



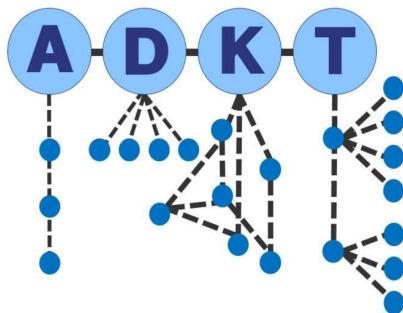
Lufthansa Technik AG

Schlussbericht FKZ 20K1901A:

„Alternative Drahtlose Kommunikationstechnologien“ (ADKT)

Ein Forschungsvorhaben im Rahmen des 6. nationalen zivilen Luftfahrtforschungsprogramms

Projektlaufzeit: 01.09.2020 bis 31.08.2023



Gefördert durch:

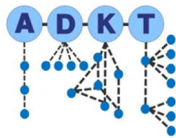


Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

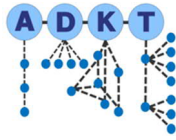
Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 20K1901A gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.



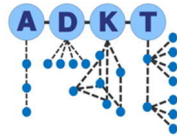
Inhalt

I.	Kurzdarstellung	3
I.1	Aufgabenstellung	3
I.2	Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde	5
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	6
I.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand vor dem Projekt	10
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	14
II.	Eingehende Darstellung	16
II.1	Zielsetzung und erzielte Ergebnisse	16
II.2	Erläuterung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	33
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	34
II.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses	34
II.5	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	35
II.6	Veröffentlichungen und Vorträge	35
	Literaturverzeichnis	36
	Abbildungsverzeichnis	37



Abkürzungen

ADKT	Alternative drahtlose Kommunikationstechnologien (Projekttitel)
AP	Arbeitspaket (als Teil eines HAP)
CMS	Cabin Management System
DDE	Dresden Elektronik GmbH (LHT UA)
DMU	Digital Mock-Up
D2D	Device-to-Device
ECC	Electronic Communications Committee
EMI	Electromagnetic Interference
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
HAP	Hauptarbeitspaket
IFE	In-Flight Entertainment (System), z. B. Unterhaltungselektronik am Sitz
IFC	In-Flight Connectivity (System), z. B. Internetzugang
IP	Intellectual Property
LHT	Lufthansa Technik
ISM	Industrial, Scientific and Medical (Band)
MQTT	Offenes Netzwerkprotokoll für Machine-to-Machine-Kommunikation (M2M)
MTU	Multi-Technology-Unit
PED	Personal Electronic Device
RGB	Rot, Gelb, Blau (Licht)
RF	Radio Frequency
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics
TUD	Technische Universität Dresden
UA	Unterauftragnehmer
UWB	Ultra Wide Band
Wi-Fi	Markenname bzw. Kunstbegriff. Funknetzwerk auf Basis des IEEE 802.11 Standards
WLAN	Wireless Local Area Network (technisches Equivalent zu Wi-Fi)
ZAL	Zentrum für angewandte Luftfahrtforschung



I. Kurzdarstellung

I.1 Aufgabenstellung

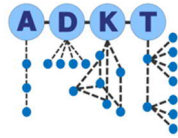
I.1.1 Problemstellung

Bis 2025 sollen weltweit mehr als 38.000 Flugzeuge im Einsatz sein. Die Fluggesellschaften stehen vor der Herausforderung, die Verfügbarkeit ihrer Flotte zu verbessern und Flugverspätungen und -stornierungen zu vermeiden, um Folgekosten zu reduzieren. Neue digitale Anwendungen – die auf Biometrie, Lokalisierung und drahtloser Sensorik basieren – werden Einzug in die Flugzeugkabine finden. Flugzeug- und Flugzeugkabinensysteme werden somit in Zukunft große Datenmengen austauschen und einsammeln.

Durch das Sammeln von Daten und deren Übertragung in Echtzeit ergibt sich die Möglichkeit, jederzeit und in Echtzeit den Zustand für jede Komponente, die sich im Flugzeug bzw. in der Flugzeugkabine befindet, abzurufen und auszuwerten. Mit Hilfe von Applikationen am Boden und auch im Flugzeug können generierte Daten gespeichert, sortiert, analysiert, interpretiert und in aussagekräftige MRO-Maßnahmen umgesetzt werden. Da die neuesten Flugzeugtypen jedoch 50-mal mehr Daten produzieren als ältere Generationen, führt die daraus resultierende Zunahme des Datenvolumens zu zusätzlichen Herausforderungen und einer zunehmenden Komplexität im Geschäft der MRO-Zulieferer.

Neben der aus der Zunahme des zu verarbeitenden Datenvolumens resultierenden Problematik hinsichtlich der MRO-Prozesse liegt eine weitere Herausforderung der Zukunft darin, die neuen digitalen Anwendungen in den komplexen Flugzeuginnenbereich zu integrieren. Im Flugzeuginnenbereich gelten hohe Standards in den Bereichen Kommunikationsqualität und Übertragungssicherheit, die es zu erfüllen gilt:

- Der ARINC429-Standard wurde in den 70er Jahren als Avionics Data Bus – Datenbus-Standard für Verkehrsflugzeuge – etabliert und ist in fast allen Zivilflugzeugen heute noch vorhanden.
- Im Jahr 1980 entwickelte die Firma Boeing einen leistungsfähigeren digitalen Datenbus mit der Digital Autonomous Terminal Access Communication (DATAC), die später als ARINC629-Standard eingeführt wurde.
- Die Steigerung der Avionik-Funktionalität und die größere Datenmenge in modernen Flugzeugtypen führte zu einer höheren Komplexität, die die Entwicklung eines modernen Standards notwendig machte. Die Lösung war das AFDX-Protokoll (für Avionics Full Duplex Switched Ethernet), oder der ARINC664-Standard (Teil 7). Der ARINC664-Standard basiert auf dem Ethernet-Protokoll und unterstützt die modernen Avionik-Architekturen.



Aus informationstechnischer Sicht gewährleisten diese Standards hohe Verfügbarkeiten, Zuverlässigkeit, hohe Datenraten, niedrige Latenzen und Bitfehlerraten sowie die Integrität des Gesamtsystems eines Flugzeuges im Allgemeinen. Neue drahtlose Technologien lösen heutige Kabelverbindungen allmählich ab und sollten die gleiche Zuverlässigkeit haben.

Aufgrund der komplexen Integration in den Flugzeuginnenbereich ist die Nutzung der neuen drahtlosen digitalen Technologien und Services in der Luft aktuell nur beschränkt möglich. Standardgemäß kommt derzeit in modernen Flugzeugkabinen als Funkkommunikation kommerzielles WLAN zum Einsatz, welches jedoch häufig überlastet und nur für Passagieranwendungen ausgelegt ist. Es wurde kurz gesagt nicht für Anwendungen der Luftfahrt entwickelt.

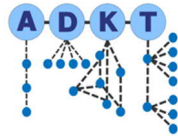
I.1.2 Resultierende Zielsetzung

Genau hier setzte das Projekt ADKT an. Das übergreifende Ziel dieses Vorhabens war es, alternativ zum WLAN, drahtlose Funktechnologien für den Einsatz in Flugzeugkabinen zu erforschen und diese hinsichtlich verschiedener Anforderungen, wie Reichweite, Bitrate, Lokalisierungsgenauigkeit, Sicherheit, Energieeffizienz und Zulassbarkeit im Flugzeug sowie hinsichtlich der Interoperabilität bzw. des Koexistenzpotenzials zu untersuchen und zu bewerten. Analysiert werden sollten neue kabellose Infrastrukturen und Funktechnologien, wie z. B. IEEE 802.15.1/Bluetooth, IEEE 802.15.4/ZigBee, IEEE 802.15.4a,z/Ultra Wide Band (UWB), Technologie nach dem 5G-Standard (Fünfte Generation für mobiles Internet und Mobiltelefonie), Millimeter-Wave (60 GHz), Licht oder drahtlose Terahertz-Kommunikation (300 GHz), die durch eine erhöhte Reichweite, Bitrate oder Lokalisierungsgenauigkeit dazu beitragen, neue digitale Services (z. B. Just-in-Time Logistik oder bedarfsgenaue Reparaturen in der Kabine) im Bereich der Luftfahrt zu ermöglichen.

Aufbauend auf den Forschungsergebnissen wird angestrebt, eine generische Systemarchitektur zu entwerfen und diese als Flugzeugmodifikation in älteren Flugzeugmustern im Rahmen von Retrofits einzurüsten. Die nachrüstbare Systemarchitektur sollte herstellerunabhängig und auf unterschiedliche Flugzeugmuster anpassbar sein, so dass deren Integration in heutige und zukünftige Flugzeugmuster mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand möglich wird. Die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes sollen nach Möglichkeit genutzt werden, um ein System anzubieten, welches die drahtlose Sammlung der Daten von Sensoren, Steuerungsanwendungen in der Kabine wie beispielsweise Lichtsteuerung oder die Datenverteilung in Unterhaltungssystemen wie beispielsweise Video- und Audioinhalten sowie andere luftfahrtspezifischen Applikationen erlaubt.

Folgende technisch-wissenschaftliche Verbundziele sollten erreicht werden:

- Erforschung von Übertragungsmöglichkeiten von alternativen drahtlosen Technologien (z. B. IEEE 802.15.1/Bluetooth, IEEE 802.15.4/ZigBee, IEEE 802.15.4a,z/UWB, IEEE 802.15.7/Visual Light Communication (VLC), 5G, Millimeter Wave (30 – 300 GHz) oder Terahertz-Kommunikation) und ihre Integration in die Flugzeugkabine. Dies beinhaltet die



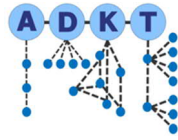
systematische Erarbeitung von Anwendungsszenarien und Prüfung der Eignung der Technologien zum Einsatz in verschiedenen Use Cases für Kommunikation und Lokalisierung innerhalb der Flugzeugkabine. Ferner soll eine Analyse der funktechnischen Eigenschaften innerhalb der Flugzeugkabine sowie die Bewertung der in Frage kommenden Technologien und Beantwortung spezifischer Forschungsfragen hinsichtlich der Erhöhung der Übertragungsperformance, Störrobustheit, Latenzzeiten, Energieverbrauch, Zuverlässigkeit, Lokalisierungsfunktionalität und Verfügbarkeit der funkbasierten Datenübertragung sowie hinsichtlich der Interoperabilität bzw. des Koexistenzpotenzials und der Eignungsfähigkeit für Kommunikations- und Lokalisierungsanwendungen innerhalb der Flugzeugkabine vorgenommen werden.

- Erarbeitung von Systemspezifikationen für vier ausgewählte Technologien, mit dem Ziel der Identifizierung von Bauteilen und Realisierung einer generischen Gesamtarchitektur für drahtlose Datenübertragung im Flugzeug für unterschiedlichste Anwendungsszenarien und deren spezifische Anforderungen.
- Inbetriebnahme der Komponenten der Gesamtarchitektur und deren Erprobung durch geeignete Kommunikationskonzepte, beginnend mit theoretischen bzw. simulativen Betrachtungen, über leitungsgebundene Messaufbauten bis hin zur beispielhaften Umsetzung von Use Cases als Demonstrator (Versuchsmuster) in der Flugzeugkabine.
- Prüfung der im Rahmen der Testumgebung entwickelten Gesamtarchitektur im Hinblick auf die nachfolgende Integration in die Flugzeugkabine (Aufzeigen der kritischen Pfade für einen Flugzeugzulassungsprozess) und die Perspektive der Verwertung der Forschungsergebnisse innerhalb sowie möglicherweise außerhalb der Luftfahrt.

Konkret lagen die wissenschaftlichen Ziele innerhalb des Projektes ADKT in dem Aufbau einer Simulationsplattform zur Evaluierung und Bewertung von drahtlosen Kommunikationssystemen. Dazu gehörten im Detail die softwaretechnische Simulationsumgebung für eine Funkplanung, die Funksignalgenerierung und -analyse, die physikalische Generierung und Konfiguration von Störeinflüssen mittels Kanalemulator, die Interferenzbeurteilung verschiedener, für den Einsatz in der Flugzeugkabine geeigneter Funktechnologien, diverse Interoperabilitätstests sowie im Ergebnis die Bewertung und Optimierung der Robustheit der Übertragungssysteme mit dem Gesamtziel, ein optimiertes Konzept für Kommunikations- und Lokalisierungsanwendungen in der Flugzeugkabine aufzustellen und umzusetzen.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde

ADKT war ein Verbundvorhaben der Partner Lufthansa Technik AG (fortan LHT), welche die Konsortialführung übernahm, der Technischen Universität Dresden (fortan TUD), sowie der Firma Dresden Elektronik GmbH (DDE), die als Unterauftragnehmer der Lufthansa Technik an dem Projekt beteiligt war.



