



DFS Deutsche Flugsicherung

Luftfahrtforschungsprogramm

PaWaDACs (20X2108B)

**Flugsicherungsanforderungen
an Bodeninfrastruktur,
Vernetzung und Cyber-
Sicherheit und Aufbau eines
LDACS Testnetzes**

Schlussbericht der DFS

Impressum

Autor/Ansprechpartner: Dr. Armin Schlereth
Dateiname: Schlussbericht_PaWaDACs_DFS_v6.docx
gedruckt: 11.02.2026
zuletzt geändert/gespeichert: 11.02.2026
Anzahl Seiten: 44

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

DFS Deutsche Flugsicherung GmbH
Am DFS-Campus 10
63225 Langen
Tel.: (06103) 707-0

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
1 Rolle der DFS im Verbundprojekt „PaWaDACs“	7
1.1 Aufgabenstellung und Ziele	7
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	9
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	9
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	11
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
2 Eingehende Darstellung der Ergebnisse	12
2.1 Die Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	12
2.1.1 AP 1.1 Anforderungen in der Luftfahrt	12
2.1.2 HAP 3 „Infrastruktur Testbetrieb“	14
2.1.3 AP 4.1 Szenarien Definition	16
2.1.4 AP 4.3 Validierung Bodeninfrastruktur	17
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	17
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	17
2.3.1 Auswahl der Funkstandorte	17
2.3.2 Ortsbegehung von Funkstandorten mit dem DFS Systemmanagement vor Ort	18
2.3.3 Weitere Aktivitäten, erforderlich für eine Installation am Funkstandort in Stuttgart-Berkheim	18
2.3.4 Zusammenfassende Ergebnisse der Installation am DFS Funkstandort Stuttgart-Berkheim	21
2.3.5 Implementierung am DLR Standort in Oberpfaffenhofen	29
2.3.5.1 LDACS Radio Devices	29
2.3.6 Weitere Funkkomponenten	30
2.3.6.1 GNSS-Empfänger	30
2.3.7 Netzwerk Infrastruktur Komponenten	30
2.3.7.1 Netzwerk Switche	30
2.3.7.2 IP Steuerbare Steckdosenleisten	30
2.3.7.3 DLR-Lab Gateway	30
2.3.7.3.1 Hardware Spezifikation	31
2.3.7.3.2 Software Specifications	31

2.3.7.4	Virtual Machine Host	32
2.3.7.4.1	Hardware Spezifikation	33
2.3.7.4.2	Software Specifications	33
2.3.7.4.3	Virtual Machines	33
2.3.7.5	CISCO Router ISR 4331	36
2.3.7.6	SAFRAN SecureSync	39
2.3.8	Ausarbeitung eines Vernetzungskonzeptes	39
2.3.8.1	Netzwerk Topologie	39
2.3.8.2	Zeitsynchronisation	41
2.3.9	Implementierung und Tests der Netzinfrastruktur	41
2.4	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	41
2.5	Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt Dritter	42
2.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses	42
3	Abkürzungsverzeichnis	43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektstrukturplan für das Verbundvorhaben PaWaDACs	9
Abbildung 2: Balkenplan für das Verbundvorhaben PaWaDACs mit Angabe des kritischen Pfades in Rot.	10
Abbildung 3: Baseline LDACS Zielarchitektur [Quelle – Frequentis)	12
Abbildung 4: Installation Sendestandort Berkheim	19
Abbildung 5: LDACS Antenneninstallationen gemäß der DLR Frequenzplanungsberechnungen	20
Abbildung 6: 19“ LDACS Gestellschrank am DFS Funkstandort in Berkheim	22
Abbildung 7: Rohde & Schwarz (BPS) LDACS Radio	23
Abbildung 8: Frequentis LDACS Ground Station	25
Abbildung 9: 19“-Schrank mit allen relevanten PaWaDACs Komponenten im DLR Labor in Oberpfaffenhofen	29
Abbildung 10: Zwei Netzwerk Switche (blaue Komponenten) für das MGMT und das LDAN Netzwerk.	30
Abbildung 11: DLR-Lab Gateway Workstation	31
Abbildung 12: Screenshot des Web Interfaces des DLR-Lab Gateway.	32
Abbildung 13: Virtual Machine Host	32
Abbildung 14: Screenshot des Web Interfaces des Virtual Machine Hosts.	33
Abbildung 15: System Specifications des AAA-Server und der installierten RADIUS Software	34
Abbildung 16: System Spezifikation des Syslog-Server und der installierten System Logging Software.	35
Abbildung 17: System Spezifikation für den Cisco Router ISR4331/k9 als LMA.	38
Abbildung 18: PaWaDACs Netzwerk Topologie	40
Abbildung 19: Zeitsynchronisation einschließlich NTP Stratum Levels	41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Unterschiede zwischen der PaWaDACs Architektur und der Baseline LDACS Zielarchitektur nach Frequentis Vorgaben	13
Tabelle 2: Überblick der gemessenen und geforderten Sendeleistungen.	28

1 Rolle der DFS im Verbundprojekt „PaWaDACs“

1.1 Aufgabenstellung und Ziele

Die Bord-Boden Kommunikation zwischen Flugsicherung und Flugzeug erfolgt heute in allen Phasen des Fluges über Sprechfunk (Voice Communication) und Datenfunk (Datalink). Für den Sprechfunk wird seit 75 Jahren das DSB-AM Modulationsverfahren verwendet. Data Link nutzt D8PSK im gleichen VHF Frequenzband und wird mit VHF Data Link Mode 2 bezeichnet (VDLM2).

Als Data Link Anwendungen werden zurzeit über VDLM2 die sogenannte Controller zu Pilot Kommunikation genutzt (CPDLC – Controller Pilot Data Link Communication) im oberen Luftraum (UAC=Upper Airspace Control) oberhalb circa 7500m und im Towerbereich (TWR = Tower) die Anwendungen D-ATIS (Aeronautical Terminal information Service) und Departure Clearance (DCL) eingesetzt. Die Nutzung im oberen Luftraum ist seit 2013 mandatiert eingeführt. Die CPDLC Dienste beinhalten ausschließlich Routinekommunikationen zwischen Lotse und Pilot wie zum Beispiel für Übergabe zwischen Sektoren. Zeitkritische Anwendungen sind mit VDLM2 aufgrund des verwendeten Kanalzugriffsverfahrens und der geringen Bandbreite (25 kHz) nicht möglich.

Aufgrund der für 2030 zu erwartenden Sättigung („capacity crunch“) des VLD Mode 2 Systems ist es dringend notwendig breitbandige Medien für die Bord-/Bodenkommunikation für ATS Anwendungen zeitnah einzuführen. Neben SATCOM bietet nur LDACS als bodengestütztes System aufgrund seines Standardisierungsgrades die Möglichkeit genügend Bandbreite bereit zu stellen. Darüber hinaus bietet dieses System Security Merkmale, die für zukünftige IP-basierende Übertragungstechniken unabdingbar sind.

Im PaWaDACs Projekt wurde nun erstmals ein interoperables LDACS System in das operationelle Netzwerk eines ANSP's eingefügt.

Es ist ein Verbundvorhaben mit dem österreichischen Projekt CyMoDACs, was unter anderem die Integration von Bodensystemen der Firma Frequentis ermöglichte und Interoperabilitätstests mit LDACS Bord- und Bodengeräten der Firma Rohde und Schwarz möglich machte. Diese Installation dient dabei als zukünftige „goldene Referenz“ für potentielle spätere weiterführende Testmöglichkeiten.

Partner im PaWaDACs Projekt waren:

- Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG (R&S) als Leiter des Gesamtvorhabens
 - o Firma Berold - KMU - Im Unterauftrag von Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
- BPS GmbH
- Deutsche Flugsicherung GmbH (DFS)

Darüber hinaus wurde als Verbundvorhaben eng mit dem österreichischen Projekt CyMoDACs zusammengearbeitet. Partner im CyMoDACs Projekt waren:

- Firma Frequentis in Wien
- FH JOANNEUM in Graz
- SITA als Kommunikationsdienstleister

Die entscheidenden übergeordneten Ziele des Verbundvorhabens PaWaDACs können wie folgt kompakt zusammengefasst werden:

- Schaffung und Bereitstellung einer permanenten Referenz - Bodeninfrastruktur für LDACS (L-band Digital Aeronautical Communications System).
- Nachweis der Interoperabilität von LDACS Demonstratoren aus zwei unterschiedlichen Vorhaben.

Die DFS hatte hierbei die Führung folgender Arbeitspakete inne:

- AP1.1: Anforderungen in der Luftfahrt,
- HAP 3: Infrastruktur Testbetrieb und deren Arbeitspaketen
 - o AP 3.1: Anforderungen an den Testbetrieb,
 - o AP 3.2: Vernetzungskonzept.

