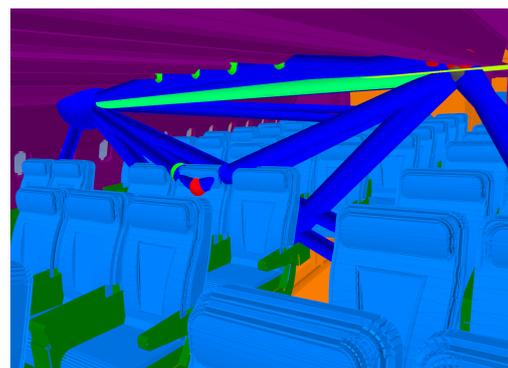


BILD 3. Ray Tracing zur Bestimmung der Ausbreitungspfade in der vernetzten Flugzeugkabine.

Neben diesen physikalischen Randbedingungen ist die Flugzeugkabine aus entwicklungs technischer Sicht ebenfalls herausfordernd, was besonders bei der Evaluierung von informationstechnischen Systemen nachstehenden Problemstellungen zur Folge hat:

- **Zugänglichkeit:** Die Flugzeugkabine ist für Forschungs- und Entwicklungsleistungen schwer zugänglich oder ihr Zugang erfordert einen hohen Aufwand an Ressourcen.

- **Verfügbarkeit:** Technologien, Modifikationen und Hardwarekomponenten sind möglicherweise während des Feldversuchs nicht verfügbar, sind aber nach den durchgeführten Messungen von Interesse.
- **Anpassungsfähigkeit:** Die erhobenen Daten sind spezifisch für das jeweilig vorliegende Szenario. Der Informationsgehalt ist daher beschränkt auf die räumlichen und elektromagnetischen Eigenschaften der Ausbreitungs Umgebung und auf die Merkmale der verwendeten Technologie beschränkt.
- **Repräsentativität:** Die Repräsentativität der Daten ist für die Bewertung integrierter Kommunikationssysteme entscheidend und auf Basis der zuvor beschriebenen Eigenschaften nicht zwangsweise gegeben.

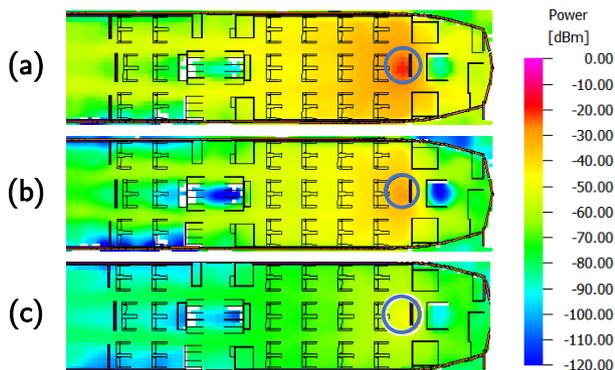


BILD 4. Funkausbreitungssimulation und Abdeckungsanalyse in der Flugzeugkabine: (a) WLAN 2,4 GHz, (b) WLAN 6 GHz, (c) UWB 3.5 GHz. Senderantenne markiert mit blauen Kreis.

Aus diesen Gründen ist die Einbeziehung geeigneter Simulationsumgebungen und Mockups ein essentieller Bestandteil einer nachhaltigen Entwicklungskette von IKT-Systemen innerhalb der Flugzeugkabine. Wie bereits in [3] und [10] herausgestellt sind dabei empirische und ausschließlich stochastische Modelle für die Evaluierung von Vernetzungs-, Lokalisierungs- und Sensing-Funktionalitäten nicht geeignet. Daher ist die Nutzung deterministischer Simulationsumgebungen zur Effizienzsteigerung der Entwicklung und Implementierung von IKT-Systemen entscheidend. Beispiele dafür werden in Kapitel 4 diskutiert.