Das Vorhaben wurde im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramm VI-1 unter der Typisierung Forschungsprojekt der Programmlinie „Technologie, Fachbereich: „Passagierfreundliche und ökoeffiziente Kabine“ mit dem Förderziel „Leistungsfähige und effiziente Luftfahrt“ durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert. Neben dem Einfluss auf den Ablauf des Projektes durch die Covid-19 Pandemie zeichnete sich außerdem in der zweiten Hälfte des Projektzeitraumes ab, dass durch Verzögerungen bei der Bereitstellung eines Flugzeugrumpfes für den Forschungszweck die ursprüngliche Zeitplanung nicht einzuhalten war. Hieraus entstand schließlich der Anlass, einen Änderungsantrag zu stellen und eine kostenneutrale Verlängerung des Gesamtprojektplans zu beantragen. Im Zuge des Änderungsantrags wurde die Projektlaufzeit um 6 Monate vom Enddatum 28.02.2023 bis zum 31.08.2023 verlängert.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Folgenden werden die Inhalte der Arbeitspakete und die zeitlichen Abfolgen des ursprünglichen Projekts dargestellt. Der Projektplan (siehe Abbildung 1) war in 5 Hauptarbeitspakete (HAP) unterteilt. Jedes Hauptarbeitspaket wurde von einem Partner verantwortet, die jeweiligen Arbeitspakete wurden auch von einem der Partner federführend verantwortet, so dass sich über die gesamte Projektlaufzeit eine klare Verantwortung ergab.

I.3.1 Inhaltliche Planung der Arbeitspakete

Das HAP 0 diente der übergreifenden Organisation und Koordination des Verbundprojekts und beinhaltete die Gesamtorganisation seitens LHT sowie die übergreifende und projektbegleitende Organisation und Koordination der Partner. Dies stellte sicher, dass das Projekt in enger Abstimmung der Partner untereinander ablief und Meilensteine sowie gesteckte Projektziele erreicht wurden.

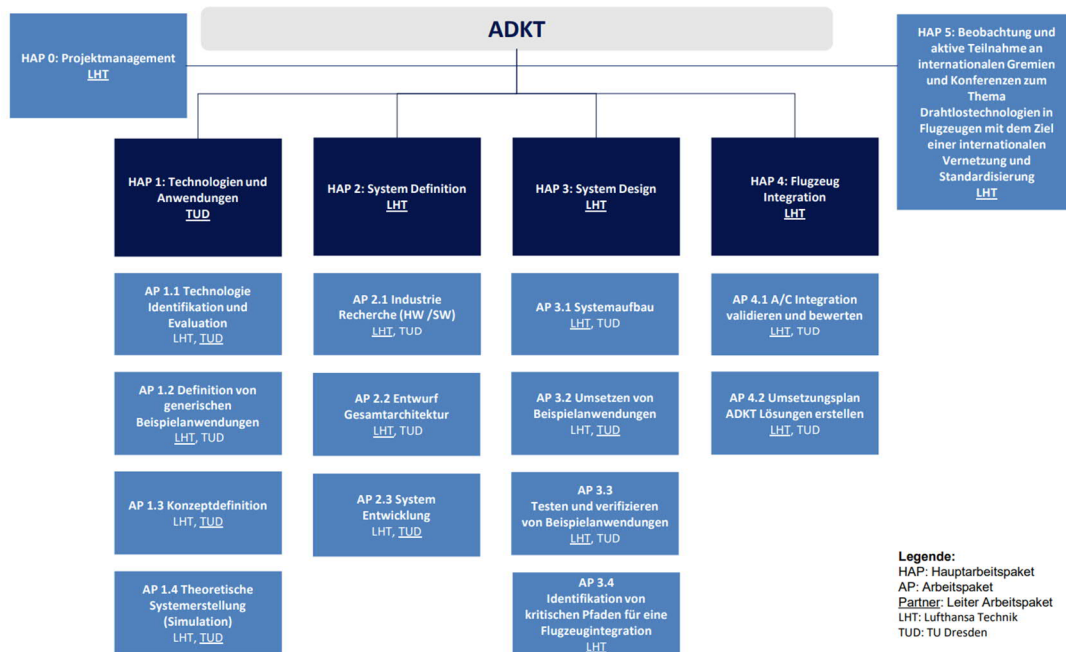
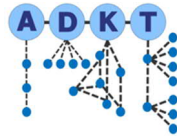


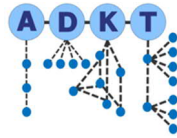
Abbildung 1: Projektstrukturplan

Im HAP 1 wurde neben der Recherche zu bestehenden Technologien eine Analyse durchgeführt, die zum Ziel hatte, die relevanten Anwendungsfelder in der Flugzeugkabine zu identifizieren und die für das Projekt wichtigen Merkmale dieser Anwendungen herauszuarbeiten. Mithilfe dieser Ergebnisse fand eine Technologieauswahl statt und es konnte ein Konzept für ein Testsystem erarbeitet werden. Dieses Testsystem wurde seitens der TUD simulativ untersucht (Funksimulation).

Im HAP 2 wurde initial eine Recherche zu der verfügbaren Hardware vorgenommen, um entsprechende Module und Geräte für ein Testsystem auszuwählen. Nach dieser Auswahl wurde eine Architektur des Gesamtsystems entwickelt, welches in HAP 3 umgesetzt werden sollte. Dies beinhaltete isolierte Testaufbauten für die Systementwicklung unter Laborbedingungen sowie den Aufbau eines großen Gesamt-Testsystems für eine Installation in einem Airbus A320 Flugzeugkabinen-Mockup.

Im HAP 3 wurden die spezifizierten Testsysteme dann umgesetzt. Dies begann mit dem Zusammen- und Einbau der Hardware. Danach wurde die gesamte Software sowie die Konfigurationen für alle Mess- und Testsysteme erstellt und schlussendlich die Inbetriebnahme aller Systeme durchgeführt. Dieses Arbeitspaket wurde abgeschlossen mit diversen Systemtests und Messungen innerhalb des Kabinenmockups, wobei die gewonnenen Erkenntnisse direkt in die Veränderung des Messsetups und erneute Tests mündeten.

Im HAP 4 wurde dann die Integration in ein Flugzeug aus Zulassungs- und Produktionssicht durchgespielt sowie eine Verwertungsperspektive für die unterschiedlichen Teilsysteme evaluiert.



Das HAP 5 war projektbegleitend darauf ausgelegt, die erarbeiteten Inhalte durch die Vernetzung innerhalb der Luftfahrtindustrie zu teilen und Impulse von außen mit in dem Projekt aufzunehmen.

1.3.2 Zeitliche Planung des Projektverlaufs

Der ursprünglich geplante zeitliche Ablauf des Projektes ist in Abbildung 2 dargestellt.

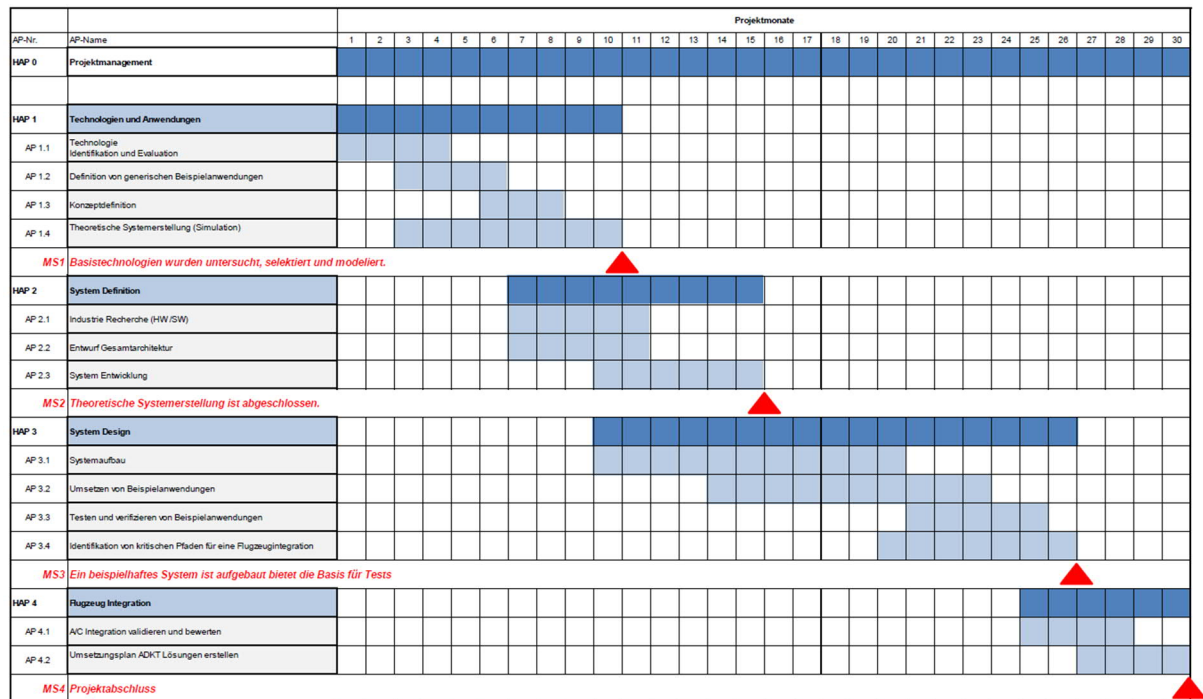
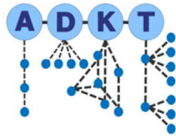


Abbildung 2: Initialer ADKT Projekt-Balkenplan

Im September 2022 wurde dann ein Änderungsantrag eingereicht mit dem Ziel, das Projekt kostenneutral zu verlängern, da einige Verzögerungen auftraten:

- Bei der Definition der Gesamtarchitektur (AP 2.2) und der System-Entwicklung (AP 2.3) kam es zu Verzögerungen. Gründe hierfür lagen in der Neuausrichtung der Testumgebung für die feste Installation in einem Testflugzeug (LHT-eigenes Flugzeugrumpfsegment im Zentrum für angewandte Luftfahrtforschung/ZAL, Hamburg).
- Die Arbeitspakete 3.1 Systemaufbau und 3.2 Umsetzung von Testanwendungen waren entsprechend ebenfalls von Verzögerungen betroffen. Diese AP waren stark abhängig von den Ergebnissen aus HAP2 (Systemdefinition) und konnten erst mit dem Vorliegen vorläufiger Ergebnisse begonnen werden.
- Die oben erwähnte Installation in einem Testflugzeug konnte erst mit Fertigstellung des Mockups im ZAL umgesetzt werden. Diese fand erst im Februar 2023 statt. Erst danach konnte das Testen und Verifizieren der Beispielanwendungen (AP 3.3) durchgeführt



werden. In der Summe ergab sich eine Verschiebung der Arbeitspakete um 6 Monate (Projektende am 31.08.2023).

Der aktualisierte Zeitplan (Stand: Januar 2023) ist in Abbildung 3 zu sehen.

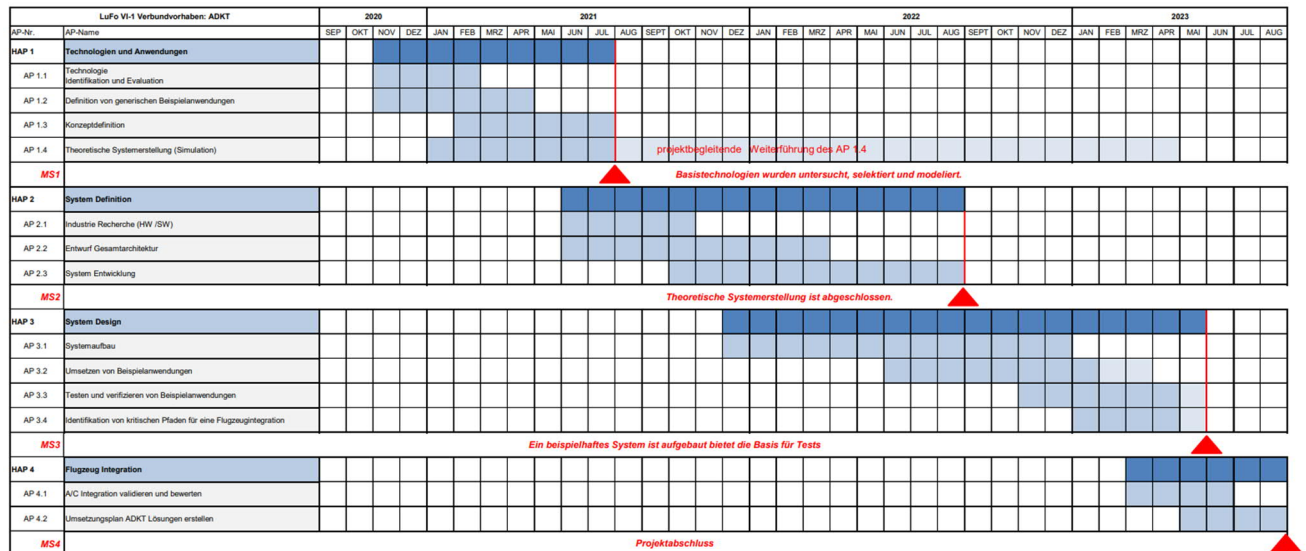
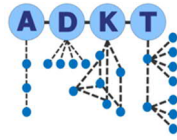


Abbildung 3: Aktualisierter ADKT Projekt-Balkenplan



I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand vor dem Projekt

Mit der zurzeit in den Flugzeugkabinen integrierten WLAN-Technologie sind viele Nachteile verbunden. Ausgehend von der Beschreibung der mit dem Einsatz des aktuellen WLAN-Standards (inkl. Consumer-WLAN) einhergehenden Probleme und Einschränkungen werden nachfolgend weiterentwickelte und in der Zukunft zunehmend einzusetzende WLAN-Standards sowie alternative zu WLAN-Technologien, die teilweise auch im Projekt ADKT betrachtet wurden, vorgestellt.