Weiterhin hat die DFS Beiträge zu folgenden Arbeitspaketen geliefert:

- AP2.1: Referenzprofile,
- AP 3.3: Aufbau der Bodeninfrastruktur,
- AP 4.1: Szenarien Definition,
- AP 4.3: Validierung Bodeninfrastruktur.
-

Ein Beitrag zu AP2.1 war hierbei in der ursprünglichen Planung nicht vorgesehen, erwies sich aber im Rahmen des Projektes als erforderlich.

Hierbei lassen sich die wesentlichen DFS Ziele wie folgt zusammenfassen:

1. Definition der Anforderungen an ein neues Bord-/Bodenübertragungssystem aus Sicht der Luftfahrt. Hierbei ging es insbesondere um die Vorgaben im Hinblick auf die Security. So wurde im Rahmen des Projektes eine Security Risk Analyse durchgeführt.
2. Bereitstellung von DFS Funkstandorten für die Implementierung und deren Auswahl auf Basis von zu erarbeiteten Frequenzplanungsvorgaben zum Schutz der Legacy Systeme DME (Distance Measuring Equipment), SSR, MLAT (Multilateration) und ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast).
3. Einbindung einer LDACS Bodeninfrastruktur in das operationelle Datennetz der DFS.
4. Integration von Boden Demonstratoren vom österreichischen Take Off Projekt CyMoDACs. Durch diesen Schritt kann auch der Nachweis einer internationalen LDACS Interoperabilität erbracht werden.
5. Aufbau von Kenntnissen bzgl. der Einbindung neuer IP-basierender Bord-/Bodenkommunikationsmedien in das operationelle DFS IP-Netz.

6. Aufbau von Kenntnissen hinsichtlich der Bord-/Boden IP-basierenden Protokollarchitektur.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Da es wesentlich ist, dass auch LDACS Bodengeräte aus dem österreichischen Take Off Projekt CyMoDACs mit integriert werden können, wird dorthin ein sehr enger Kontakt vorgesehen. Dies schließt bereits die Abstimmung in früheren Projektphasen mit ein, in denen die Voraussetzungen für die Integrierbarkeit definiert und beschrieben werden.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die PaWaDACs Projektstruktur und dessen Verzahnung mit dem Take Off Projekt CyMoDACs sind in folgendem Bild dargestellt. Der jeweilige Lead des Arbeitspaketes ist in rot für das PaWaDACs und in grün für das CyMoDACs Projekt angeben.

Projektstrukturplan PaWaDACs – LuFo und Verzahnung Take Off

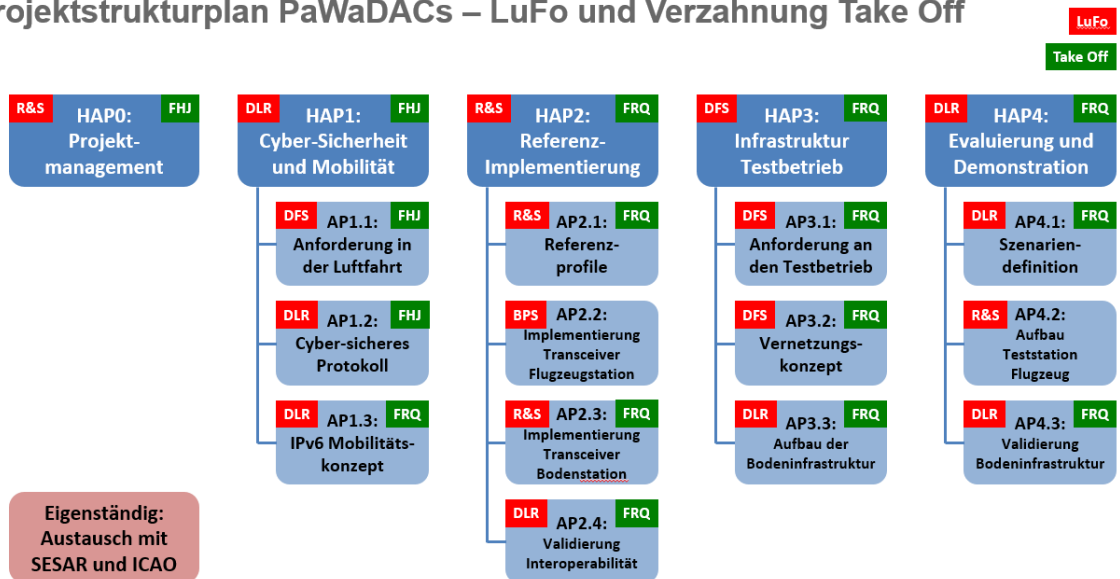


Abbildung 1: Projektstrukturplan für das Verbundvorhaben PaWaDACs

Der zeitliche Ablaufplan ist in Abbildung 2 dargestellt. Hierbei sind die von der DFS bearbeiteten Arbeitspakete farblich hervorgehoben.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Der Stand bzgl. der Festlegung der LDACS Architektur und der darin zu implementierenden Komponenten und Protokolle wird auf Basis folgender Dokumenten- und Projektliste deutlich:

- ICAO Annex 10 Vol III (LDACS Draft SARPs) (Status bis Ende 2024)
- ICAO Doc 10114 (LDACS Draft Manual) (Status bis Ende 2024)
- EUROCAE WG-108 material on interface definition and profile for ATN/IPS
- Project Paper PP858 on ATN/IPS (AEEC)
- ARINC 660B CNS/ATM Avionics Architectures Supporting NEXTGEN/SESAR Concepts (AEEC)
- SESAR Project 14, Solution 60, FCI Terrestrial Data Link (LDACS)
- SESAR Project 14, Solution 77, FCI Services
- SESAR Project 33, Solution 2, LDACS Complement
- SESAR FCDI, Work Package 5, Initial TS/IRS (Deliverable D5.1)

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Ein sehr wichtiger Bestandteil des PaWaDACs Verbundprojektes war die Integration von Boden Demonstratoren vom österreichischen Take Off Projekt CyMoDACs. Durch diesen Schritt konnte auch der Nachweis einer internationalen LDACS Interoperabilität erbracht werden.

Darüber hinaus wurde durch aktive DFS Mitarbeit in der EUROCAE WG-82 gewährleistet, dass die Kenntnisse aus dem PaWaDACs Projekt (z.B. Bodenarchitektur) in die EUROCAE Standards miteingebracht wurden.

2 Eingehende Darstellung der Ergebnisse

2.1 Die Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

2.1.1 AP 1.1 Anforderungen in der Luftfahrt

Das Ziel von AP1.1 war die Erstellung entscheidender Anforderungen für Cyber Sicherheit und Mobility aus Luftfahrt Sicht mit speziellem Fokus auf die Flugsicherung.

Das Vorgehen lässt sich dabei in 4 Unterkategorien gliedern:

a) Anforderungen an die Layer 2 Cyber-Security von LDACS

Ziel des PaWaDACs Projektes ist es ein LDACS Boden Referenzinfrastruktur aufzubauen, um Security und Mobility Features diesen neuen Bord/Bodenlinks testen zu können. Im ersten Schritt wurde daher eine Baseline LDACS Zielarchitektur festgelegt. Diese ist in folgendem Bild wiedergegeben.

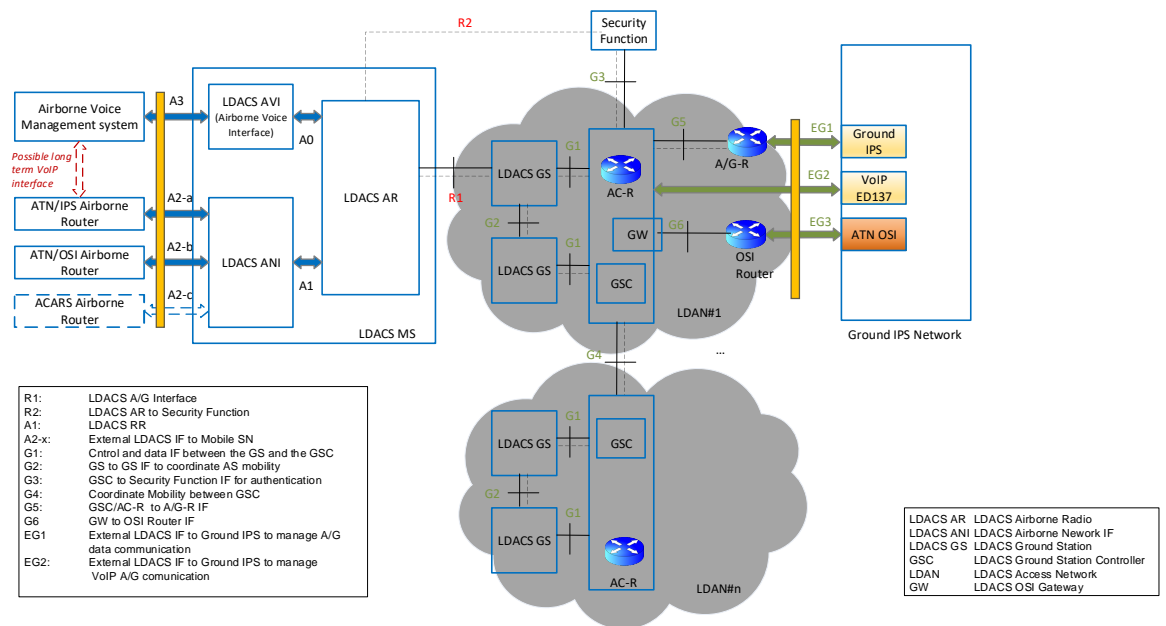


Abbildung 3: Baseline LDACS Zielarchitektur [Quelle – Frequentis]