4. LÖSUNGSANSATZ & ERGEBNISSE

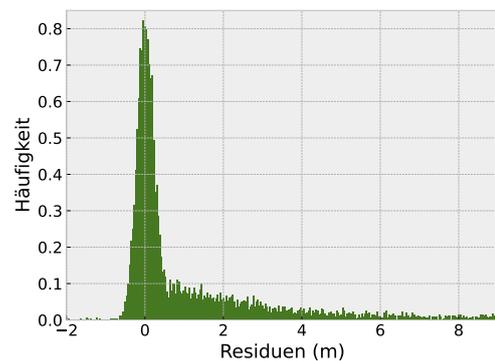
4.1. Aktive Passagier Lokalisierung

Die aktive Funklokalisierung basiert grundlegend auf der Unterscheidung von Geräten in statische Anker (auch Basisstationen) und mobile Tags (auch User Equipment). Die ortsfeste Infrastruktur und dessen Positionen sind in einem definierten Bezugssystem gegeben.

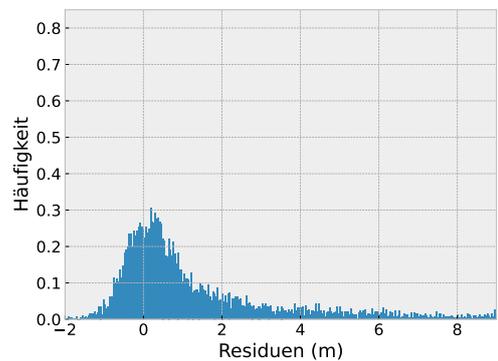
Die Lokalisierung von Passagieren wird in diesem Beitrag auf Basis einer stochastischen Fehlersimulation demonstriert. Dabei werden die auftretenden Phänomene der Abstandsmessungen, verursacht durch den Übertragungskanal, in Abhängigkeit ihrer möglichen Auftrittswahrscheinlichkeiten simuliert. Darunter zählen die Feh-

lerquellen Mehrwege- und Non-Line-of-sight Empfang, sowie Ausfälle verursacht durch beispielsweise zu hohe Dämpfungen. Details zur Vorgehensweise der Simulation der Abstandsmessungen für Indoor Lokalisierungsanwendungen sind in [11] und [12] aufgeführt.

Zur Veranschaulichung der resultierenden Messfehler werden zwei Parametrierungen vorgestellt, welche in Abb. 5 dargestellt sind. Dabei sind zwei wesentliche Qualitätsmerkmale zu erkennen: Die Streuung der Messfehler σ um das mittelwertfreie Residuum als Qualitätsmerkmal des Messsystems, sowie der Grad der Rechtsschiefe als nachgeordnete Eigenschaft des Funkkanals. Letztere werden durch die Auftrittswahrscheinlichkeit von Messausreißern P_{out} beeinflusst.



(a) $\sigma = 0.2 \text{ m}$ $P_{\text{out}} = 0.3$



(b) $\sigma = 0.5 \text{ m}$ $P_{\text{out}} = 0.4$

BILD 5. Fehlerverteilung der Abstandsmessung für zwei unterschiedliche Simulationsparametrierungen.

Basierend auf solchartigen Fehlerverteilungen können anschließend robuste Lokalisierungsverfahren entwickelt und anwendungsnah evaluiert werden. Dies wird am Beispiel einer Passagiertrajektorie im Zuge eines Boardingvorgangs in Abb. 6 dargestellt. Grundlage für die Positionsbestimmung ist ein robustes Lokalisierungsverfahren basierend auf einer stochastischen Zustandsraumrepräsentation (vgl. [13, 14]).

Eine solche Positions- und Trajektorienbestimmung kann auf die gesamte Kabine und die assoziierten Prozesse (vgl. Tabelle 1) skaliert werden. Somit kann eine entsprechende Datengrundlage für standortbezogene Dienste bereitgestellt und in digitale Kabinenservices umgesetzt werden.

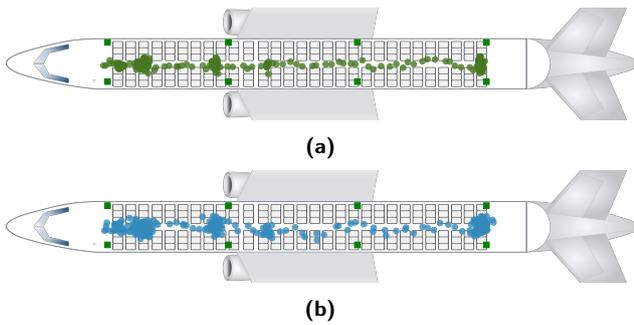


BILD 6. Lokalisierungsergebnis für eine simulierte Passagiertrajektorie während eines Boardingvorgangs unter Annahme zweier Fehlerverteilungen der zugrundeliegenden Abstandsmessungen.