I.4.1 WLAN nach dem Standard IEEE 802.11 - Problem und Handlungsbedarf

In modernen Flugzeugkabinen wird aktuell standardisiertes WLAN nach dem Standard IEEE 802.11 eingesetzt, welches aktuell hauptsächlich im 2,4 GHz und 5 GHz-Frequenzband arbeitet¹, vorrangig auf die Nutzung von Passagieranwendungen ausgelegt und vergleichbar mit einem WLAN-Heimnetzwerk ist. Die Einschränkungen des 5 GHz Bandes für die Nutzung der verfügbaren Kanäle im Flugzeug (z. B. durch das Wetterradar) lässt nur die ersten 80 MHz des Frequenzspektrums (UNII-1) für diese Anwendung zu.² Kombiniert mit den zur Verfügung stehenden Kanälen des hoch frequentierten 2,4 GHz (ISM-) Bandes, die eine Gesamtbandbreite von 66 MHz bieten (Kanal 1, 6 und 11, jeweils mit 22 MHz)³, kommt man auf eine nutzbare Gesamtbandbreite von 146 MHz für die gesamte Kabine. Dem gegenüber zeichnen sich die Anwendungen, welche die Passagiere häufig nutzen (z. B. Video-Streaming, Social Media Applikationen, Web Browsing), durch einen meist sehr hohen Datenverbrauch aus. Diese Architektur erlaubt es deshalb nicht, für den Flugablauf notwendige oder wartungsunterstützende Anwendungen hinzuzufügen, da eine unterbrechungsfreie und sichere Übertragung nicht gewährleistet werden kann.

Neben der häufigen Überlastung der WLAN-Technologie in der Flugzeugkabine weist diese ebenso sicherheitsbezogene Lücken, z. B. aufgrund unbeständiger Datenübertragung, auf. Zum einen ist die WLAN-Technologie nicht sicher in Bezug auf Abhörangriffe⁴ und zum anderen kann es zu Übertragungseinstellungen- oder Verzögerungen aufgrund von Wellen-Überschneidungen (Interferenzen) kommen.

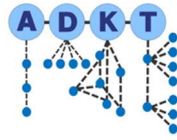
Aus den genannten Gründen sollen alternative drahtlose Kommunikationstechnologien zum aktuellen WLAN-Standard erforscht und auf ihre Integration in der Flugzeugkabine hin überprüft werden.

¹ (Schnabel, 2023)

² (Europäische Kommission, Durchführungsbeschluss (EU) 2022/179 der Kommission vom 8. Februar 2022 über die harmonisierte Nutzung von Funkfrequenzen im 5-GHz-Band [...], 2022)

³ (Abdalla, 2012) S. 73

⁴ (Abdalla, 2012) S. 140



I.4.2 Der neue WLAN-Standard im Heimbereich: IEEE 802.11ax bzw. Wi-Fi 6 (E)

Im Jahre 2019 wurde der Standard IEEE 802.11ax angekündigt, der eine Weiterentwicklung von IEEE 802.11n im 2,4 GHz-Bereich und von IEEE 802.11ac im 5 GHz-Bereich ist und als Wi-Fi 6 bezeichnet wird. Mit diesem Standard sollen deutlich höhere Datenraten mit bis zu 4,8 Gbit/s möglich sein. Dies wird u. a. durch Verwendung eines alternativen Modulationsverfahrens des Trägersignals, höhere Modulationsverfahren des Nutzsignals, Optimierungen am WLAN-Protokoll sowie größere Kanalbandbreiten erreicht. Mit Wi-Fi 6E wurde das 6 GHz Band in Verbindung mit dem 802.11ax Standard eingeführt. Diese Kombination erlaubt bis zu drei 160 MHz Kanäle im Frequenzbereich 5,925 bis 6,425 GHz. Eine Ratifizierung der Frequenzen steht aber noch in diversen Ländern aus. In Deutschland wurden diese Frequenzen zur Nutzung durch WLAN-Geräte während der Laufzeit des ADKT Projektes freigegeben.⁵ Auch die Hardware für Wi-Fi 6E wurde erst im Laufe des Projektes verfügbar.

I.4.3 Wireless Personal Area Network (WPAN) nach IEEE 802.15-Standard

Viele alternative drahtlose Kommunikationstechnologien könnten unter die Netzwerkkategorie Wireless Personal Area Network (WPAN) fallen. Die Kategorie WPAN zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass sie gut für Anwendungen in kleinen Distanzen genutzt werden kann und sich ad-hoc- Netzwerke realisieren lassen. Beispieltechnologien dieser Klasse sind Bluetooth und ZigBee.

I.4.3.1 Bluetooth nach IEEE 802.15.1

Bluetooth, welches auf dem 2,4 GHz-ISM-Band agiert, gilt aufgrund des eingesetzten Frequenzsprungverfahrens (FHSS) als relativ sichere Technologie⁶, was beispielsweise Aspekte wie den Zugriff Dritter betrifft. Mit den neuesten zur Verfügung stehenden Bluetooth-Standards 5.4 lassen sich energiesparend viele Geräte mit geringer Hardwaregröße innerhalb geringer Entfernungen aber auch relativ geringer Datenraten schnell miteinander vernetzen, wodurch es sich gerade für Anwendungen im Bereich IoT und Industrie 4.0 eignet.

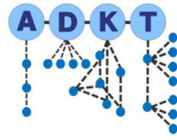
I.4.3.2 ZigBee nach IEEE 802.15.4

Der Standard IEEE 802.15.4 spezifiziert den Physical- und MAC-Layer von WPANs mit niedriger Datenrate, welche sich durch einen niedrigen Energiebedarf und stabile Verbindungen auszeichnen und als Wireless Sensor Networks (WSN) eingesetzt werden können. Eine bekannte Implementierung, die gegenüber Bluetooth - welches eher für Multimedia-Anwendungen eingesetzt wird - für die Anwendung der stromsparenden schnellen Übertragung von kleinen Datenmengen entwickelt wurde, ist ZigBee.

Bei ZigBee liegt der fokussierte Nutzen der Technologie auf einem geringen Stromverbrauch, um batteriebetriebenen Endgeräten Laufzeiten von mehreren Jahren zu ermöglichen. Hierzu operieren ZigBee und IEEE 802.15.4 (im Vergleich zu Bluetooth) bewusst mit einer

⁵ (WiFi Alliance, 2023)

⁶ (Abdalla, 2012) S. 29



vergleichsweise geringen Datenrate (bei ZigBee 250 kbit/s). Weiterhin ist ein sehr kompakter Aufbau von ZigBee-Geräten möglich und die Herstellung soll zu einem niedrigen Preis erfolgen können.

I.4.3.3 Ultra-wideband-Technologie (UWB) nach IEEE 802.15.4a und zukünftig 802.15.4z-Standard

UWB wurde ursprünglich als Kommunikationstechnologie mit hohen Datenraten innerhalb von WPANs als Standard IEEE802.15.3a vorangetrieben. Diese Standardisierungsbemühungen wurden jedoch eingestellt. Parallel dazu fand die UWB-Standardisierung innerhalb von IEEE 802.15.4a für WPANs mit niedriger Datenrate Anwendung. Hier wird speziell der Einsatz von UWB innerhalb von WSNs sowohl für Kommunikations- als auch präzise Lokalisierungsanwendungen spezifiziert. Aktuelle Standardisierungsbemühungen werden durch die 2018 gegründete „UWB Alliance“ initiiert und sollen zwischen 2022 bis 2024 in den Standard 802.15.4z münden sowie UWB-Technologie dem Massenmarkt zugänglich machen.

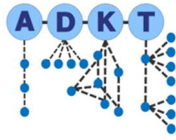
Allgemein zeichnet sich die UWB-Technologie durch die Anwendung in einem kurzdistanzierten Bereich zum Austausch großer Datenmengen aus. Durch die hohe Auflösungsqualität kann diese Technologie besonders im Bereich der Ortung für das Projekt ADKT interessant sein.

Bei UWB werden große Frequenzbereiche mit hoher Bandbreite von mindestens 500 MHz genutzt, wobei die Technologie unabhängig von einer bestimmten Frequenz ist. Damit verteilt sich die Sendeenergie über einen großen Frequenzbereich (niedriger Signalpegel), wodurch Störungen (Interferenzen) deutlich reduziert werden können und allein die Detektion einer Kommunikation schwer zu realisieren ist. Die hohe Bandbreite resultiert in einer geringen Sendeleistung und damit geringem Energieverbrauch. Es sind relativ hohe Datenraten (bis 6,8 Mbit/s) jedoch mit geringerer Reichweite übertragbar (Nahbereichs-Funktechnik). Weiterhin zeichnet sich die Technologie durch geringe Latenzzeiten aus. Die Bundesnetzagentur hatte in ihrer Verfügung 135/2019 die Rahmenbedingungen zur Nutzung von Frequenzen und zugehörige Sendeleistungen für den Einsatz von UWB-Systemen an Bord von Flugzeugen festgelegt und diese ausschließlich zum Zweck der flugzeuginternen Kommunikation erlaubt.⁷

I.4.3.4 Funkkommunikation im Flugzeug – Wireless Avionics Intra-Communications (WAIC)

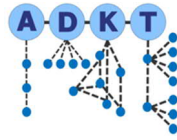
In der Luftfahrt gibt es innerhalb eines breiten Branchenkonsortiums Bestrebungen, den alternativen Standard Wireless Avionics Intra-Communications (WAIC) zu erarbeiten. Dieser hat zum Ziel, elektrische Verkabelungen im Flugzeug zu reduzieren und damit Gewicht einzusparen, eine verbesserte Installationsflexibilität sowie redundante Übertragungskanäle zu schaffen und bewegliche Flugzeugelemente zu überwachen. WAIC soll in disjunkten Frequenzbereichen zum WLAN wirken und könnte somit dessen negative Aspekte hinsichtlich der Überlastung kompensieren. Jedoch ist die WAIC-Technologie nach derzeitigem Stand allein für Anwendungen

⁷ (Bundesnetzagentur, 2023)



vorgesehen, die die sichere Flugdurchführung unterstützen sollen, und nicht für andere Anwendungen. WAIC betrachtet Anwendungsbereiche sowohl innerhalb als auch außerhalb der Flugzeugkabine zur Vernetzung unterschiedlicher Komponenten mit unterschiedlichen Anforderungen an die erforderlichen Datenraten. Im Hinblick auf die Zulassung dieser Technologie stellt die Überschneidung der Sende- und Empfangsfrequenz (im 4,2 bis 4,4 GHz-Frequenzband) des Radio-Höhenmessers eine Herausforderung dar, weshalb es weitere alternative drahtlose Kommunikationstechnologien für die Flugzeugkabine zu erforschen gilt.

Innerhalb des Forschungsprojektes wurden noch weitere Funktechnologien mit einbezogen, auf die an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden soll, da diese nicht mehr Teil der Umsetzung waren.



I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Verbundvorhaben wurde in enger Zusammenarbeit der Verbundpartner durchgeführt. Es haben über die gesamte Projektlaufzeit regelmäßige, monatliche Onlinemeetings zwischen den Verbundpartnern und dem Unterauftragnehmern stattgefunden.

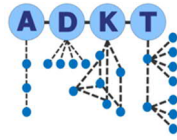
Innerhalb dieser Termine wurden die jeweils aktuellen Projektergebnisse skizziert und gemeinschaftlich reflektiert und bewertet. Darüber hinaus wurden in diesem Rahmen die jeweils folgenden Schritte der Bearbeitung skizziert und die daraus ggf. resultierenden, gegenseitigen Anforderungen benannt und im Detail abgestimmt.

Neben diesen regelmäßigen Abstimmungsterminen wurden eine Reihe an Einzelterminen zu fachlich-spezifischen Inhalten unter Einbindung eines jeweils relevanten Teilnehmerkreises durchgeführt. Zusätzlich wurde die Zusammenarbeit durch zwei Projekt-Jahrestreffen (in den Jahren 2022 und 2023) sowie 7 Workshops in Präsenz (im ZAL Hamburg und bei DDE, sowie der TUD) abgehalten.

Mit dem Ziel, den Fortschritt des Gesamtvorhabens aktiv und aktualisiert bewerten und im Sinne eines möglichst reibungslosen, inhaltlichen Projektablaufes positiv beeinflussen zu können, wurden weiterhin Abstimmungen (unter Beteiligung aller Projektpartner) terminiert, innerhalb derer der Bearbeitungsfortschritt der laufenden APs bewertet und die Voraussetzungen, Schnittstellen und gegenseitigen Anforderungen bzgl. folgender APs abgestimmt wurden.

Schwerpunktmäßig hat die TUD in dem Projekt an den laborgestützten Messaufbauten gearbeitet, sowie bei der Technologiebewertung und dem Thema der Lokalisation / Ortung innerhalb des Flugzeuges. An folgenden Arbeitspaketen unter der Leitung der LHT war die TUD ebenfalls mit eingebunden:

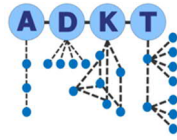
- AP 1.2: Bei der Bearbeitung des APs unterstütze die TUD mit dem Fachwissen über die unterschiedlichen Parameteranforderungen an ein Drahtlossystem (z. B. Zuverlässigkeit, Latenz, Datenraten und Sendezyklus) für die Auswahl von realisierbaren Beispielanwendungen
- AP 2.1: Hier unterstützte die TUD die Recherche und die Auswertung der Recherche zu verfügbaren und in Entwicklung befindlichen Geräten mit Drahtlostechnologien
- AP 2.2: Für den Entwurf der Gesamtarchitektur unterstütze die TUD den Definitionsprozess mit Fachwissen über die ausgewählten Funktechnologien speziell für die identifizierten Technologie-Cluster „Steuerung“ und „Informationsgewinnung“ zur Einbettung der Multi Technology Unit in das Gesamtsystem.
- AP 3.1: Der Systemaufbau im Mockup wurde von der TUD speziell im Hinblick auf die EMV Eigenschaften des Mockups durch Simulation und Auswahl von Abschirmungsmaßnahmen begleitet.