Im Rahmen des PaWaDACs Projektes konnten jedoch nicht alle Funktionalitäten der LDACS Zielarchitektur implementiert werden. Zum einen aufgrund limitierter Ressourcen innerhalb des Projektes und zum anderen aufgrund der Tatsache, dass noch einige Elemente Gegenstand internationaler Standardisierungsarbeiten (ICAO, EUROCAE) waren. Offene Punkte im Hinblick auf Security wurden diskutiert und Lösungen erarbeitet. Fokus hierbei war die Layer 2 Security, die für das R1 Interface zwischen LDACS Airborne Radio (AR) und LDACS Ground Station (GS) benötigt wird.

Aus diesem Grunde wurde eine "reduzierte" LDACS Architektur zusammen mit dem CyMoDACs Projekt definiert, die im Laufe des Projektes als PaWaDACs Architektur diente.

Eine Gegenüberstellung zwischen den Funktionalitäten der PaWaDACs Architektur und der in Abbildung 3 dargestellten “Baseline LDACS Zielarchitektur” ist in folgender Tabelle dargestellt.

	LDACS Airborne Radio
A2-b	Das ATN/OSI Airborne Router Interface wird nicht implementiert.
A3	Das VOICE Interface zur Unterstützung von digitaler Sprachübertragung wird nicht getestet und deshalb auch nicht implementiert. <i>Anmerkung: Implementierung von digitaler Sprache ist nicht Gegenstand des PaWaDACs Projektes.</i>
	LDACS Ground Area
GS/GSC	GS und GSC werden in einer Einheit zusammengefasst.
A/C-R	Ein Standard IPv6 Router wird verwendet.
A/G-R	Gegenüber ATN-IPS reduzierte Funktionalität der PaWaDACs Implementierung: <ul style="list-style-type: none"> - Die AGMI-Proxy Funktionalität wird für die Multi-Link Fähigkeit bei Benutzung mehrerer Data Links benötigt und wurde deshalb nicht implementiert. - Das GB-LISP (Ground Based – LISP) Protokoll wird für das Routing und die Mobility Funktion beim Handover zwischen verschiedenen Data Links und Service Providern zur Minimierung des Protokoll Overheads eingesetzt. Beides war im Rahmen des PaWaDACs Projektes nicht erforderlich und wurde deshalb nicht implementiert..
VoIP	Die Sprachkomponenten werden nicht implementiert: <ul style="list-style-type: none"> - GV-IF = Ground Voice Interface - DVG = Digital Voice Gateway
AAA	Der AAA-Server war Bestandteil des DLR Laboraufbaus und war somit in der PaWaDACs Bodeninfrastruktur enthalten.
PMIP	Wurde im Rahmen des PaWaDACs Projektes implementiert. <i>Anmerkung: PMIP wird benötigt, wenn mindestens 2 GSs implementiert sind.</i>

Tabelle 1: Unterschiede zwischen der PaWaDACs Architektur und der Baseline LDACS Zielarchitektur nach Frequentis Vorgaben

b) Analyse von A/G Security Konzepten

In zweiten Schritt wurde eine Analyse von möglichen A/G Security Konzepten und deren Anwendbarkeit auf LDACS durchgeführt. Hierbei wurden verschiedene MAKE (Mutual Authentication and Key Establishment) Algorithmen miteinander verglichen und deren Anwendbarkeit auf LDACS untersucht. Als finale Empfehlung wurde der ISO/IEC11770-3:2021 Keyagreement Mechanism 7 with

Elliptic Curves ausgewählt. Dabei war die DFS Security Abteilung stets aktiv in den Review der Dokumente und bei dem Projektmeetings involviert.

Bei den Betrachtungen flossen Informationen hinsichtlich relevanter Security Anforderungen aus ICAO Draft LDACS SARPS und SESAR Solution 60 LDACS Security Assessment mit ein. Diese wurden abschließend von Rohde und Schwarz bewertet.

c) Security Risk Analyse nach DFS Vorgaben

Die Security Betrachtungen wurden durch eine Security Risk Analyse nach DFS Vorgaben abgerundet. Diese wurde zunächst auf den vorerst bekannten Architekturannahmen im Rahmen der AP 1.1 LDACS Architektur durchgeführt. Später vor der Inbetriebnahme des Testbetriebs wurde diese auf Basis der zu installierenden Architektur und im AP 3.2 entwickelten Netzwerkkonzeptes nochmals wiederholt, um sicher zu stellen, dass alle DFS Anforderungen erfüllt werden.

d) Anforderungen Mobilitätskonzept

Die in EUROCAE und EUROCONTROL Dokumenten in Frage kommenden Mobility Anforderungen (z.B. Verfügbarkeit, Transit time 95% und 99 % etc. bzgl. des LDACS Netzwerkes am Boden) wurden zusammengefasst.

2.1.2 HAP 3 „Infrastruktur Testbetrieb“

Im Folgenden wird eine Gegenüberstellung zu den DFS SMARTe Zielen für das HAP 3 „Infrastruktur Testbetrieb“ gegeben.

Spezifisch

1. **Erstellen von Referenz-Implementierungen sowohl für die Bodenstation als auch für die Flugzeugstation.**
 - ➔ Status: Eine Referenz-Implementierung wurde erreicht jedoch mit folgenden Einschränkungen:
 - a. Implementierung an 2 Standorten (Oberpfaffenhofen-DLR, Berkheim-DFS). Ursprünglich waren 3 Standorte geplant.
 - b. Eingeschränkter Ausleuchtbereich der Antennen zum Schutz von DFS Legacy Systemen (MLAT, DME, SSR, ADS-B).
 - c. Begrenzte Sendeleistung in Berkheim zum Schutz von DFS Legacy Systemen (MLAT, DME, SSR, ADS-B)
2. **Aufbau eines LDACS-Testnetzes für den präoperationeller LDACS-Testbetrieb.**
 - ➔ Status: Dieses Ziel wurde vollständig erreicht durch die Einbindung des DFS-Funkstandortes in das Testnetz der DLR in Oberpfaffenhofen und die Anbindung der LDACS Herstellerlabornetze.
3. **Aufbau von Erfahrungen beim Aufbau und der Vorbereitung des späteren Betriebs von LDACS Bodenkomponenten im DFS Umfeld.**

→ *Status: Dieses Ziel wurde vollständig erreicht durch die Berücksichtigung der entsprechenden Protokolle im VPN zwischen DFS und DLR und die zugehörigen Firewall-Freischaltungen. Darüber hinaus wurde durch entsprechende Testprozeduren die korrekte Implementierung nachgewiesen (DFS zusammen mit der DLR).*

Messbar

1. Referenz-Implementierungen sowohl für die Bodenstation als auch für die Flugzeugstation erstellt.
→ *Siehe Informationen zur Referenzimplementierung im Kapitel 2.3.3.*
2. LDACS-Testnetz für den präoperationeller LDACS-Testbetrieb aufgebaut und getestet.
→ *Siehe Informationen zur LDACS-Testnetz Implementierung in den Kapiteln 2.3.8 und 2.3.9.*

Attraktiv

1. **Attraktiver Funktionsumfang für die zukünftigen Nutzer des LDACS basierten digitalen Flugfunks, indem die breitbandige LDACS Technologie gezielt mit bereits ausgerollten VDL Mode 2 Systemen gekoppelt wird.**
→ *Dieses Thema wurde vom Parallel-Projekt CyMoDACs bearbeitet.*
2. **Steigerung der Gesamtsystemfähigkeit (Ziel 4 der Förderpolitischen Ziele) und damit ein wesentlicher Beitrag zur Effizienzsteigerung in der Luftfahrt (Ziel 3 der Förderpolitischen Ziele)**
→ *LDACS bietet erheblich mehr Bandbreite im Vergleich zu VDL Mode 2 und somit erst die Möglichkeit zukünftige Data Link basierende Verfahren der Flugsicherung wie Nutzung von ADS-C flächendeckend einführen zu können.*
3. **Zukunftssicherheit durch international klar festgeschriebene und nachgewiesene Interoperabilitätskriterien als Basis für eine herstellerunabhängige Implementierung.**
→ *Aufgrund des Fehlens der Frequenzplanungskriterien wurden im Projekt von DFS-Seite eigene Vorgaben erarbeitet, die allerdings als sehr konservativ zu bewerten sind. Diese ermöglichten jedoch dennoch die Installation von LDACS an einem operationellen VHF Sendestandort, was somit in gewissem Umfang die Machbarkeit der Nutzung von LDACS im operationellen Umfeld belegt.*