4.2. Passive Erkennung der Sitzplatzbelegung

Ziel der Erkennung der Sitzplatzbelegung ist die Überwachung des Boardings und die Optimierung des Boardingprozesses. Zur Ermittlung des Belegstatus wird die Kanalimpulsantwort des Übertragungskanals zwischen Sender und einem Empfänger aufgezeichnet und die auftretenden Mehrwege durch Reflexionen, Beugungen und Streuungen im Raum analysiert. Der Ansatz und Zusammenhang zwischen den auftretenden Ausbreitungspfaden des Kommunikationssignals und der Kanalimpulsantwort ist in Abb. 7 skizziert.

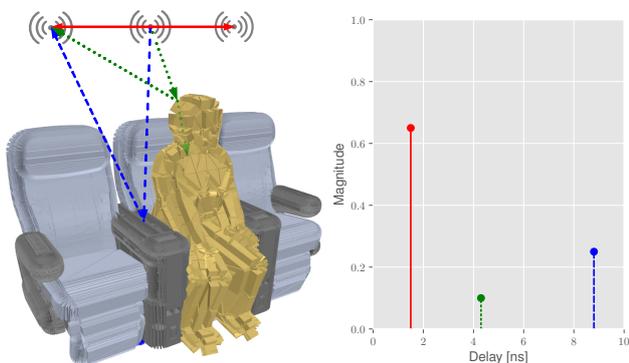


BILD 7. Ansatz zur Sitzplatzbelegtdetektion mittels mehrwege-basierter Radio Sensing. 3D Modell der Sitzreihe mit den möglichen Ausbreitungspfaden und Reflexionen an Objekten (links). Theoretische Kanalimpulsantwort für die Ausbreitungspfade zwischen dem Sender und dem Empfänger (rechts).

In der Labormessung im reflexionsarmen Raum wurde zunächst die prinzipielle Funktionsweise überprüft und die Algorithmen evaluiert (vgl. [1]). Dafür werden drei breitbandige Kommunikationssensoren (UWB) über einer Sitzreihe bestehend aus drei Sitzen angebracht (vgl. Abb. 8). Der Mittlere ist dabei der Sender einer Impulsfolge bzw. Nachricht, welche von den anderen beiden aufgezeichnet und die Kanalimpulsantwort ermittelt wird. Diese Kanalimpulsantworten von beiden Empfängern werden in einer Zeitreihe zusammengefasst. Für vier verschiedene Belegungsmöglichkeiten wurden mehrere Messdurchläufe durchgeführt und Zeitreihen

aufgezeichnet. Diese Status umfassen keine Person auf einem der Sitze, Person links, Person in der Mitte und Person rechts erkennt.

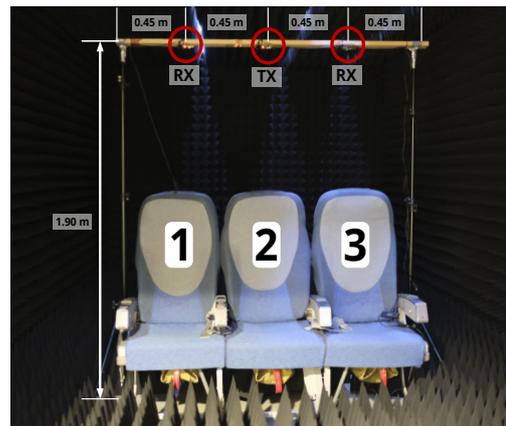


BILD 8. Versuchsaufbau zur Evaluation der Sitzplatzbelegtdetektion im Labor.