- AP 3.3: Hier wurden durch die TUD die Tests des Gesamtsystems begleitet und durch messtechnische Systeme und Auswertungen mittels eines Netzwerkanalysators ergänzt. Ferner wurde von der TUD mittels eines Störsenders (Software Defined Radio) die Störfestigkeit der Verbindungen getestet.

Des Weiteren wurde durch die Firma Dresden Elektronik (DDE) in der Rolle des Unterauftragnehmers der LHT maßgeblich die Hardware der Multi Technology Unit (MTU) entwickelt, welche eine zentrale Rolle in dem gesamten Projekt einnahm. Neben der Hardwareentwicklung wurde die Firma DDE in folgenden Arbeitspaketen mit eingebunden:

- AP 1.1: Hier unterstützte DDE mit ihrem Fachwissen den Prozess der Technologieauswahl
- AP 1.2: Anschließend unterstützte DDE die Definition der Beispielanwendungen unter Berücksichtigung der technischen Machbarkeit
- AP 1.3: In diesem Arbeitspaket wurde mit Hilfe von DDE auf der Grundlage der gesammelten Erkenntnisse aus AP 1.1 und AP 1.2 ein erster Prototyp einer MTU definiert, der die generischen Beispielanwendungen adressieren sollte.
- AP 2.2: Hier spezifizierte DDE den Ansatz für das Knotenmanagement und die Anwendungsprotokolle als Teil der Gesamtarchitektur. Parallel wurde eine erste Version der MTU Prototypen aufgebaut, um eine Entwicklungsplattform für die Anwendungsentwicklung bereitzustellen.
- AP 3.1: Bei dem Systemaufbau lieferte DDE die Informationen für die hardwareseitige Realisierung der Demonstrator-Anwendungen mit der MTU
- AP 3.2: Hier unterstützte DDE aktiv die Anwendungsentwicklung für die Umsetzung der Beispielanwendungen und half bei dem Troubleshooting selbiger.
- AP 3.3: Final wurde von DDE das Testen der Anwendungen im Gesamtsystem begleitet, sowie die Auswertung der Ergebnisse mit vorgenommen.



II. Eingehende Darstellung

II.1 Zielsetzung und erzielte Ergebnisse

II.1.1 Gesamtziel des Projektes

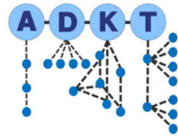
Das übergreifende Ziel von ADKT war es, alternativ zum WLAN, drahtlose Funktechnologien für den Einsatz in Flugzeugkabinen zu erforschen und diese hinsichtlich verschiedener Anforderungen wie Reichweite, Bitrate, Lokalisierungsgenauigkeit, Sicherheit, Zulassbarkeit und Energieeffizienz sowie hinsichtlich der Interoperabilität bzw. des Koexistenzpotenzials zu untersuchen und zu bewerten. Analysiert wurden neue kabellose Infrastrukturen und Funktechnologien, die durch verbesserte Eigenschaften verglichen mit den heutigen etablierten Technologien dazu beitragen, neue digitale Services (z. B. Just-in-Time Logistik oder bedarfsgenaue Reparaturen in der Kabine) und Anwendungen im Bereich Cabin Management System (CMS) oder Inflight Entertainment (IFE) zu ermöglichen.

Aufbauend auf den Forschungsergebnissen wurde angestrebt, eine generische Systemarchitektur oder Teile für einzelne Anwendungsfelder zu entwerfen, welche für die Flugzeugmodifikation in älteren Flugzeugmustern im Rahmen von Retrofits eingesetzt werden können. Die nachrüstbare Systemarchitektur oder Teile sollten herstellerunabhängig und auf unterschiedliche Flugzeugmuster anpassbar sein, so dass deren Integration in heutige und zukünftige Flugzeugmuster mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand möglich wird. Die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes können genutzt werden, um ein System zu entwickeln, welches die drahtlose Sammlung der Daten von Sensoren und andere luftfahrtspezifischen Applikationen erlaubt.

Konkret lagen die wissenschaftlichen Ziele innerhalb des Projektes ADKT in dem Aufbau einer Simulationsplattform zur Evaluierung und Bewertung von drahtlosen Kommunikationssystemen. Dazu gehörten im Detail: Eine Softwaretechnische Simulationsumgebung für eine Funkplanung, die Funksignalgenerierung und -analyse, die physikalische Generierung und Konfiguration von Störeinflüssen mittels Kanalemulator, die Interferenzbeurteilung verschiedener, für den Einsatz in der Flugzeugkabine geeigneter Funktechnologien; Interoperabilitätstests sowie im Ergebnis die Bewertung und Optimierung der Robustheit der Übertragungssysteme mit dem Gesamtziel, ein optimiertes Konzept für Kommunikation- und Lokalisierungsanwendungen in der Flugzeugkabine aufzustellen und umzusetzen.

II.1.2 HAP 0 Projektmanagement

Während der gesamten Projektlaufzeit wurden regelmäßig Treffen aller Partner organisiert, um im engen Austausch zu bleiben. Details zu diesen Treffen sind in Kapitel I.5 zu finden. Der größte Teil der Treffen wurde in Form von Onlinemeetings abgehalten. Eine besondere Herausforderung stellte die Corona-Pandemie an das Projektmanagement, da Probleme in den Lieferketten und personelle Engpässe innerhalb der LHT kompensiert werden mussten. Nach einer



Umstrukturierung des Teams im ersten Jahr konnten die Arbeiten aber unterbrechungsfrei fortgeführt werden. Nach anfänglichen kleineren Verzögerungen in einigen Arbeitspaketen (siehe Zwischenbericht 2021) kam es dann im Laufe des Projektes zu einer größeren Verzögerung, weil die Lieferung des Rumpfsegments, welches zu einem Mockup im ZAL (Hamburg) umgebaut werden sollte, sich verzögerte. Es wurde daher seitens LHT und der TUD entschieden, eine kostenneutrale Verlängerung zu beantragen, welche in Folge dann auch genehmigt wurde. Dieses Hauptarbeitspaket diente hauptsächlich der internen und externen Steuerung des Gesamtprojektes und erzeugte in sich keinen eigenen Inhalt.

II.1.3 HAP 1 Technologien und Anwendungen

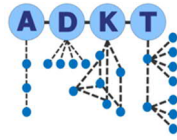
II.1.3.1 AP 1.1 – Technologie Identifikation und Evaluation

Im Arbeitspaket 1.1 wurde die Erstellung eines geeigneten, auf flugzeugspezifische Randbedingungen eingehenden Kriterienkataloges für die Zwecke der Recherche und Identifikation geeigneter Funktechnologien durchgeführt, welche für einen Einsatz als Kommunikations- und Lokalisierungssystem in einer Flugzeugkabine eingesetzt werden können. Der Kriterienkatalog diente dabei als Grundlage für die Identifikation und Beurteilung möglicher Koexistenzen verschiedener Technologien und zur Identifikation deren Wechselwirkungen untereinander.

Die TUD erarbeitete dabei im Rahmen einer systematischen Technologie-Recherche eine Dokumentation zu potentiell geeigneten Funktechnologien. Die Performance-Eigenschaften der beschriebenen Technologien wurden u. a. in einer Listendarstellung herausgearbeitet, wobei das Ziel in dieser Projektphase eine sehr breite Betrachtung aller potentiell in Frage kommenden Technologien war. Zudem erfolgten die Einordnung und Bewertung der einzelnen Technologien hinsichtlich Technologie-Koexistenz und Interoperabilität.

LHT leistete parallel zu der theoretischen Erarbeitung der Technologie-Charakteristika der TUD eine systematische Analyse und Dokumentation bzgl. flugzeugspezifischer Randbedingungen, die für eine potentielle Integration innerhalb der Flugzeug-Systemarchitektur, sowie vor dem Hintergrund bestehender Regularien von entscheidender Bedeutung sind.

Vor dem Hintergrund der einleitend geschilderten Überlegungen und Erkenntnisse, wurde im Rahmen der Analysen im AP 1.1 daher schon frühzeitig eine Fokussierung auf lizenzfreie Technologieansätze und Frequenzbereiche vereinbart. Unter den lizenzfreien Frequenzbereichen (ISM-Bändern) stellten sich insbesondere die 2,4 GHz, 5 GHz und 6 GHz Bereiche als vielversprechend und bedeutungsvoll heraus. Festzuhalten bleibt allerdings, dass auch in diesen Bändern keine internationale Harmonisierung im Sinne einer überregional definierten - und gleich ausgestalteten - Nutzbarkeit vorliegt. Vielmehr ist man auch hier mit teils sehr unterschiedlich ausgestalteten, nationalen Regularien konfrontiert. Zusätzlich trifft man in diesen Frequenzbereichen auf teils erhebliches Kollisionspotential mit konkurrierenden Technologien und



Services (wie z. B. individuelle Bluetooth-Applikationen, die bereits heute von Passagieren an Bord von Verkehrsflugzeugen genutzt werden können).

Um diese unterschiedlichen, entscheidungsrelevanten Aspekte systematisch zu erarbeiten, wurde die Betrachtung in folgende, thematische Kriterien/ Themengebiete unterteilt:

1. Qualifikation und Zulassung:
relevante Regularien und Vorgaben auf Basis der RTCA DO-160 (Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment) - insbesondere Section 21 (RF emission and susceptibility)
2. Nutzbarkeit des Frequenzraumes:
international zulässige Kanäle/ verfügbare Frequenzbereiche sowie potentielle Kollisionen mit dem Frequenzraum, der für flugrelevante Systeme genutzt wird
3. Vorgaben zur Begrenzung der Sendeleistung von Funksystemen an Bord von Verkehrsflugzeugen
4. Individuelle Regularien zu einzelnen Technologien an Bord von Verkehrsflugzeugen.

Als Ergebnis dieser Analysen wurde ein Kriterienkatalog in Form eines Dokumentes erstellt, welcher u. a. im Rahmen der in AP 1.3 erfolgten Technologieauswahl zur Entscheidungsfindung herangezogen und genutzt wurde.

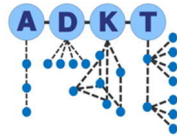
II.1.3.2 AP 1.2 – Definition von generischen Beispielanwendungen

Im Arbeitspaket 1.2 wurde an der Definition von generischen Beispielanwendungen gearbeitet, wie zum Beispiel die drahtlose Umsetzung der Lichtsteuerung, die Feuchtigkeits- und Temperaturüberwachung im Galley oder Toiletten Bereich, sowie die Lokalisierung von Objekten in der Kabine, für drahtlose Datenkommunikation in einer Flugzeugkabine und Bildung von Anwendungsklustern anhand der dafür festgelegten Zielparameter für den unterschiedlichen Zweck bzw. Aufgabenbereich (je nach Anwendungsszenario bzw. Use Case).

Es wurden verschiedenste, potentielle Anwendungen für ein Drahtlossystem im Kabinenumfeld analysiert und zusammengestellt. Als Quelle hierfür dienten

- bereits formulierte Beispielanwendungen, z. B. aus dem Bereich der Passagier-Kommunikation (IFE)
- eine Anforderungs-Abstimmung mit unterschiedlichen Fachbereichen der LHT (IFE, CMS inkl. Kabinen-Lichtsteuerung) als auch
- die Erkenntnisse aus Vorgänger- und anderen, laufenden Projekten.

Im Falle von kabelgebundenen Anwendungen, für die eine zukünftige Umsetzung auf ein Drahtlossystem sich als potentiell vorteilhaft bewertet wurde, wurden ausgehend von deren



Systemeigenschaften entsprechende Anforderungen und Systemparameter abgeleitet und beschrieben.

Um aus der Vielzahl (insgesamt ca. 80) skizzierter Beispielanwendungen eine, bezogen auf eine spätere Umsetzung möglichst relevante Auswahl treffen zu können, wurden alle Use-Cases auch bzgl. ihrer Potentiale im Hinblick auf eine spätere Verwertungsperspektive analysiert und kategorisiert.

Dieser Systematik übergeordnet erfolgte im nächsten Schritt eine Zuordnung der Anwendungsgruppen zu drei Kategorien, welche im gesamten Projektverlauf beibehalten wurde:

- drahtlose Informationsgewinnung (inkl. Überwachung und Lokalisierung),
- Steuerung (von Komponenten in der Flugzeug-Kabine),
- Customer facing communication (Zugang des Passagiers/ der Crew zum Drahtlosnetzwerk der Kabine, z. B. Zugriff auf Komfortfunktionen oder das InFlight Entertainment System).

II.1.3.3 AP 1.3 – Konzeptdefinition

In dem Arbeitspaket 1.3 wurden die im AP 1.2 definierten Anwendungskluster mit den zuvor im AP 1.1 definierten und untersuchten Funktechnologien abgeglichen, jeweils Vor- und Nachteile identifiziert und Einsatzbereichen zugeordnet. Auf dieser Grundlage wurde entschieden, welche Technologie sich unter welchen Bedingungen für welchen Einsatzzweck und –Ort eignet. Die Bewertung erfolgte dabei in enger Zusammenarbeit mit TUD hinsichtlich der Performanceparameter (u. a. Reichweite, Bit/Paketfehlerrate, Interferenzrobustheit, Datenraten, Latenzen, Energieverbrauch), der physikalischen Architektur (Netzwerktopologie, Knotenanzahl und –dichte) sowie u. U. Weiterleitungsverfahren (Hopping) und deren gegenseitige Abhängigkeiten für jede Technologie und jedes Anwendungskluster. Weiterhin wurde beurteilt, welche möglichen Technologiewechselwirkungen bei der parallelen Koexistenz verschiedener Technologien und Anwendungskluster existieren und welche Kompromisse möglicherweise eingegangen werden müssen. Schließlich erstellte LHT zusammen mit der TUD ein Technologiebeurteilungs- und Bewertungskonzept je Anwendungskluster, welches sowohl Technologien für Kommunikations- als auch Lokalisierungsaufgaben enthält.