Realistisch

1. **Alle benötigten technischen und wissenschaftlichen Kompetenzen sind im Projektteam selbst komplett vorhanden.**
→ *Status: Aus DFS Sicht voll erfüllt.*

- 2. Zur Optimierung wird gezielt eine Verzahnung mit dem österreichischen Programm Take Off angelegt, in dessen Projektteam ebenfalls alle benötigten Kompetenzen komplett vorhanden sind.**

→ *Status: Es fanden regelmäßige Abstimmungstreffen mit dem Projekt CyMoDACs statt. Die Einbindung von CyMoDACs und der Firma Frequentis hat für einen entsprechenden Knowhow-Transfer gesorgt, der die Implementierung einer Referenzarchitektur erst möglich gemacht hat.*

- 3. Das Projektteam hat neben den nachgewiesenen Kompetenzen auch die Erfahrung und die Vernetzung im internationalen Umfeld, um alle Arbeitsergebnisse in den entscheidenden Standardisierungsgremien auch einbringen und verankern zu können, z.B. bei der ICAO, SESAR und andere.**

→ *Status: Vertreter von DLR, Rohde und Schwarz und der DFS haben aktiv an den relevanten ICAO und EUROCAE Meetings teilgenommen und Beiträge zum Thema LDACS geliefert.*

Terminiert

- 1. Zur Durchführung wird ein professionelles Projektmanagement installiert, im Rahmen dessen alle relevanten Projektziele verfolgt werden.**

→ *Status: Es fanden regelmäßige Projektmeetings mit Darstellung des aktuellen Sachstandes, der offenen Punkte und der Pflege einer zugehörigen Action Item Liste statt.*

- 2. Alle relevanten Projektziele werden als Meilensteine in einem übergeordneten Zeitplan geführt. Die entscheidenden Liefermeilensteine sind im Balkenplan zur Projektskizze bereits angelegt.**

→ *Status: Ein Meilensteinplan wurde aufgestellt und entsprechend dem Projektfortschritt während der Projektdurchführung vom Projektkoordinator Rohde und Schwarz gepflegt.*

- 3. Der übergeordnete Zeitplan wird auch die Verlinkung zum österreichischen Programm Take Off miteinschließen.**

→ *Status: Die Abfolge der zeitlichen Tätigkeiten wurde in regelmäßigen Abstimmungstreffen zwischen dem PaWaDACs und CyMoDACs Projekt koordiniert.*

2.1.3 AP 4.1 Szenarien Definition

Im Rahmen des Arbeitspaketes AP 4.1. wurden am Standort Berkheim mehrere Messfahrten unternommen, um die möglichen Fahrstrecken festlegen zu können. Dies wurde vor Ort durch das DFS Personal unterstützt.

Darüber hinaus wurde die Diskussion der durchzuführenden Tests aktiv unterstützt. Leider stellte sich heraus, dass eine automatische Übergabe zwischen den beiden LDACS Systemen aufgrund der Geländebeschaffenheit und dem Bewuchs nicht möglich ist. Dies hätte zu unkontrolliertem Hin- und Herschalten zwischen den Bodenstationen geführt. Deshalb hat man den Ansatz gewählt, die Hand-offs manuell durchzuführen. An dieser Stelle sei erwähnt, dass bei der Festlegung der Testszenarien auch das im AP 2.1 definierte Profil für LDACS eine Rolle spielte (z.B. Großsignalfestigkeit). Deshalb

wurde von DFS Seite ein nicht unerheblicher Aufwand bei der Unterstützung des AP 2.1 geleistet, der ursprünglich nicht geplant war.

2.1.4 AP 4.3 Validierung Bodeninfrastruktur

Die Validierung fand in mehreren Schritten statt. Zunächst wurden bei der Installation Messungen vorgenommen, die die Sendeleistung und das Spektrum der LDACS Sendesignale validierte.

Im Vorfeld der eigentlichen Validierungsfahrten wurde erste Verbindungstests vor Ort in Berkheim durchgeführt um die finale Teststrecke festzulegen.

Die finalen Tests mit den eingerüsteten DLR Fahrzeug als LDACS AS fanden im Februar 2025 statt.

Bei allen Testaktivitäten vor Ort in Berkheim war das DFS System Management Personal am Standort Stuttgart involviert. Darüber hinaus wurde bei allen Testfahrten die DFS zentrale Betriebsführung Ortung informiert, um bei unmittelbaren Störungen der DFS Legacy Systeme (SSR, MLAT) eingreifen zu können. Bei keinem der Testfälle wurden hierbei Auffälligkeiten der DFS Legacy Systeme, wie z.B. eine erhöhte SSR Empfangsfehlerrate, festgestellt.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Zur Umsetzung des Projektes waren fast ausschließlich Kosten für das einzusetzenden Personal notwendig. Die geplanten Personalkosten waren für das Projekt ausreichend auch Aufgrund der COVID-19 Pandemie sind deutlich weniger Reisekosten angefallen, da viele Meetings online stattfanden.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Folgende Aktivitäten wurden für eine LDACS Referenzimplementierung als notwendig erachtet und durchgeführt:

- Auswahl der Funkstandorte,
- Ortsbegehung der Funkstandorte,
- Weitere Aktivitäten erforderlich für die Installation am Funkstandort,
- Installation am Funkstandort,
- Installation im DLR Labor in Oberpfaffenhofen,
- Implementierung des Bodennetzwerkes.

2.3.1 Auswahl der Funkstandorte

Basis bildet die durch das DLR durchgeführte Frequenzplanung. Als Input diente dabei die von der DFS bereitgestellten Informationen hinsichtlich des Standortes und den Planungskriterien zum Schutz der Legacy Systeme DME, SSR, MLAT und ADS-B. Weiterhin wurde von DFS Seite die Vorgabe gemacht, in der Auswahlplanung nur DFS VHF Sendestandorte als mögliche Kandidaten zu untersuchen. Dies diente dem Schutz

der VHF DSB-AM Empfänger an den zugehörigen dedizierten DFS VHF Empfangsstandorten.

Final ergab sich hieraus eine Short-List von 2 möglichen Funkstandorten. Diese sind Nürnberg-Haidberg und Stuttgart-Berkheim. Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten (→ beide Standorte liegen für Handover-Tests mit einem Fahrzeug zu weit auseinander) und nach Durchführung von ersten Fahrzeugtest bzgl. der Empfangsqualität für analogem VHF DSB-AM vor Ort wurde entschieden die Implementierung an nur einem Funkstandort, Stuttgart-Berkheim, vorzunehmen. Da ein wesentliches Projektziel Handover-Tests zwischen Implementierungen verschiedener LDACS Hersteller ist, wurde entschieden eine Implementierung mit entsprechenden DME-Sektor-Antennen an den beiden Sendemasten in Berkheim vorzunehmen. Durch entsprechende Ausrichtung der Antennen mit einem teilweise überlappendem Antennendiagramm sind dabei Handover-Tests wie geplant möglich.

Die Installation in Stuttgart-Berkheim ist im Abbildung 4 dargestellt. Die sich überlappenden Antennendiagramme mit den zugehörigen technischen Parametern sind im Abbildung 5 wiedergegeben.

2.3.2 Ortsbegehung von Funkstandorten mit dem DFS Systemmanagement vor Ort

Ergebnisse der Ortsbegehungen in Nürnberg-Haidberg und Stuttgart-Berkheim waren die Auswahl der Sendemasten und die Festlegung des Aufbaus innerhalb des Shelters.

2.3.3 Weitere Aktivitäten, erforderlich für eine Installation am Funkstandort in Stuttgart-Berkheim

Folgende Aktivitäten wurden von DFS Seite durchgeführt oder extern beauftragt:

- Statikprüfung der ausgewählten Sendemasten durch eine externe Firma
- Erstellung einer Standortbescheinigung (mit Festlegung der maximalen Sendeleistungen und Mindestabständen für Mitarbeiter etc.)
- Antenneninstallation durch eine externe Antennenbaufirma
- Begleitung der Aktivitäten am final ausgewählten Funkstandort in Stuttgart-Berkheim durch das Systemmanagement-Personal vor Ort und durch die DFS Projektmitarbeiter bei Bedarf.
- Abnahme der Installation vor Ort (Überspannungsprüfung der Geräte im 19 Zollschrank, Messung der Sendeparameter etc.). Die Installation wurde identisch zur operationellen Installation von VHF-Funksystemen vorgenommen. Dies schließt auch die redundante Stromversorgung durch einen implementierten Bachmann-Verteiler mit ein.