Die aufgezeichneten Messreihen werden zum Training der Machine Learning (ML) Methode zur Klassifizierung dem k-nächste-Nachbarn Algorithmus (kNN) verwendet. Die Testdaten können anschließend mittels kNN Algorithmus klassifiziert und den entsprechenden Belegstatus zugeordnet werden. Dabei wird mittels einer definierten Metrik der Abstand zwischen den Zeitreihen bestimmt und der Testdatensatz der Klasse mit dem niedrigsten Abstand zu den besten k nächsten Nachbarn zugeordnet. Die aufgezeichneten Zeitreihen, welche aus der Kombination der beiden Kanalimpulsantworten von den zwei Empfängern gebildet wird, ist für die vier verschiedenen Belegstatus in Abb. 9 dargestellt.

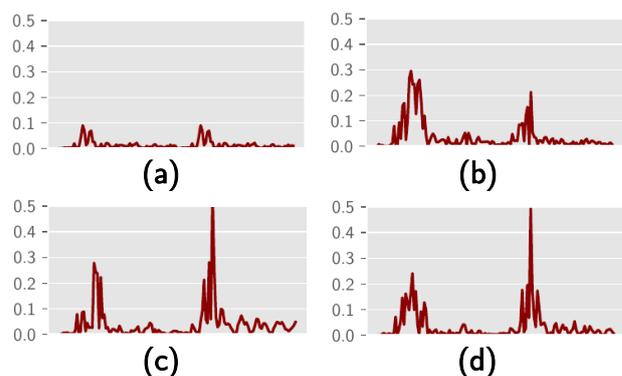


BILD 9. Zeitreihen der Trainingsdaten für die Klassifizierung zur Sitzplatzdetektion in einer Reihe: (a) ohne Person, (b) Person linker Sitz, (c) Person in der Mitte, (d) Person rechter Sitz.

Bei den Messungen in der Laborumgebung konnte eine Genauigkeit der Sitzplatzbelegterkennung mittels Klassifizierung durch den kNN Algorithmus von 100 % erzielt werden. Mit gleicher Vorgehensweise und Versuchsaufbau wurden die Messungen für die Statuserkennung der Tische ergänzend untersucht, wobei eine Genauigkeit von 92 % Genauigkeit bei der Klassifizierung erreicht wurde (vgl. [1]).

5. ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende Beitrag stellt aktuelle und zukünftige Trends im Bereich drahtloser IKT-Systeme, inkl. deren Anforderungen, Technologien und Anwendungen, vor. Gleichzeitig werden diese Potentiale im Kontext der vernetzten Flugzeugkabine diskutiert. Dabei werden sowohl Funktionalitäten und dessen assoziierte Anwendungsfelder, als auch spezifische Herausforderungen der Entwicklung und Untersuchung in der funktechnisch anspruchsvollen Flugzeugkabine vorgestellt.

Darin begründet liegt auch die Nutzung und Etablierung geeigneter Simulations- und Mockup-Umgebungen, um die Implementierung, Dimensionierung und Validierung von IKT-Systemen zu untersuchen und für die flächendeckenden Einsatz vorzubereiten.

Basierend auf diesen Vorarbeiten ist geplant, die emulierten und untersuchten Systeme und Funktionalitäten auf die Gesamtkabinengröße und der damit verknüpften Geräteanzahl zu skalieren.

Kontaktadresse:

paul.schwarzbach@tu-dresden.de

Literatur

- [1] Ninnemann, J., Schwarzbach, P., Schultz, M., & Michler, O. Multipath-assisted radio sensing and state detection for the connected aircraft cabin. *Sensors*, 22(8):2859, Apr. 2022. DOI: [10.3390/s22082859](https://doi.org/10.3390/s22082859).
- [2] Schultz, M. Fast Aircraft Turnaround Enabled by Reliable Passenger Boarding. *Aerospace*, 5(1):8, 03 2018.
- [3] Schwarzbach, P., Engelbrecht, J., Michler, A., Schultz, M., & Michler, O. Evaluation of Technology-Supported Distance Measuring to Ensure Safe Aircraft Boarding during COVID-19 Pandemic. *Sustainability*, 12(20):8724, 1 2020. DOI: [10.3390/su12208724](https://doi.org/10.3390/su12208724).
- [4] You, X., Wang, C.-X., Huang, J., Gao, X., Zhang, Z., Wang, M., Huang, Y., Zhang, C., Jiang, Y., Wang, J., Zhu, M., Sheng, B., Wang, D., Pan, Z., Zhu, P., Yang, Y., Liu, Z., Zhang, P., Tao, X., Li, S., Chen, Z., Ma, X., I, C.-L., Han, S., Li, K., Pan, C., Zheng, Z., Hanzo, L., Shen, X. S., Guo, Y. J., Ding, Z., Haas, H., Tong, W., Zhu, P., Yang, G., Wang, J., Larsson, E. G., Ngo, H. Q., Hong, W., Wang, H., Hou, D., Chen, J., Chen, Z., Hao, Z., Li, G. Y., Tafazolli, R., Gao, Y., Poor, H. V., Fettweis, G. P., & Liang, Y.-C. Towards 6G wireless communication networks: Vision, enabling technologies, and new paradigm shifts. *Science China Information Sciences*, 64(1):110301, 2020. ISSN: 1869-1919. DOI: [10.1007/s11432-020-2955-6](https://doi.org/10.1007/s11432-020-2955-6).
- [5] Wang, C.-X., Huang, J., Wang, H., Gao, X., You, X., & Hao, Y. 6G Wireless Channel Measurements and Models: Trends and Challenges. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 15(4):22–32, 2020. ISSN: 1556-6080. DOI: [10.1109/MVT.2020.3018436](https://doi.org/10.1109/MVT.2020.3018436).
- [6] Alwis, C. D., Kalla, A., Pham, Q.-V., Kumar, P., Dev, K., Hwang, W.-J., & Liyanage, M. Survey on 6G Frontiers: Trends, Applications, Requirements, Technologies and Future Research. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2:836–886, 2020. ISSN: 2644-125X. DOI: [10.1109/OJCOMS.2021.3071496](https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2021.3071496).
- [7] Ringel, J., Klippfahn, S., & Michler, O. Simulation of wave propagation for radio and positioning planning inside aircraft cabins. In *3rd International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, 12 2013.
- [8] Schmidt, J. F., Neuhold, D., Bettstetter, C., Klaue, J., & Schupke, D. Wireless Connectivity in Airplanes: Challenges and the Case for UWB. *IEEE Access*, 9:52913–52925, 2021. ISSN: 2169-3536. DOI: [10.1109/ACCESS.2021.3070141](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3070141).
- [9] Geyer, F. & Schupke, D. Precise onboard aircraft cabin localization using uwb and ml, 2022. DOI: [10.48550/ARXIV.2203.08403](https://doi.org/10.48550/ARXIV.2203.08403).
- [10] Schwarzbach, P., Ninnemann, J., & Michler, O. Enabling Radio Sensing for Multimodal Intelligent Transportation Systems: From Virtual Testing to Immersive Testbeds. In *2022 2nd IEEE International Symposium on Joint Communications & Sensing (JC&S)*, 2022.
- [11] Schwarzbach, P., Weber, R., & Michler, O. Statistical evaluation and synthetic generation of ultrawideband distance measurements for indoor positioning systems. *IEEE Sensors Journal*, 22(6):4836–4843, Mar. 2022. DOI: [10.1109/jsen.2021.3121627](https://doi.org/10.1109/jsen.2021.3121627).
- [12] Jung, A., Schwarzbach, P., & Michler, O. Auto-positioning in radio-based localization systems: A bayesian approach, 2022. DOI: [10.48550/ARXIV.2207.08503](https://doi.org/10.48550/ARXIV.2207.08503).
- [13] Jung, A., Schwarzbach, P., & Michler, O. Future parking applications: Wireless sensor network positioning for highly automated in-house parking. In *Proceedings of the 17th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*. SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2020. DOI: [10.5220/0009891107100717](https://doi.org/10.5220/0009891107100717).
- [14] Schwarzbach, P., Michler, A., & Michler, O. Tight integration of GNSS and WSN ranging based on spatial map data enhancing localization in urban environments. In *2020 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS)*. IEEE, June 2020. DOI: [10.1109/icl-gnss49876.2020.9115519](https://doi.org/10.1109/icl-gnss49876.2020.9115519).