Die TUD erarbeitete hierbei eine Systematik, bei der unter Skalierung und Klassifizierung der Keyperformance-Indikatoren (KPI) der individuellen Technologien sowie der Anforderungsparameter der Anwendungen, und durch deren direkte Gegenüberstellung eine systematische Bewertung und Technologie-Auswahl ermöglicht wurde.

Zur visuellen Veranschaulichung wurde die Darstellungsform eines Spidermap-Diagramms genutzt. Hierbei spannt sich jeweils eine relevante Fläche zwischen den identifizierten Datumspunkten der KPIs auf. Durch das Übereinanderlegen der relevanten Flächen von Anwendungs-Anforderung und Technologie-Potential lässt sich anhand der sich ergebenden

Schnittmenge eine objektive Aussage bzgl. der Eignung einer Technologie gegenüber den spezifischen Anforderungen treffen.

Abbildung 4 zeigt exemplarisch ein solches Spidermap-Diagramm, bei dem den Anforderungen aus dem Cluster „drahtlose Informationsgewinnung“ die Technologie-Eigenschaften von Wi-Fi, UWB, ZigBee und Bluetooth gegenübergestellt wurden.

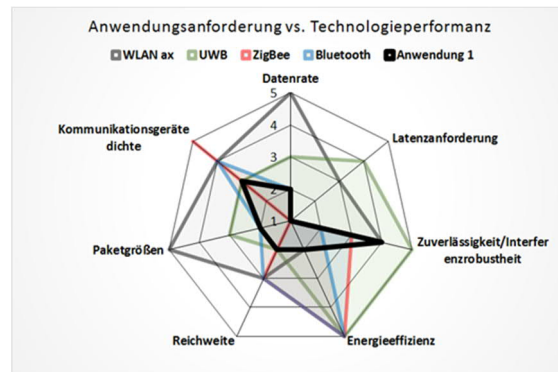


Abbildung 4: Technologie-Auswahl mittels Spidermap-Diagramm

Im Ergebnis des APs 1.3 konnte folgende Technologie-Auswahl bezogen auf die Nutzbarkeit der jeweiligen Anwendungs-Cluster vereinbart werden (s. auch Abbildung 5)

- Anwendungs-Cluster: „Customer facing Communication“:
 - Wi-Fi 6E (IEEE 802.11ax - WLAN - inkl. 6 GHz-Bereich)
- Anwendungs-Cluster: (System-) „Steuerung“ und „drahtlose Informationsgewinnung“
 - Ultra WideBand - UWB (IEEE 802.15.4a/z - WPAN)
 - Bluetooth 5.0 / 5.1 (LE) (IEEE 802.15.1 - WPAN)
 - ZigBee (IEEE 802.15.4 - WPAN)

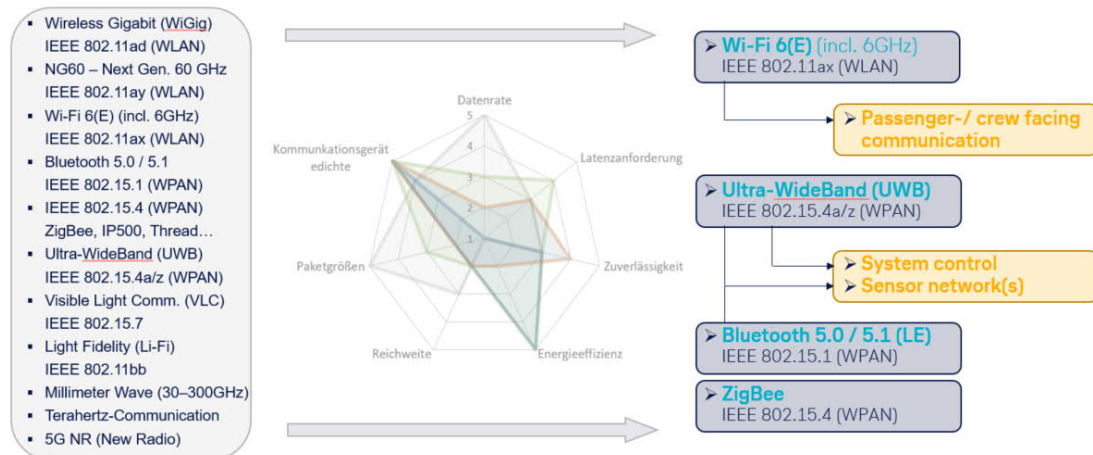
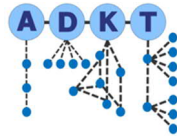


Abbildung 5: Technologie-Auswahl

Die LHT erarbeitete im Zuge dieses APs zu jeder (unter AP 1.2 spezifizierten) generischen Cluster-Anforderung eine exemplarische, generische Systemkonfiguration. Für die Planung des Mockups wurden hierfür folgende Anwendungen ausgewählt:

1. Discrete Input (Diskretes elektrisches Signal an das System)
2. Discrete Output (Diskretes elektrisches Signal an ein angeschlossenes, externes Gerät)
3. Analytics und Hazardous Module (Kabinensensoren)
4. Control Switch Button (CSP, Knopf für Steuerungsfunktionen in der Kabine, Bus basiert)
5. Lichtsteuerung (konkret: RGB Licht, angeschlossen über ein Bus-System)
6. Kabinenüberwachungs-Sensoren: Temperatur, Feuchtigkeit, Gas, Luftdruck
7. Strom- und Spannungs-Sensor
8. Signal-Lichter (z. B. Call, Occupied sign etc.)
9. Steuerungs-Knöpfe für CMS Anwendungen
10. Unterhaltungs-System an den Sitzen (IFE In-Seat Displays)
11. Personal Electronic Devices (PED, zum Beispiel Smartphone, Laptop)

II.1.3.4 AP 1.4 – Theoretische Systemerstellung (Simulation)

Im Arbeitspaket 1.4 stand die Erstellung von digitalen Simulationsmodellen für mehrere Technologien und Anwendungskluster im Mittelpunkt. Dabei wurde von der LHT in enger Zusammenarbeit mit der TUD ein digitales Modell der Flugzeugkabine erstellt (anhand eines eigens für das Projekt ADKT angefertigten 3D-Modells eines Airbus A330/340). Die TUD ergänzte für die verbauten Komponenten in diesem Modell alle funktechnisch relevanten

Materialeigenschaften und führte anschließend eine softwaretechnische Funksimulation aus, um eine Beurteilung der Qualität der Funkversorgung im Flugzeug theoretisch vornehmen zu können. Die Verifikation des Gesamtsystems im Hinblick auf kritische Pfade und Bewertung der Einsetzbarkeit der Technologien für definierte Anwendungskluster aus Sicht eines luftfahrttechnischen Betriebes erfolgt durch LHT ebenfalls in enger Abstimmung mit der TUD.

Die konkret erarbeiteten Resultate der Funkplanungs-Simulation umfassten unterschiedliche Betrachtungs-Aspekte. So wurde z. B. das Ausbreitungsverhalten für die unterschiedlichen Technologien - innerhalb unterschiedlicher Frequenzbereiche - unter Verwendung unterschiedlicher Antennenpositionen und unter Einbeziehung von virtuellen Passagieren (etc.) erarbeitet und die Ergebnisse gemeinschaftlich diskutiert und bewertet.

Abbildung 6 zeigt exemplarisch das räumliche Ausbreitungsverhalten einer Antenne im 2,4 GHz Band (ISM Band) innerhalb der simulierten Airbus A330/340 Kabinenumgebung. Zu sehen ist die Leistungsverteilung im Kabinenbereich, wobei hier u. a. auch das sog. Ray-Tracing-Verfahren zur Anwendung gebracht wurde, mit Hilfe dessen auch Reflektions-Effekte und Brechungen berücksichtigt und dargestellt werden können.

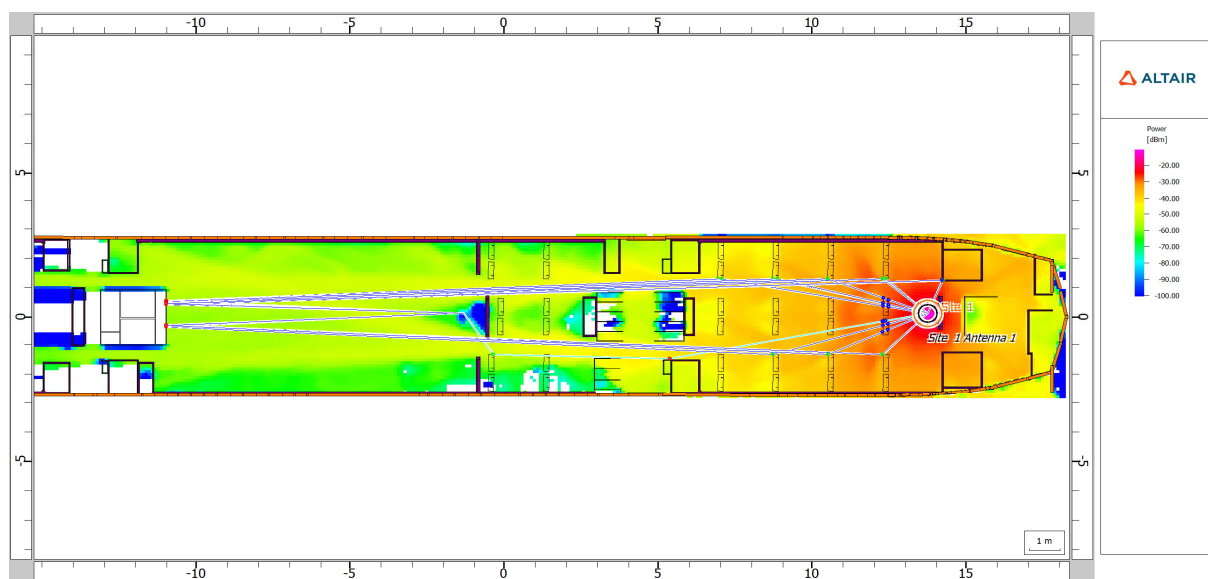
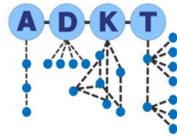


Abbildung 6: Funkplanungssimulation, A330/340, 2,4 GHz

II.1.4 HAP 2 System Definition

II.1.4.1 AP 2.1 – Industrie Recherche (HW /SW)

Im Arbeitspaket 2.1 wurde einer Liste aller in Frage kommenden Industrieprodukte und Systeme (Hard-, Firm- sowie Software) zur Umsetzung der im Hauptarbeitspaket 1 definierten Konzepte erstellt. Dafür führte die LHT zusammen mit dem Projektpartner DDE eine Recherche durch und nahm eine Auswertung und Einordnung der verfügbaren und in Entwicklung befindlichen Geräte



mit Drahtlostechnologien für den Einsatz in der Luftfahrt vor. Der Fokus lag dabei auf Geräten für Kommunikation und Lokalisierung und deren Softwareausstattung und Schnittstellen.

Auf Basis der in AP 1.3 spezifizierten Technologie-Auswahl (Wi-Fi 6E, UWB, BLE & ZigBee) wurde eine systematische Industrie-Recherche bzgl. (im Projektzeitraum) verfügbarer Hard- und Software durchgeführt. Relevante Ergebnisse dieser Recherche wurden in regelmäßigen Projekt-Meetings mit dem Partner (TUD) und dem LHT-Unterauftragnehmer (DDE) reflektiert und konsolidiert, um sicherzustellen, dass identifizierte Komponenten sich sowohl für die Umsetzung im Rahmen des Funktionsdemonstrators, als auch im Rahmen des laborbasierten Testsystems (TUD) als geeignet erweisen.

Mit dem Ziel einer ganzheitlichen Betrachtung wurden in diesem Zuge mehrere Aspekte parallel betrachtet/ erarbeitet:

1. Systematische Recherche (HW & SW) und Aufbereitung der Ergebnisse im Hinblick auf eine Nutzung im Projekt-Kontext sowie einer Implementierung in die Flugzeugkabine
2. Analyse der identifizierten (technologischen) System-/ Komponenten- Spezifikationen unter Vertiefung der Bewertung bzgl. der jeweiligen Technologie-Charakteristika.

Die konkrete Verfügbarkeit einzelner Komponenten innerhalb der Projektlaufzeit wurde hierbei auch vor dem Hintergrund der aktuell immer noch sehr angespannten- und z. T. herausfordernden Situation durch die Corona-Krise auf dem globalen Chip-/ Halbleiter-Markt betrachtet.

Unter Berücksichtigung der unter AP 1.1 gewonnen Erkenntnisse (z. B. Anwendbarkeit von regional gültigen Regularien/ Restriktionen im Sendebetrieb oder spezifische Technologie-Restriktionen für den Betrieb an Bord von Verkehrsflugzeugen) wurden schließlich die Module und Entwicklungsplattformen für das Mockup-System (MTU und Wi-Fi 6E Hardware) und das Labor-System ausgewählt.