Installation VHF Sendestandort Berkheim

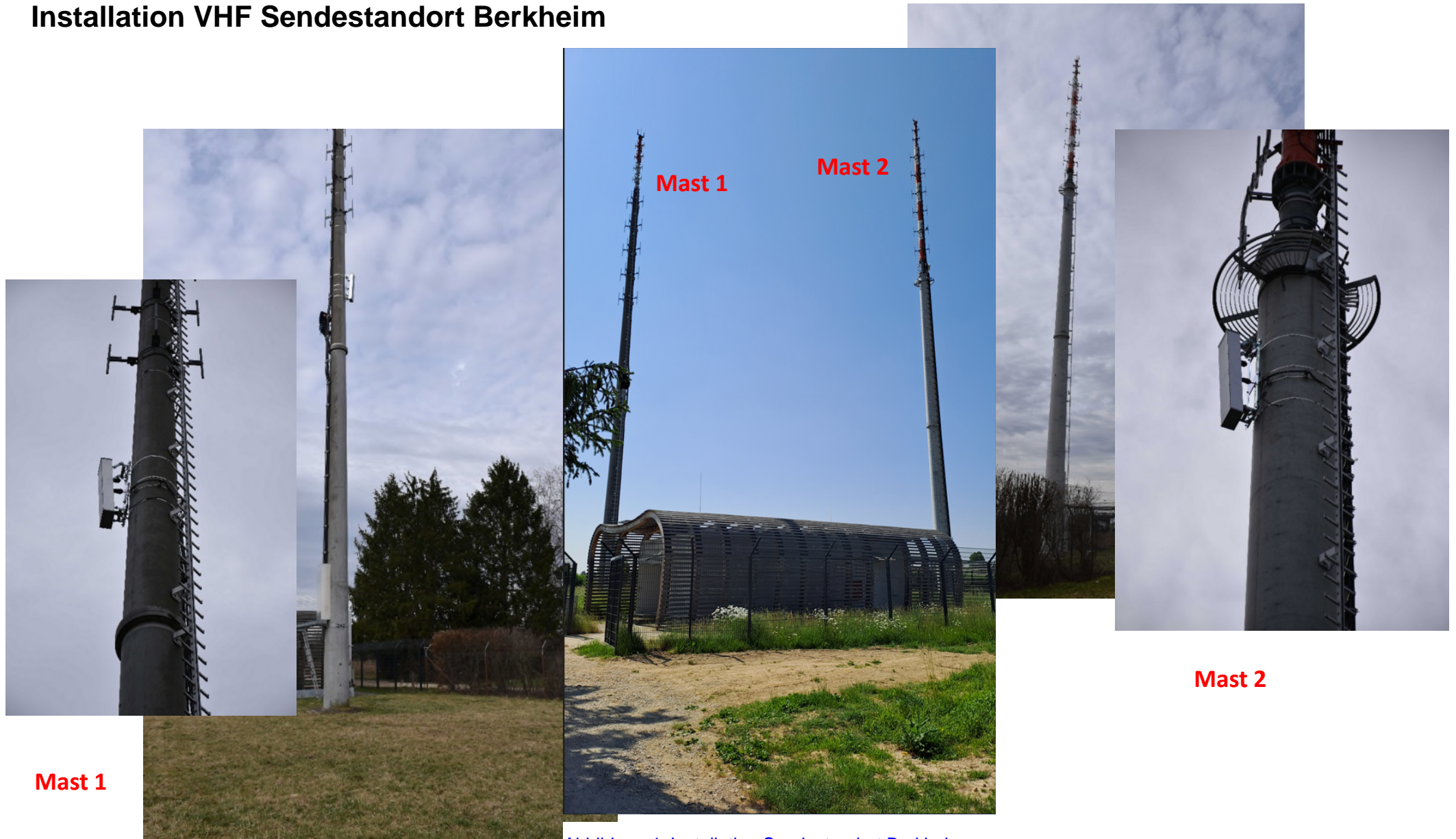


Abbildung 4: Installation Sendestandort Berkheim

Summary – Berkheim (48.709722, 9.326111)

- Stations to suppress
 - 1x SSR: -107.3° from North
 - 9.2 dB suppression required
 - 4x MLAT DFS: -98.8° to -103.3° from North
 - ≤ 7.7 dB suppression required
- Valid range for Berkheim GS main antenna orientation: $(-41.8^\circ, -164.4^\circ)$ from North (clockwise)
 - $-98.8^\circ + 57^\circ = -41.8^\circ$ to $-107.3^\circ - 57^\circ = -164.4^\circ$ (for >10 dB antenna suppression)
- Exemplary GS antenna orientation
 - 1st channel, i.e., 1119.5 MHz with EIRP (+ safety margin) ≤ 44.0 dBm
 - 80° from North (approx. opposite to airport for better compatibility with 1090-MHz systems)
 - 2nd channel, either 1120.0 MHz with EIRP (+ safety margin) ≤ 41.5 dBm or 1120.5 MHz with EIRP (+ safety margin) ≤ 34.5 dBm
 - 110° from North

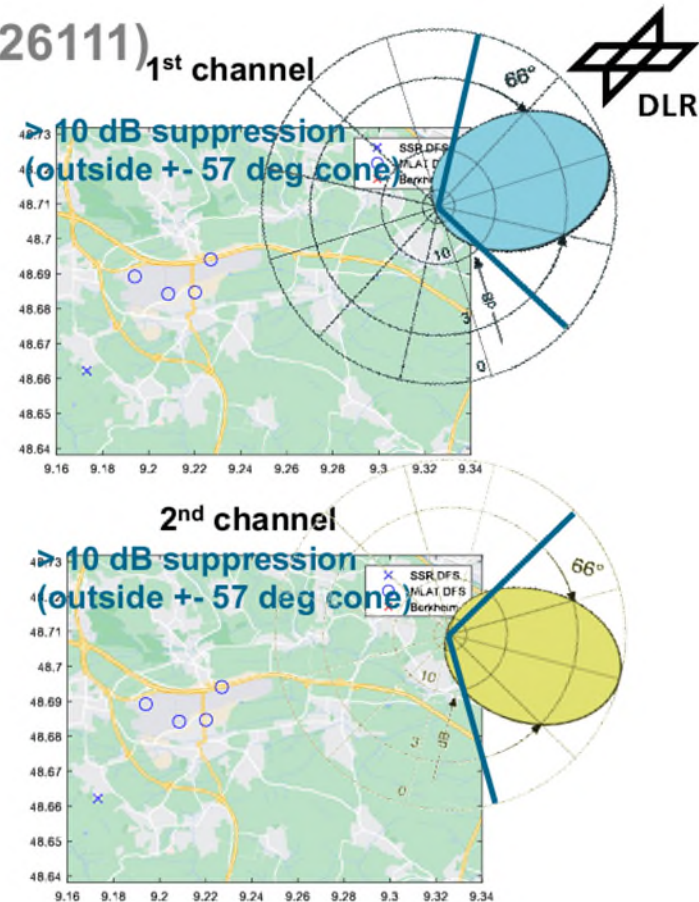


Abbildung 5: LDACS Antenneninstallationen gemäß der DLR Frequenzplanungsberechnungen

2.3.4 Zusammenfassende Ergebnisse der Installation am DFS Funkstandort Stuttgart-Berkheim

Die gesamte Installation in Berkheim beinhaltet folgende Komponenten:

a.) Externe Komponenten

- Je eine DME Sektorantenne vom Typ Kathrein 716 405 auf den beiden Betonmasten (Mast 1 und Mast 2)
- Kabelinstallationen von/zu den Antennen zum Gestell Raum vor Ort (Kabeltyp RFS HCA 78-50J);

b) Interne Installation (siehe Abbildung 6):

- 19" Rohde & Schwarz Gestell Schrank (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) mit den folgenden Komponenten:
 - o 2 IP-steuerbare Steckdosenleisten (GUDE 1202)
 - o 1 Bachmann Verteiler (Electrical Power Distributor) RAL7047
 - o 1 SAFRAN Secure Sync 2400
 - o 1 Frequentis LDACS Ground Station
 - o 1 Rohde und Schwarz (BPS) LDACS Ground Station