II.1.4.2 AP 2.2 – Entwurf Gesamtarchitektur

Im Arbeitspaket 2.2 lag dann der Fokus auf der Erstellung einer Systemspezifikation und der grundlegenden Auflistung aller Anforderungen und Komponenten für die drahtlosen Systeme der Anwendungscluster „Steuerung“ und „Informationsgewinnung“, welche mit Unterstützung des Unterauftragnehmers DDE erfolgte – mit dem Zweck der Entwicklung einer Multi-Technology-Unit (MTU). Die Spezifikation enthält folgende Teile: Ein Blockdiagramm und eine Systembeschreibung, die Beschreibung der einzelnen Module innerhalb der MTU, die Beschreibung der Funktionen und Schnittstellen sowie der Anforderungen an die Hard- und Software.

Des Weiteren wurde seitens der LHT eine Spezifikation für das Anwendungscluster „Passenger facing Communication“ erarbeitet, welches auf der Technologie Wi-Fi 6E aufbaute und in der Auswahl geeigneter Hard- und Software bestand. Die Auswahl geeignet erscheinender Access

Points wurde dabei ergänzt durch die Auswahl und Spezifikation eines Wi-Fi 6E fähigen Clients, der zu messtechnischen Zwecken von der LHT in Hardware und Software selbst aufgebaut wurde.

Die MTU mit ihrer anwendungsspezifischen Hardware-Peripherie und das Wi-Fi 6E AP und Client Setup bildeten dann zusammen die Gesamtarchitektur (siehe Abbildung 7).

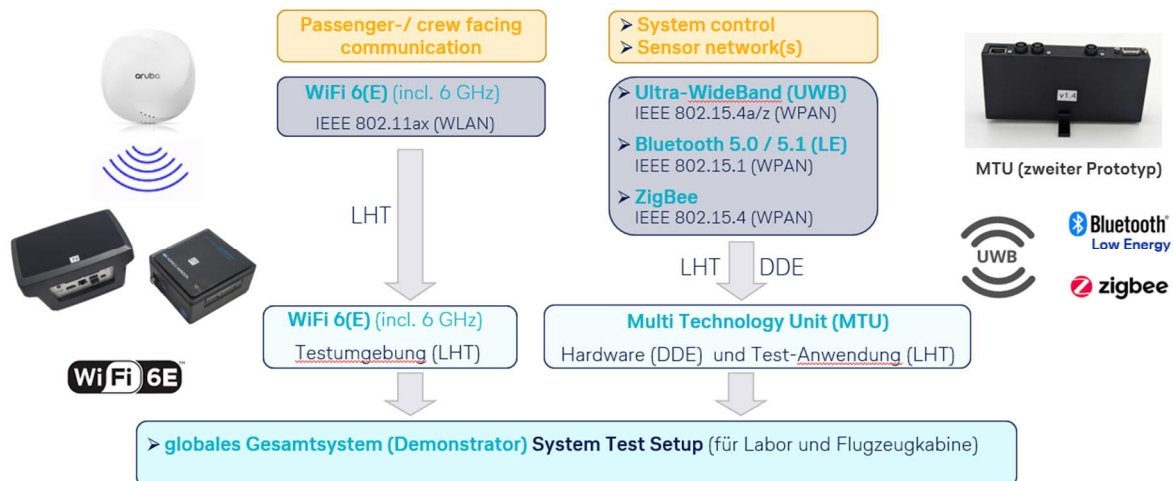


Abbildung 7: Gesamt-Architektur

Die in Abbildung 8 zu sehende Architektur des Mockups für die MTU basierten Anwendungsfälle (vgl. AP 1.3 – Konzeptdefinition) zeigt die Verteilung besagter Anwendungen in der Kabine (schematisch).

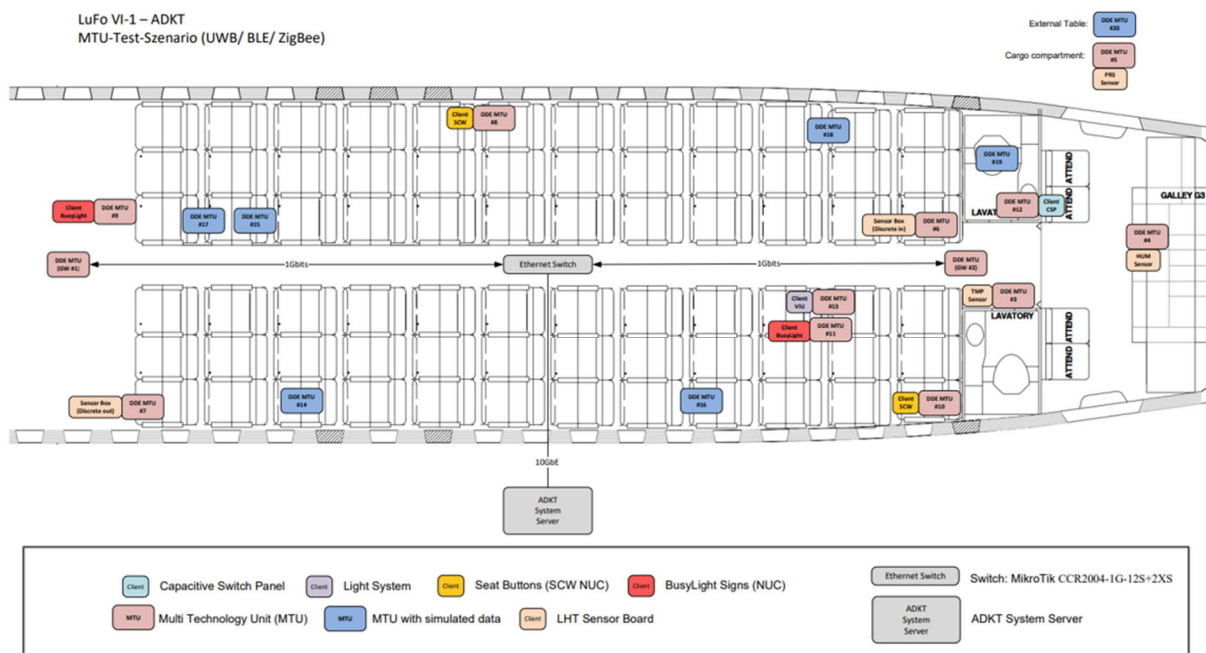


Abbildung 8: Multi Technology Unit Mockup

In der Abbildung 9 ist das Gesamtsystem der Wi-Fi 6E Testumgebung im Mockup gezeigt. Dieses wurde ergänzt durch ein (hier nicht gezeigtes) Ethernet Netzwerk, welches als Rückkanal jeweils jeden zweiten Client an den Server (Messsystem) zur Auswertung der Messdaten verband.

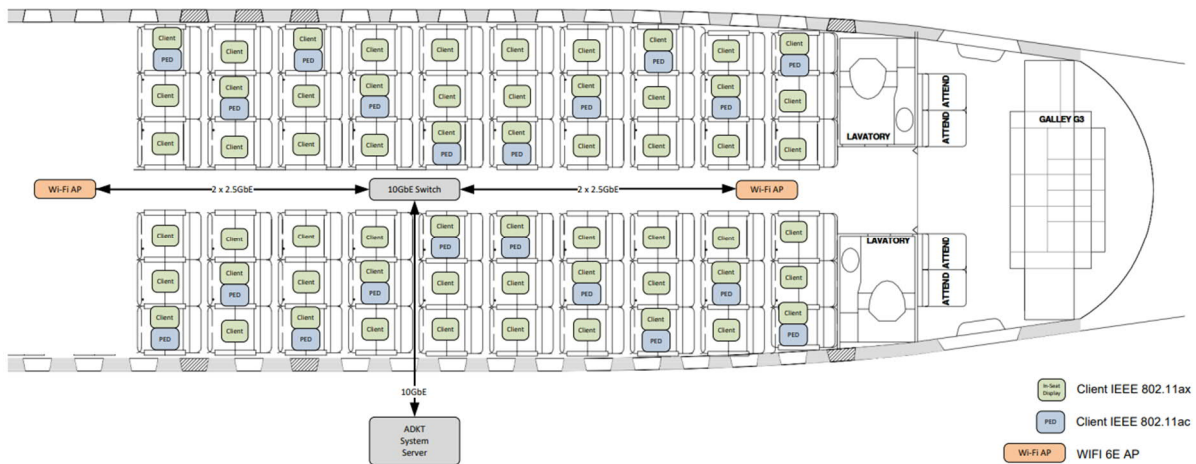


Abbildung 9: Wi-Fi Mockup

II.1.4.3 AP 2.3 – System Entwicklung

Im folgenden Arbeitspaket 2.3 wurden dann von der LHT mit dem Unterauftragnehmer DDE Schaltpläne und Layouts/Anschlüsse realisiert, die den Anforderungen aus den Clustern zur Realisierung der Anwendungen Rechnung trugen. Die folgenden drei Clusterkategorien wurden dabei bedacht:

- drahtlose Informationsgewinnung (Status, Zustände)
- nicht sicherheitskritische Steuerung
- Customer facing communication (Unterhaltungssysteme)

Auf Grundlage der ausgewählten Drahtlostechnologien sowie der Komponenten (Kommunikationsmodule, Access Points, Server) zur Realisierung der Anwendungen aus diesen Kategorien wurden ferner von der TUD auch Methoden des Integritätsmonitorings zur Optimierung der Funkverbindungen betrachtet. Dies schloss eine Weiterentwicklung der Methoden des Integritätsmonitorings mit dem Ziel ein, durch permanente funktechnische Systemzustandsüberwachung auf Basis von Signalparametern (Signalempfangsstärken, Datenraten, Latenzen, Interferenzen) und der anschließenden intelligenten Fehlerbehandlung (Warnung, Kanalloptimierung, Technologieumschaltung, Systemabschaltung) eine Verbesserung der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Funkverbindung bzw. der gesamten Anwendung zu erreichen.

II.1.5 HAP 3 System Design

II.1.5.1 AP 3.1 – Systemaufbau

In dem Arbeitspaket 3.1 wurden die unter AP 2.1 identifizierten Hardware-Komponenten für einen Einsatz innerhalb des physischen Systemaufbaus von der LHT in das Mockup-Setup integriert. Der Schwerpunkt lag hier in der Erstellung einer Wi-Fi Testumgebung und der Aufbau des Netzwerkes, welches später in den Tests alle Komponenten miteinander verband. Dabei kam es durch neu gewonnene Erkenntnisse an einzelnen Teilen des Testsystems immer wieder zu Änderungen in dem Gesamtaufbau. Das dadurch entwickelte Gesamtsystem war schließlich optimal für die Implementation der notwendigen Software-Infrastruktur vorbereitet.

Der ADKT-Funktions-Demonstrator wurde von der LHT in den Räumlichkeiten des „Zentrum für Angewandte Luftfahrtforschung“ (ZAL, Hamburg) realisiert (siehe Abbildung 10). Hierbei wurden Teile des LuFo-Vorhabens „ReSA“ wiederverwendet, im speziellen die Serverarchitektur, welche auf eine kleinere und performantere Hardware portiert wurde. Ferner wurde diese Architektur entsprechend der spezifischen ADKT-Anforderungen erweitert, so dass eine operative Instanz zur Steuerung sowie eine weitere Instanz für die Messungen am Gesamtsystem zur Verfügung standen. Beide Instanzen wurden mit entsprechender Software für Systemtests ausgestattet.



Abbildung 10: A320 Mockup mit Wi-Fi Clients

Des Weiteren wurden umfangreiche Softwarepakete für das Testsystem entwickelt:

- Software inklusive Betriebssystem für die Wi-Fi 6E Clients (modifizierte Gigabyte Brix Mini-PCs)
- Software für die Anwendungssimulation und Last-Tests der Wi-Fi Umgebung
- Software zur Anbindung der MTUs an das Testsystem zur Umsetzung echter Anwendungen, für Simulationsanwendungen und für Lasttests (siehe Abbildung 11)
- Software zur Kommunikationssteuerung mit Drittsystemen (z. B. dem Scroll Wheel oder dem Status-Indication-Light etc.)

- Zentrale Software zur Steuerung aller Testsysteme (Web basiert), inklusive der graphischen (Echtzeit-) Auswertung (siehe Abbildung 12).



Abbildung 11: MTU Lasttest-Messwerte (Packet Error Rate, Round Trip Time)

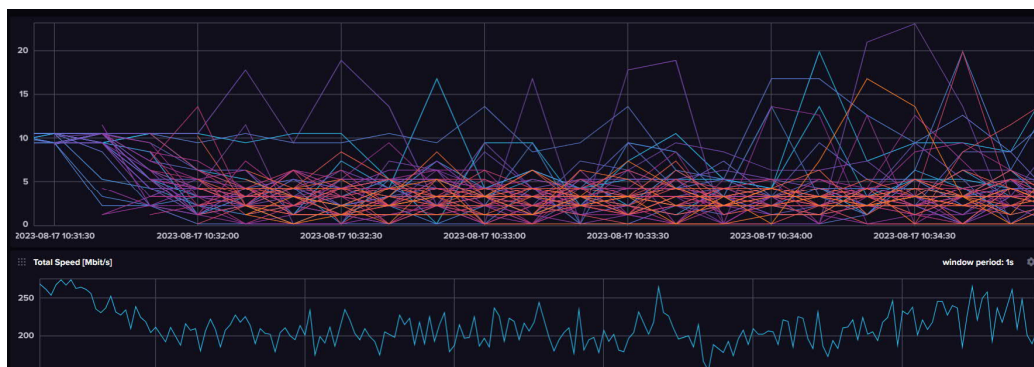


Abbildung 12: Wi-Fi 6E Messwertanzeige (Geschwindigkeit pro Client, Gesamt)

II.1.5.2 AP 3.2 – Umsetzen von Beispielanwendungen

Im Arbeitspaket 3.2 wurden dann von der LHT geeignete Schnittstellen umgesetzt, die die Inbetriebnahme und Kommunikation der Anwendungen mit dem Server, als auch mit anderen Messtechnischen Systemen, ermöglichten. Für die Untersuchung der Parameter, die ein Integritätsmonitoring-System zur Überwachung der Kommunikation benötigt (wie z. B. übertragbare Datenrate, Störrobustheit, Latenzzeiten, Energieverbrauch und Lokalisierungsfunktionalität) wurde seitens der TUD ein Monitorprogramm erarbeitet, welches mit Hilfe der MQTT basierten Messarchitektur im Gesamtsystem bestimmte messtechnische Parameter visualisierte (siehe Abbildung 13).

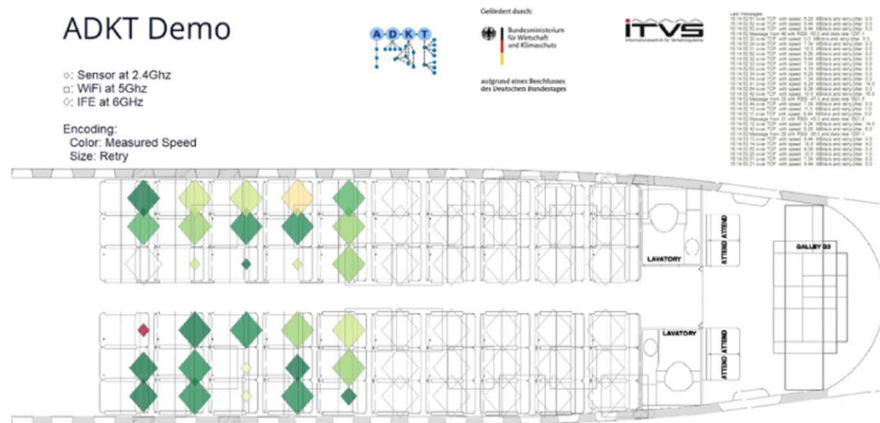


Abbildung 13: Visualisierung der TCP-Verbindungseigenschaften (Beispiel)

Seitens der LHT wurden zudem die Mockup-Anwendungen der MTU und des Wi-Fi 6E Setups software- und konfigurationsseitig finalisiert, so wie sie in AP 2.2 – Entwurf Gesamtarchitektur beschrieben wurden.

Zudem wurden diverse Beispiele realisiert, die eine Verwendungen der Funktechnologien im Kontext einer realen Anwendung abbilden sollten. Besondere Bedeutung hatten hierbei die Implementierungen von Sensorik mittels einer eigens dafür entwickelten Sensor-Box (siehe Abbildung 14).



Abbildung 14: Beispiel eines Drucksensor (rechts) mit MTU (links)

Ferner wurde die Umsetzung folgender Steuerungsanwendungen realisiert (siehe Abbildung 15 bis Abbildung 17):



Abbildung 15: Tastenfeld am Sitz (links) zum Steuern von Benachrichtigungslampen (rechts)



Abbildung 16: Diskretes Eingabemodul (links) und Ausgabemodul (rechts)

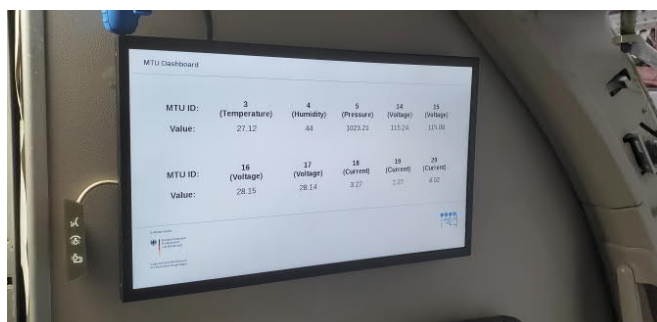
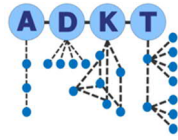


Abbildung 17: Lichtsteuerung (LED-Steifen, links) über kapazitive Knöpfe (rechts, inkl. Status Monitor)

Hinzu kamen für einen Teil des MTU Netzwerkes die simulierten Anwendungen (siehe Abbildung 18), welche per Ethernet über den Hauptserver gesteuert wurden und so das Netz mit insgesamt 20 Knotenpunkten komplettierten.



Abbildung 18: Simulierte Sensoren unter dem Sitz (links) und an der Rückenlehne (rechts)



II.1.5.3 AP 3.3 – Testen und verifizieren von Beispielanwendungen

Im Arbeitspaket 3.3 wurden von der LHT diverse Messkampagnen durchgeführt, welche zum Ziel hatten, die erarbeitete Architektur und deren Einzelanwendungen zu Testen. Im Zuge der Entwicklung des Wi-Fi 6E Testsystems wurde es notwendig einzelne Messungen bezüglich der Performanz der Clients durchzuführen. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden die Anordnung der Clients und auch die Zuteilung der Dienste und Bandbreiten pro Client entsprechend angepasst. Die maximale Datenrate eines Clients mit zwei Antennen (Standardausstattung aller gängigen Clients wie z. B. Laptops oder Tablets sowie erhältlicher Wi-Fi PCIe Karten) liegt bei 2,4 Gbps (brutto). In einer Einzelplatzmessung mit einem der ADKT Wi-Fi 6E Client wurde eine Datenrate von 1,9 Gbps (netto) erzielt. Dies erfordert aber die unmittelbare Nähe des Clients zu dem Access Point, sowie eine freie Übertragungsstrecke. Mit der Entfernung des Clients um nur wenige Meter nimmt die Datenrate schon stark ab. Insgesamt wurde beobachtet, dass der Durchsatz pro Client bei einer höheren Anzahl sehr stark abnimmt.

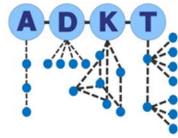
Im Zuge der UWB Messungen zur Datenübertragung konnten von der LHT zudem Erkenntnisse über den Einsatz von UWB in der Flugzeugkabine gewonnen werden: Dabei zeigte sich, dass sich das Signal innerhalb der Kabine gut ausbreitet und auch weitere Entfernungen erreicht werden können als beispielsweise in einem Freifeld-Test. Allerdings kam es immer wieder zu Paketverlusten, die rein mit funktechnischer Ausbreitung (speziell über die Entfernung) nicht zu erklären waren. Hier wurde bis zum Ende des Projektes an den Einbaupositionen und der Firmware der MTU optimiert. Dagegen war die Reaktionszeit bei UWB bei bestehender Funkverbindung sehr gut im Vergleich mit den 2,4 GHz basierten Technologien.

Durch das MTU Setup mit den realen Anwendungen konnte neben der messtechnischen Erfassung der Ergebnisse auch ein Eindruck in der Benutzung von realen Endanwendungen gewonnen werden. Speziell der Ein- und Ausgabeprozess wie beispielsweise das Schalten von Licht (Reaktionszeit) und die Zuverlässigkeit der Funkübertragung (keine Reaktion des Lichtes bei Paketverlust) zeigte hier eindrucksvoll, wo der Reifegrad der jeweiligen Technologie steht. Aus den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich weitere Arbeitsfelder ableiten, die für eine echte Endanwendung notwendig sein werden (Sicherheitsschichten, optimieren der Prozesszeiten etc.).

II.1.5.4 AP 3.4 – Identifikation von kritischen Pfaden für eine Flugzeugintegration

In diesem Arbeitspaket wurde die technischen Erkenntnisse aus dem Arbeitspaket 3.3 die Flugzeugintegration für die Flugzeugintegration beleuchtet. Die unterschiedlichen Technologieansätze erforderten dabei eine differenzierte Betrachtung je nach Art der benutzten Frequenzen und deren Einsatzbereich.

Technologisch ergab sich bei der Auswertung der Wi-Fi 6E Verbindungen, dass sich die Anzahl und die Anordnung der Clients in der Kabine erheblich auf die zu erwartende Performanz auswirkten. Speziell die Störungen, die sich durch eine oder mehrere sich bewegender Personen in der Kabine ausgelöst werden können, haben zum Teil erhebliche Einbrüche der Performanz an



einzelnen Plätzen zur Folge. Um die Möglichkeiten eines vollständig funkbasierten Entertainmentsystems zu erproben, wurden Performance-Tests durchgeführt, die den maximalen Durchsatz beim Download von Inhalten auf die Sitze (In-Seat Clients) als Untersuchungsschwerpunkt hatten. Durch das aufwendige ADKT Demonstrator-Gesamtsystem inklusive des komplexen Test-Setups konnten hierbei die technologischen Grenzen innerhalb eines realistischen Anwendungs-Szenarios in realer Flugzeugumgebung ermittelt und messbar gemacht werden. Das Operieren der Technologien bis in den Grenzbereich der technologischen Möglichkeiten lieferte hierbei wertvolle Erkenntnisse für die Umsetzung einer realen Applikations-Implementation und der technologischen und physikalischen Grenzen selbiger. So konnte beispielsweise der erforderliche Datendurchsatz, der für ein Wireless IFE System in der Theorie an jedem einzelnen Sitz zur Verfügung stehen müsste, nicht vollständig erreicht werden. Vor diesem Hintergrund liegt bei dem Design eines „Wireless IFE“ Systems ein weiter zu betrachtender Schwerpunkt in der Optimierung der Protokolle und der Anwendungsschicht speziell für die Verteilung von Unterhaltungsinhalten.

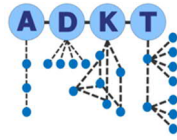
Bei den Tests für die von der MTU bereitgestellten Technologien ZigBee und BLE stellte sich heraus, dass die Technologie BLE zwar die höchste Reichweite und Verbindungssicherheit aufwies (die Technologie kann an dieser Stelle als ausgereift eingestuft werden), innerhalb der Umgebung mit anderen 2,4 GHz Technologien (z. B. Wi-Fi, ISM-Band) aber nicht eine absolut zuverlässige Verfügbarkeit abbilden konnte, wie es für ein sicherheitskritisches System im Flugzeug Voraussetzung wäre: Dennoch besteht ein vielversprechender technologischer Ansatz in der Umsetzung nicht-sicherheitsrelevanter Applikationen, bei denen es ebenfalls auf erhöhte Zuverlässigkeit ankommt um ein positives Benutzererlebnis zu erreichen.

Für die Technologie UWB, die ebenfalls über die MTU abgebildet wurde, liegt die Einschätzung für eine Verwendbarkeit (Stand heute) ähnlich gelagert wie bei BLE und ZigBee: Die Zuverlässigkeit der Verbindung ist für ein sicherheitskritisches System ebenfalls nicht ausreichend. Allerdings konnte bis zum Projektende nicht zweifelsfrei ausgeschlossen werden, dass die Verluste in den Paketen nicht durch das Mess-Setup selbst ausgelöst wurden, da die UWB Technologie in ihren Eigenschaften zur Datenübertragung hier noch als nicht als ausgereift eingestuft werden kann. Infolgedessen musste in diesem Technologiefeld ein sehr hoher Anteil der Hard- und Software in Eigenentwicklung erst realisiert werden. Mit den Erkenntnissen aus der Implementation sowie den Ergebnissen aus den Messungen wurden aber die Möglichkeiten der Technologie erkannt und besser verstanden und es werden hier seitens der LHT weitere Untersuchungen und Folgeprojekte anschließen.

II.1.6 HAP 4 Flugzeug Integration

II.1.6.1 AP 4.1 – Flugzeug-Integration validieren und bewerten

Im Arbeitspaket 4.1 wurde mit Hilfe der Musterprüfleitstelle der LHT ein ausführlicher Katalog von Qualifikationsanforderungen und Nachweisverfahren erstellt. Dabei wurde eine Bewertung des



Design Assurance Level (DAL) für ein beispielhaftes System im Anwendungsfall der kommerziellen sowie in der privaten Luftfahrt durchgeführt. Im Ergebnis ist festzuhalten, dass es im 6 GHz Band (Wi-Fi 6E und UWB) wenig bis gar keine Referenzprojekte mit Produkten und entsprechenden Zulassungen vorliegen. Der Aufwand einer Musterzulassung für ein solches System wird deshalb zum jetzigen Zeitpunkt verhältnismäßig hoch eingeschätzt. Gerade für den Bereich Wi-Fi 6E sind hier entsprechende Nachweise zu erbringen, da sich das Abstrahlverhalten in der Kabine mit den zulässigen 23dBm (EIRP) ⁸ oberhalb der als unkritisch erachteten 20dBm liegt.⁹

Ein UWB System ist hier in seiner Beschaffenheit dahingegen als weniger kritisch zu betrachten, da die erlaubte Abstrahlung hier beispielsweise im Kanal 5 (6489.6 MHz) ¹⁰ bei 0 dBm liegt.¹¹

Positiv für eine Integration im Flugzeug dürfte sich auswirken, dass es nach einer eingehenden Recherche keine flugrelevanten Systeme gibt, die im 6 GHz Band arbeiten.