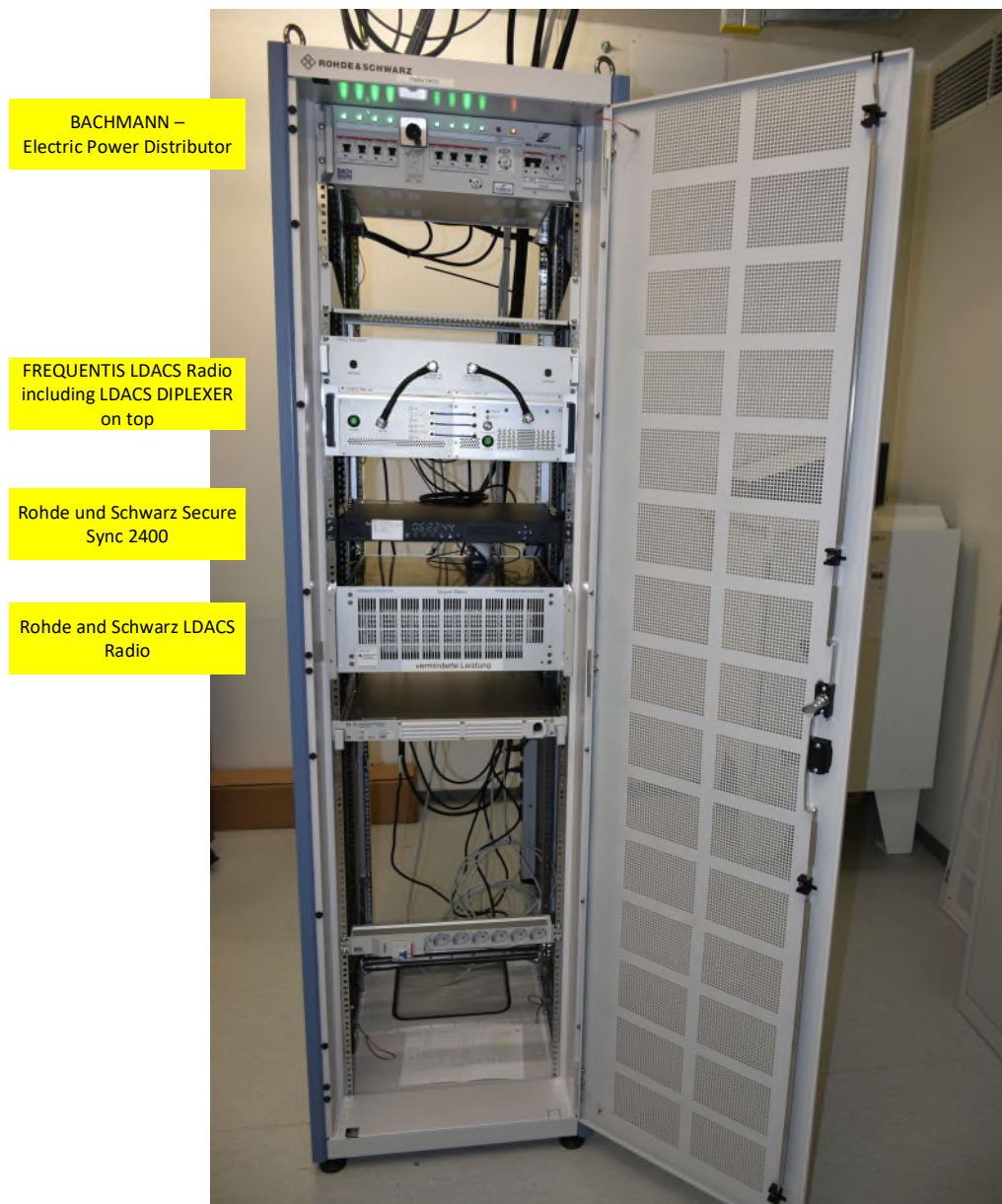


Abbildung 6: 19" LDACS Gestellschrank am DFS Funkstandort in Berkheim

Abbildung 7 zeigt die Installation der Rohde & Schwarz (BPS) LDACS Radio Unit im Detail. Die obere schwarze Komponente ist der Rohde & Schwarz Secure Sync Device, der die Zeitreferenz für beide LDACS Ground Stations (R&S und Frequentis) liefert.



Abbildung 7: Rohde & Schwarz (BPS) LDACS Radio

Die Rohde & Schwarz (BPS) Ground Station (GS) ist an die Antenne am Mast 1 angeschlossen. Nachfolgend sind Messergebnisse für die Sendefrequenz 1119,5 MHz wiedergegeben. Das Bild zeigt das gemessene Signalspektrum am Ausgang des Kabels, welches an den Monitoring Ausgang der DME-Antenne angeschlossen ist. Der Messpunkt ist hierbei an der LDACS GS.

LDACS frequency = 1119,5 MHz

Channel Power on Transponder Output

Output Power P = 24,9 dBm (offset correction +0,6 dB)



Abbildung 8 zeigt die Installation der Frequentis GS, die aus einem separaten Diplexer und dem eigentlichen Radio besteht.



Abbildung 8: Frequentis LDACS Ground Station

Die Frequentis GS ist an die Antenne am Mast 2 angeschlossen. Nachfolgend sind Messergebnisse für die beiden konfigurierten LDACS Sendefrequenzen 1120,0 MHz and 1120,5 MHz wiedergegeben. Die Bilder zeigen das Spektrum des Signals am Ausgang des Kabels, welches an den Monitoring Ausgang der DME-Antenne angeschlossen ist. Der Messpunkt ist hierbei an der LDACS GS.

LDACS frequency = 1120,0 MHz

Channel Power on Antenna Mast 2

Output Power P = 22,5 dBm (offset correction +0,8dB)



LDACS frequency = 1120,5 MHz

Channel Power on Antenna Mast 2

Output Power P = 17,6 dBm (offset correction +0,8dB)



Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die gemessenen Sendeleistungen und stellt diese den geforderten Werten gegenüber. STOB steht für „Standortbescheinigung“, die die maximal zulässigen Werte angeben. Dabei sei angemerkt, dass die maximale EIRP auf 40 dBm beschränkt wurde, obwohl zum Teil höhere Werte laut Ergebnis der Frequenzplanung erlaubt gewesen wären (siehe auch Werte in Abbildung 5). Diese sorgte für einen zusätzlichen Safety Margin was Interoperabilität mit den DFS Legacy Systemen angeht.

Antenna Mast	Frequency [MHz]	EIRP/dBm [Desired Value - AP3.1]	Antenna Gain - STOB [dBi]	Cable loss - STOB [dB]	Tx Power - Desired value at the Radio Output [dBm]	Tx Power - measured at the Radio Output [dBm]	Tx Power - measured at the monitoring output of the DME antenna [dBm]
1	1119,5	40,0	16,15	2,0	25,85	24,90	23,10
2	1120,0	40,0	16,15	2,0	25,85	25,00	22,50
2	1120,5	34,5	16,15	2,0	20,35	19,70	17,60

Tabelle 2: Überblick der gemessenen und geforderten Sendeleistungen.

2.3.5 Implementierung am DLR Standort in Oberpfaffenhofen

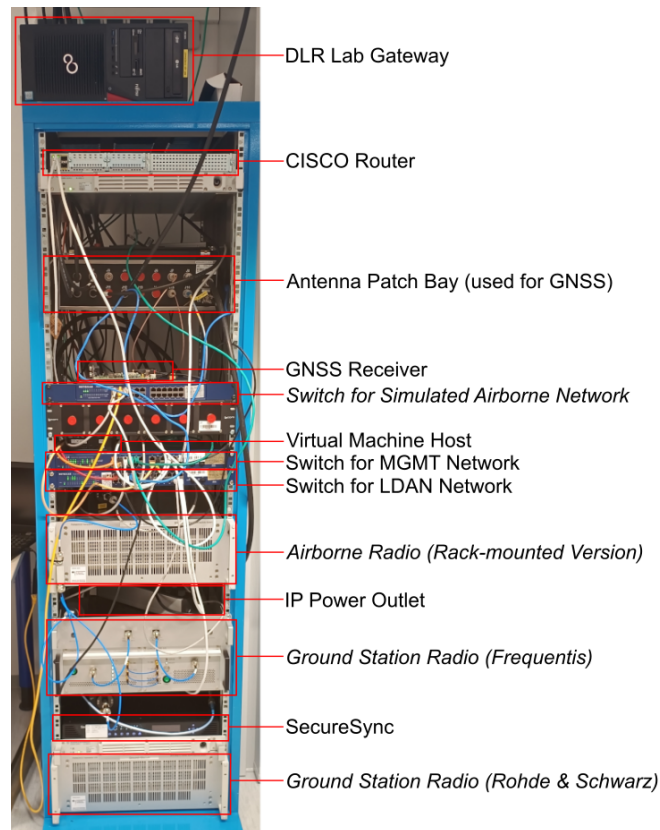


Abbildung 9: 19"-Schrank mit allen relevanten PaWaDACs Komponenten im DLR Labor in Oberpfaffenhofen

Das DLR Labor befindet sich im TE01 Gebäude in der Nähe zum DLR Gelände in Oberpfaffenhofen. Der Zugang zum Labor ist dabei limitiert und nur für autorisiertes Personal möglich. Die gesamte Hardware, die im nachfolgenden kurz beschrieben wird, ist in einem 19" Schrank, wie in Abbildung 9 dargestellt, untergebracht. Angaben der Komponenten in Kursivschrift bedeutet, dass diese Einheiten nur kurzzeitig für lokale Testzwecke installiert waren und nicht während der Testfahrten in Stuttgart-Berkheim.

2.3.5.1 LDACS Radio Devices

Für Tests im Vorfeld der Messkampagne wurden folgende Einheiten im DLR Labor installiert und hinsichtlich ihrer Funktionalität getestet:

- Ground Station Radio von Rohde & Schwarz
- Ground Station Radio von Frequentis
- Air Station Radio (19 Zoll Format) von Rohde & Schwarz.

2.3.6 Weitere Funkkomponenten

2.3.6.1 GNSS-Empfänger

Ein GNSS Empfänger vom Typ "Septentrio mosaic-X5" wurde verwendet. Dieser ist mit einer GNSS Antenne auf dem TE01 Gebäude verbunden.

Der GNSS Empfänger diene ausschließlich der Bereitstellung eines Zeitnormals. Er fungierte hierbei als Stratum 1 NTP Server und stellte die Zeitinformation dem verbundenen NTP Client zur Verfügung. Der GNSS Empfänger hat nur Zugang zum Management Netzwerk des PaWaDACs Netzwerkaufbaus. Der Zugang zu allen anderen Netzen, wie dem Internet, ist aus Sicherheitsgründen blockiert.

Weitere Informationen zum Netzwerkkonzept und dem PaWaDACs Netzwerkaufbau finden sich im Abschnitt 2.3.8.

2.3.7 Netzwerk Infrastruktur Komponenten

2.3.7.1 Netzwerk Switches

Drei 24 Port Gigabit Ethernet Netzwerk Switches vom Typ NETGEAR GS724T wurden verwendet um die unterschiedlichen Systeme miteinander zu verbinden. Mindestens zwei Switches wurden benötigt, um die beiden separaten Netzwerke (MGMT, LDAN) abzubilden (vergleiche auch die Beschreibung im Abschnitt 2.3.8).

Ein dritter Switch wurde eingesetzt, um das Netzwerk des Airborne Radios zu definieren vorgesehen für Pre-Tests der LDACS Radios im DLR Labor.



Abbildung 10: Zwei Netzwerk Switches (blaue Komponenten) für das MGMT und das LDAN Netzwerk.

2.3.7.2 IP Steuerbare Steckdosenleisten

Um eine Remote-Steuerung der Stromversorgung zu ermöglichen, wurden IP steuerbare Steckdosenleisten vom Typ NETIO PowerBOX 4KF verwendet.

2.3.7.3 DLR-Lab Gateway

Das DLR-Lab Gateway fungiert als zentraler Netzwerk Traffic Router innerhalb des PaWaDACs Netzes. Es verwaltet das Packet Routing zwischen allen involvierten physikalischen und virtuellen IPv4 und IPv6 Netzwerken. Insbesondere ist es für den Aufbau des VPN Tunnels zur DFS zuständig.

2.3.7.3.1 Hardware Spezifikation

Eine Fujitsu Workstation mit folgender Spezifikation wurde als DLR-Lab Gateway verwendet:

- CPU: Intel(R) Core(TM) i7-6700 CPU
- RAM: 8 GByte
- HDD: 800 GByte
- 3 Gigabit-Ethernet Network Adapter
- 2 Fast-Ethernet Network Adapter

Die Hardware war damit mehr als ausreichend dimensioniert, um die gestellten Aufgaben im Projekt durchführen zu können. Die Workstation ist in Abbildung 11 zu sehen.



Abbildung 11: DLR-Lab Gateway Workstation

2.3.7.3.2 Software Specifications

Die Community Edition der pfSense Firewall (Version 2.7.2) wurde eingesetzt. Diese FreeBSD-based Firewall Software ist eine Art Standard im Feld der IP Netzwerke. Sie findet auch in der DLR IP Productive Network Infrastruktur Anwendung. Dessen Web Interface erlaubt eine grafische System Konfiguration. Abbildung 12 zeigt einen Screenshot dieses Web Interfaces. System Informationen finden sich im linken Teil, Information über die Netzwerk Interfaces sind im rechten Teil dargestellt. DLR gewährleistet, dass alle Security Patches des Herstellers ohne große Verzögerung installiert werden.

Die Software zusammen mit der Default pfSense Installation deckt alle benötigten Funktionalitäten ab (Routing, Packet Filtering, Masquerading, IPSec, NTP client und Monitoring).

The screenshot displays the pfSense web interface. The top navigation bar includes 'System', 'Interfaces', 'Firewall', 'Services', 'VPN', 'Status', 'Diagnostics', and 'Help'. The main content area is titled 'Status / Dashboard' and is divided into several sections:

- System Information:**
 - Name: pawadacs-dlr-gw.dlr-knlab.de
 - User: admin@129.247.253.220 (Local Database)
 - System: pfSense, Serial: YMSU008573, Netgate Device ID: bacfbfb3a5d7f40fdc3
 - BIOS: Vendor: FUJITSU // American Megatrends Inc., Version: V5.0.0.11 R1.13.0 for D3417-A2x, Release Date: Fri Feb 19 2016
 - Version: 2.7.2-RELEASE (amd64), built on Fri Dec 8 20:55:00 UTC 2023, FreeBSD 14.0-CURRENT. A message states: 'The system is on the latest version. Version information updated at Fri Mar 15 10:01:10 UTC 2024'.
 - CPU Type: Intel(R) Core(TM) i7-6700 CPU @ 3.40GHz, Current: 3105 MHz, Max: 3400 MHz, 8 CPUs: 1 package(s) x 4 core(s) x 2 hardware threads, AES-NI CPU Crypto: Yes (active), QAT Crypto: No.
- Interfaces:**
 - WAN: 1000baseT <full-duplex>, 193.174.157.79
 - GROUNDMGMTSUBNET: 1000baseT <full-duplex>, 172.30.10.254, fd00:4b50:48a:402::1
 - GROUNDLDANSUBNET: 1000baseT <full-duplex>, fd00:4b50:48a:401::1
 - WGO: 10.90.50.250, fd42:90:50::fa
 - DFS_VTI: 10.231.34.113, fd00:10:231:34::113
- WireGuard:**
 - Tunnel: tun_wg0, Description: DLR-PaWaDACS-WG, Active Peers: 1, Listen Port: 51820, RX: 3.93 GiB, TX: 5.50 GiB
- IPsec:**
 - Overview: P1 Active/Total: 1 / 1, P2 Active/Total: 2 / 2, Mobile Active/Total: 0 / 0

Abbildung 12: Screenshot des Web Interfaces des DLR-Lab Gateway.

2.3.7.4 Virtual Machine Host

Virtualisierung erlaubt die Erzeugung und den Betrieb von virtuellen Computern, die sich wie herkömmliche physikalische Systeme verhalten. Der große Vorteil besteht dabei in der Einsparung von Hardware.



Abbildung 13: Virtual Machine Host

2.3.7.4.1 Hardware Spezifikation

Ein Intel NUC mit einem internen Netzwerk Interface und einem weiteren Netzwerk verbunden über USB wird als Host Computer für die im Projekt verwendeten virtuellen Maschinen eingesetzt (Abbildung 13). Weitere Informationen bzgl. der Spezifikation sind in Abbildung 14 zu finden.

2.3.7.4.2 Software Specifications

Auf dem Virtual Machine Host läuft "PROXMOX Virtual Environment" Version 8.1. Es handelt sich dabei um eine Freeware für QEMU/KVM-basierende Virtualisierung. Die genaue Spezifikation ist in Abbildung 14 wiedergegeben. Die DLR gewährleistet, dass alle vom Hersteller bereitgestellten Security Patches zeitnah eingespielt werden.