Für die Technologien ZigBee, Bluetooth und Wi-Fi im 2,4 GHz (ISM-) Band gelten die schon bekannten Rahmenbedingungen, wie sie in vielfachen Installationen auf kommerziellen und privaten Flugzeugen zu finden sind. Dies gilt auch für Wi-Fi Installationen im 5 GHz Bereich, bei denen die oberen 5 GHz Kanäle aufgrund des Dynamic Frequency Search (DFS) für Wetterradar und militärische Radaraktivitäten im Flugzeug nicht nutzbar sind.¹²

II.1.6.2 AP 4.2 – Umsetzungsplan ADKT Lösungen erstellen

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts bilden die Grundlage für das langfristige strategische Ziel der Lufthansa Technik, eine generische Gesamtarchitektur zur drahtlosen Datenübertragung innerhalb der Flugzeugkabine zu entwickeln, zu produzieren und zu vertreiben. Damit soll die Wettbewerbsfähigkeit der LHT als OEM gestärkt werden und Marktteilnehmer in die Lage versetzen, drahtlose und innovative Anwendungsfälle für zukünftige Kundenbedürfnisse zu entwickeln.

Im Rahmen des Forschungsprojekts konnten die technischen Möglichkeiten und Limitierungen verschiedenster drahtloser Kommunikationstechnologien modelliert und in einer praxisnahen Versuchsumgebung getestet werden. Ein besonderer Fokus lag dabei auf der Bewertung der verfügbaren Wi-Fi-Standards (WiFi5/6/6e). Hierbei wurden reale Performanceunterschiede insbesondere in Bezug auf Datenübertragungsraten und die maximale Anzahl stabil laufender,

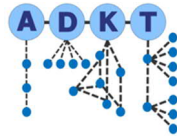
⁸ (Europäische Kommission, Durchführungsbeschluss (EU) 2021/1067 der Kommission vom 17. Juni 2021 über die harmonisierte Nutzung von Frequenzband 5 945 - 6 425 MHz [...], 2021)

⁹ (EASA, 2017)

¹⁰ (IEEE, 2020)

¹¹ (Europäische Kommission, Durchführungsbeschluss (EU) 2019/785 der Kommission vom 14. Mai 2019 über die Harmonisierung der Funkfrequenzen für Ultrabreitbandgeräte [...], 2019)

¹² (Europäische Kommission, Durchführungsbeschluss (EU) 2022/179 der Kommission vom 8. Februar 2022 über die harmonisierte Nutzung von Funkfrequenzen im 5-GHz-Band [...], 2022)



simultaner Verbindungen gemessen. Diese Ergebnisse sind essentiell für die Planung und Ausgestaltung eines Kabellosen IFE Systems.

Zusätzlich wurden mit Bluetooth Low Energy (BLE) und Ultra Wideband (UWB) zwei Standards identifiziert, die das Potenzial haben, mit ihren charakteristischen Eigenschaften neue Anwendungsfelder in der Flugzeugkabine erschließen zu können. Neben den Performancemessungen wurden in dem Projekt drahtlose Anwendungsfälle in drei Kategorie umgesetzt, die heute schon eine hohe Relevanz für die Produkte der LHT haben:

- Die drahtlose Verbindung zwischen „Inflight Entertainment/ Kabinenmanagement System“ und den Endgeräten der Passagiere und des fliegenden Personals
- Verbindung zwischen „Inflight Entertainment/ Kabinenmanagement System“ und Sensorik innerhalb der Kabine
- Das Ersetzen kabelgebundener Datenübertragung innerhalb des Inflight Entertainment Systems

Basierend auf diesen Erkenntnissen der Messreihen und erfolgreich umgesetzten Anwendungsfälle wird die Lufthansa Technik im Zuge einer technischen Vorstudie die Weiterentwicklung der bestehenden Wireless Access Point (WAP) Produktreihe prüfen sowie die Technologien BLE und UWB für eine echte Produktintegration weiterentwickeln.

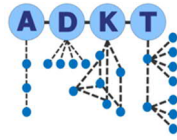
II.1.7 HAP 5 Externe Informationsgewinnung und Austausch

Dieses HAP, welches allein von LHT bearbeitet wurde, beinhaltete die Begleitung und Beobachtung von internationalen Aktivitäten zum Thema Einführung von alternativen Drahtlostechnologien in die Luftfahrt über den gesamten Projektzeitraum. Ursprünglich war eine aktive Teilnahme an Gremien und Konferenzen geplant, welche aber in den ersten beiden Jahren durch die Corona-Pandemie nicht stattfand. Zum Thema Drahtlostechnologien in Flugzeugen mit dem Ziel einer internationalen Vernetzung leistete die TUD einen wissenschaftlichen Beitrag in Form von Präsentationen und Veröffentlichungen. Für die LHT beschränkte sich der Austausch auf die virtuelle Teilnahme an dem Wireless Congress in den Jahren 2021 und 2022. Ferner nahm die LHT an einem Arbeitstreffen der EUROCAE in der Working Group 96 zum Thema WAIC teil.

Zudem kam es im Umfeld der AIX in Hamburg zu einigen Kontakten, sowie im ZAL durch den Austausch mit Kollegen anderer Firmen, beispielsweise bei dem ZAL Event „Connected Cabin in Aircraft“ am 26. Januar 2023.

II.2 Erläuterung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der Materialaufwand ist in vielen kleinteiligen Positionen im Zusammenhang mit dem Versuchsaufbau und dem Ausbau des Mockups angefallen. Dabei wurde das Testsystem in der



Flugzeugkabine mit vielen gleichzeitig aktiven Clients in realer Umgebung eingerichtet und in Betrieb genommen. Im Rahmen des F&E-Unterauftrags hat die Dresden Elektronik GmbH die beschriebenen Ergebnisse erarbeitet und eingebracht.

Der größte Anteil der Kosten entfällt auf das von der Lufthansa Technik im Vorhaben eingesetzte Personal.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das von LHT erstellte Konzept sowie die Realisierung des Mockups inklusive aller Testaufbauten war notwendig, um die eingangs formulierte Fragestellung nach alternativen Funkmethoden für die ausgewählten, simulierten Anwendungsfälle beantworten zu können. Dabei wurde darauf geachtet, die jeweilige Ausgestaltung der Anwendung in Hard- und Software möglichst effizient und zielgerichtet umzusetzen. Somit konnte mit einem angemessenen Aufwand ein Testsystem etabliert werden, welches zum einen die Komplexität und Vielfalt der (Funk-)

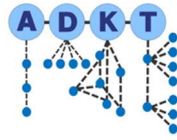
Verbindungsmöglichkeiten und entsprechender Anwendungen widerspiegelt, zum anderen aber nicht in eine echte Produktentwicklung einstieg, da sich die Arbeiten auf die Umsetzung der forschungsrelevanten Module konzentrierten.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Die Ergebnisse aus dem Bereich des MTU Setups (Anwendungen mit BLE, ZigBee und UWB) werden genutzt, um daraus die Strategie für zukünftige Anwendungen und den Einsatz in entsprechenden Produkten zu schärfen. Speziell im neuen Umfeld der UWB Funktechnik, in welchem noch ein großer Entwicklungsbedarf besteht, um zu einem flugzeugtauglichen Produkt zu kommen, liegt aus Sicht der LHT ein großes Potential für den Einsatz in einer zuverlässigen und gleichzeitig luftfahrtoptimierten Anwendung.

Die Ergebnisse aus der Untersuchung des Wi-Fi 6E sind dahingehend interessant, als dass sie aufzeigen, dass der Unterschied in der tatsächlichen Anwendung im Flugzeug nicht signifikant durch die neue Technologie im Vergleich zu Wi-Fi 5 und 6 profitiert. Durch den Einsatz des 6 GHz Bandes entsteht hier eine nennenswerte Verbesserung, da sich hierbei beispielsweise (für Europa) drei 160 MHz breite Kanäle nutzen lassen. Allerdings ist die weltweite Ratifizierung des Standards nicht abgeschlossen und auch die weltweite Nutzung des zweiten 160 MHz Kanals ist nicht in Aussicht. Hierdurch bleiben Unsicherheiten auch im Speziellen durch die nicht weltweit einheitlich nutzbaren Frequenzen.

Zudem sind mit Projektende die ersten Wi-Fi 7 fähigen Produkte auf dem Markt erschienen. Gerade in der Anwendung der Wi-Fi Versorgung in der Kabine hat dieser neue Standard ein paar Merkmale, die eine Verbesserung für den Anwendungsfall in der Kabine darstellen können: Es wurden in diesem Standard weitere Optimierungen für die Übertragung in allen drei Bändern



aufgenommen (z. B. die Reduzierung von Latenzen und die Verbesserungen bei der Modulationsart auf eine 4096-QAM) sowie das gleichzeitige Nutzen aller zur Verfügung stehenden Bänder (2,4 GHz, 5 GHz und 6 GHz) spezifiziert (Multi-Link-Operation, MLO), um nur einige zu nennen. Das Test-Setup ist mit entsprechenden M.2 PCI Karten (z. B. Intel BE200) und Access Points erweiterbar und kann für diese Tests wiederverwendet werden, um auch Wi-Fi 7 innerhalb des Flugzeug-Mockups zu untersuchen.

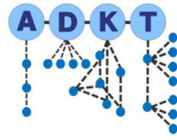
II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Zu dem Thema UWB gibt es zahlreiche Projekte aus der Industrie, die auch bis in die Luftfahrt hineinreichen. Hierzu wurde beispielsweise ein IEEE Paper von Airbus veröffentlicht¹³. Im Bereich der Wi-Fi 6E Technologie wurden schon flugtaugliche Produkte im Jahr 2023 vorgestellt, die diese Technologie mit aufgenommen haben. Somit ist der Einsatz der Technologie generell schon Stand der Technik, allerdings ist eine wissenschaftliche Betrachtung von Wi-Fi 6E in der Flugzeugkabine bis zum heutigen Tage der LHT nicht bekannt.

II.6 Veröffentlichungen und Vorträge

Im Projektzeitraum sind keine Veröffentlichungen oder öffentliche Vorträge zu Inhalten des Projektes von der LHT erstellt oder gehalten worden.

¹³ (IEEE, Wireless Connectivity in Airplanes: Challenges and the Case for UWB, 2021)



Literaturverzeichnis

Dr. Abdalla, S. (2012). *Standards und Risiken drahtloser Kommunikation: Risikoanalyse des IEEE 802.11 Standards*.

Bundesnetzagentur. (06. Nov. 2023). *Verfügung 135/2019*. Von https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Allgemeinzuteilungen/FunkanlagenGeringerReichweite/2019Vfg135_UWB.pdf?__blob=publicationFile&v=2 abgerufen

EASA. (2017). *Certification Memorandum: Guidance to Certify an Aircraft as PED tolerant*. European Aviation Safety Agency.

Europäische Kommission. (2019). Durchführungsbeschluss (EU) 2019/785 der Kommission vom 14. Mai 2019 über die Harmonisierung der Funkfrequenzen für Ultrabreitbandgeräte [...]. *Amtsblatt der Europäischen Union*.

Europäische Kommission. (2021). Durchführungsbeschluss (EU) 2021/1067 der Kommission vom 17. Juni 2021 über die harmonisierte Nutzung von Frequenzband 5 945 - 6 425 MHz [...]. *Amtsblatt der Europäischen Union*.

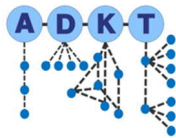
Europäische Kommission. (2022). Durchführungsbeschluss (EU) 2022/179 der Kommission vom 8. Februar 2022 über die harmonisierte Nutzung von Funkfrequenzen im 5-GHz-Band [...]. *Amtsblatt der Europäischen Union*.

IEEE. (2020). *IEEE standard for low-rate wireless networks, Std 802.15.4z*. Institute of Electrical and Electronics Engineers.

IEEE. (31. März 2021). *Wireless Connectivity in Airplanes: Challenges and the Case for UWB*. Von <https://ieeexplore.ieee.org/document/9391672> abgerufen

Schnabel, P. (06. Nov. 2023). *Elektronik-Kompendium.de*. Von <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/net/1602101.htm> abgerufen

WiFi Alliance. (06. Nov 2023). *Wi-Fi.org*. Von <https://www.wi-fi.org/countries-enabling-wi-fi-in-6-ghz-wi-fi-6e> abgerufen



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektstrukturplan	7
Abbildung 2: Initialer ADKT Projekt-Balkenplan	8
Abbildung 3: Aktualisierter ADKT Projekt-Balkenplan	9
Abbildung 4: Technologie-Auswahl mittels Spidermap-Diagramm.....	20
Abbildung 5: Technologie-Auswahl.....	21
Abbildung 6: Funkplanungssimulation, A330/340, 2,4 GHz	22
Abbildung 7: Gesamt-Architektur.....	24
Abbildung 8: Multi Technology Unit Mockup	24
Abbildung 9: Wi-Fi Mockup.....	25
Abbildung 10: A320 Mockup mit Wi-Fi Clients	26
Abbildung 11: MTU Lasttest-Messwerte (Packet Error Rate, Round Trip Time)	27
Abbildung 12: Wi-Fi 6E Messwertanzeige (Geschwindigkeit pro Client, Gesamt)	27
Abbildung 13: Visualisierung der TCP-Verbindungseigenschaften (Beispiel).....	28
Abbildung 14: Beispiel eines Drucksensor (rechts) mit MTU (links).....	28
Abbildung 15: Tastenfeld am Sitz (links) zum Steuern von Benachrichtigungslampen (rechts)	29
Abbildung 16: Diskretes Eingabemodul (links) und Ausgabemodul (rechts).....	29
Abbildung 17: Lichtsteuerung (LED-Steifen, links) über kapazitive Knöpfe.....	29
Abbildung 18: Simulierte Sensoren unter dem Sitz (links) und an der Rückenlehne (rechts)	29