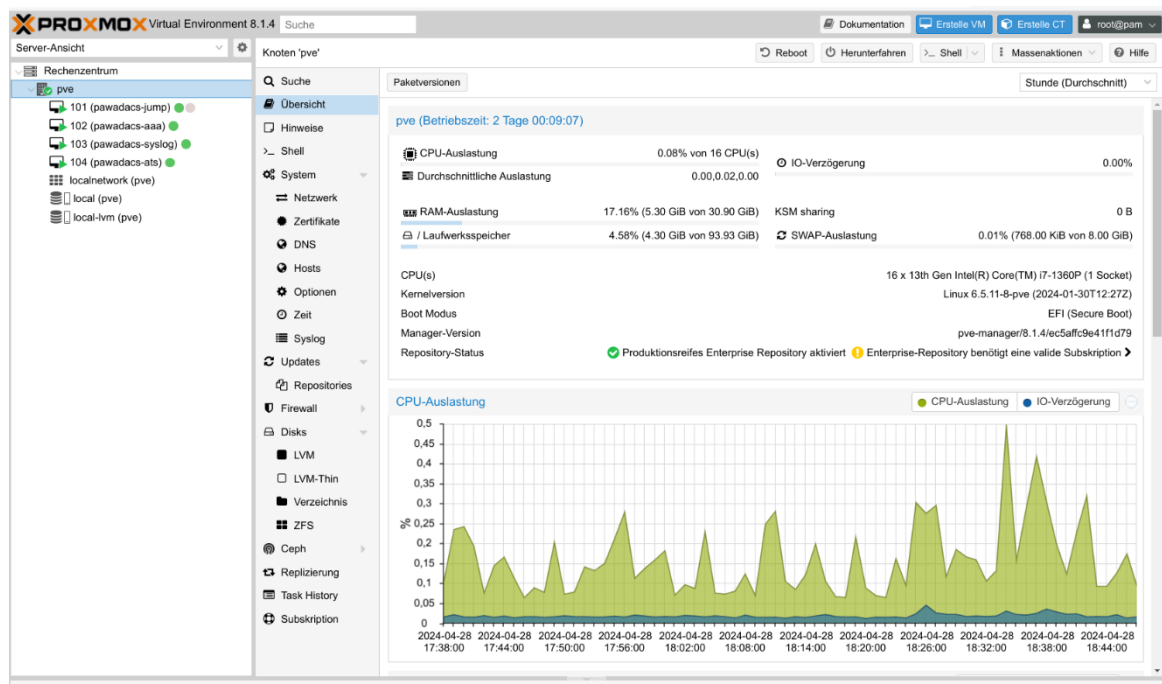


Abbildung 14: Screenshot des Web Interfaces des Virtual Machine Hosts.

2.3.7.4.3 Virtual Machines

Die folgenden Systeme sind als virtuelle Maschinen auf dem Virtual Machine Host implementiert:

2.3.7.5 CISCO Router ISR 4331

Der verwendete Router Cisco ISR 4331 ist Teil der Cisco's Integrated Services Router 4000 Serie. Cisco ISR4331/K9 mit der IOS XE Software, Version 17.03.04a, wurde als Local Mobility Anchor, LMA, implementiert. Der Router besitzt ein 3 Gigabit Ethernet Interface und eine Basic Package License.

Er besitzt folgende Features:

- High-performance Routing mit Unterstützung von Advanced Services wie VPN, Firewall, WAN Optimierung und Deep Packet Inspection.
- Modulares Design für Erweiterungen und Upgradefähigkeit für optionale Hardware und Software Lizenzen.
- Unterstützung diverser Protokolle wie IPv6, IPsec, MPLS, etc., welche essentiell für moderne IP-basierende Dienste sind, einschließlich dem Mobility Management.

Der Cisco ISR 4331 Router ermöglicht die Implementierung als Local Mobility Anchor (LMA) in einer PMIPv6 Architektur für LDACS. Dies gewährleistet Seamless Mobility für Flugzeuge durch Beibehaltung der Connectivity und Session Continuity. Durch seine robusten Konfigurationsmöglichkeiten, den Security Features und den QoS Fähigkeiten ist er gut für „mission-critical applications“ (z.B. CPDLC oder ADS-C) innerhalb der aeronautischen Kommunikation geeignet..

Die detaillierte Spezifikation, die Lizenz und die Kapazität sind in Abbildung 17 wiedergegeben.

Local Mobility Anchor (LMA):

Der LMA dient als zentralen Punkt für die Mobility des mobilen Knotens (Flugzeug) und ist dafür verantwortlich die Mobile Node's (MN's) IP Adresse zu erhalten und das Handling über verschiedene IP Netzwerke zu gewährleisten.

Cisco ISR 4331 LMA – Aufgabe eines LMA innerhalb PMIPv6:

In der PMIPv6 Architektur spielt der LMA eine zentrale Rolle. Der LMA managt die Mobility, d.h. laufende Kommunikationssessions eines Flugzeuges werden während des Fluges nicht unterbrochen.

- Mobility Management: Der Cisco ISR 4331 Router in der Rolle des LMA ist dabei dafür verantwortlich, dass die IP Adresse des Mobile Node (Flugzeug) über verschieden Netzwerksegmente (wie zum Beispiel unterschiedliche Bodenstationen oder Satelliten Funkzellen) erhalten bleibt. Damit ist sichergestellt, dass der Mobile Node immer über seine IP Adresse erreicht werden kann auch über ausgedehnte geografische Gebiete hinweg.
- Session Continuity: Durch das Handling der Registration und des Positionsupdate bietet der ISR 4331 Router eine unterbrechungsfreie Kommunikationsverbindung. Als Beispiel: Ein Flugzeug (der MN), der sich zwischen unterschiedlichen LDACS Funkzellen bewegt, behält seine IP Adresse bei der Zellenübergabe in unterschiedlichen Abdeckungsgebieten bei.
- Routing und Forwarding: Der LMA (Cisco ISR 4331) sorgt für das korrekte Routing von Datenpaketen zum MN basierend auf dessen aktueller Position. Wenn sich der MN fortbewegt, informiert das Mobile Access Gateway (MAG) (üblicherweise als Teil des Access Point) den LMA die MN Position zu

aktualisieren. Hierdurch ist sichergestellt, dass der LMA Datenpakete an den MN schicken kann.

- Effizientes Handover Management: Wenn sich das Flugzeug zwischen unterschiedlichen LDACS Funkzellen bewegt, aktualisiert der LMA seine Datenbasis, um zu gewährleisten, dass der IP Traffic korrekt weitergeleitet wird. Dies erlaubt eine nahtlose Übergabe mit minimalem Delay.

Konfiguration des Cisco ISR 4331 als LMA innerhalb PMIPv6:

Hierfür sind eine Reihe von Einstellungen vorzunehmen. Das beinhaltet:

- 1) Aktivierung der PMIPv6 Unterstützung: Im ersten Schritt wird die Unterstützung von PMIPv6 aktiviert.
- 2) Konfiguration als LMA: Der Router muss so konfiguriert werden, dass er als Local Mobility Anchor fungieren kann. Dabei sind die relevanten Interfaces zu definieren und zu gewährleisten, dass die Mobile Session Parameter korrekt eingestellt sind.
- 3) Konfiguration des MAG: Das Mobile Access Gateways (MAGs) muss so konfiguriert werden, dass seine Kommunikation mit dem LMA möglich ist. Das MAG detektiert Bewegung des MN und signalisiert dem LMA das zugehörige Update des MN Kontext.
- 4) Konfiguration des Binding Cache: Der LMA besitzt einen Binding Cache, der die Lokation jedes MN's abspeichert. Die Konfiguration beinhaltet die Einstellung des Binding Management und des Expiration Timers.

Cisco IOS XE Software, Version 17.03.04a
 Cisco IOS Software [Amsterdam], ISR Software (X86_64_LINUX_IOSD-UNIVERSALK9-M), Version 17.3.4a,
 RELEASE SOFTWARE (fc3)
 Technical Support: <http://www.cisco.com/techsupport>

ROM: (c)

System image file is "bootflash:isr4300-universalk9.17.03.04a.SPA.bin"

Suite License Information for Module:'esg'

Suite	Suite Current	Type	Suite Next reboot
FoundationSuiteK9 securityk9 appxk9	None	Smart License	None
AdvUCSuiteK9 uck9 cme-srst cube	None	Smart License	None

Technology Package License Information:

Technology	Technology-package Current	Type	Technology-package Next reboot
appxk9	appxk9	Smart License	appxk9
uck9	None	Smart License	None
securityk9	None	Smart License	None
ipbase	ipbasek9	Smart License	ipbasek9

The current throughput level is 100000 kbps

Smart Licensing Status: Registration Not Applicable/Not Applicable

cisco ISR4331/K9 (1RU) processor with 1714752K/3071K bytes of memory.
 Processor board ID
 Router operating mode: Autonomous
 3 Gigabit Ethernet interfaces
 32768K bytes of non-volatile configuration memory.
 4194304K bytes of physical memory.
 3207167K bytes of flash memory at bootflash:.

Configuration register is 0x2102

Abbildung 17: System Spezifikation für den Cisco Router ISR4331/k9 als LMA.

2.3.7.6 SAFRAN SecureSync

Der SecureSync dient, wie an der Funkstelle in Berkheim, als Zeitnormal und liefert eine gemeinsame lokale Zeitreferenz für alle Radiosysteme vor Ort.

2.3.8 Ausarbeitung eines Vernetzungskonzeptes

Parallel zu den Aktivitäten in Bezug auf die Installation an DFS Funkstandorten und im DLR-Labor wurde ein Vernetzungskonzept erarbeitet, das die Anbindung aller beteiligten Partner und die Ende-zu-Ende Kommunikationsstrecke miteinbezieht und festlegt.

Hierbei wurden folgende Aspekte berücksichtigt:

- Integration eines LDACS Access Networks (LDAN) in die operationelle DFS Bodennetzwerkinfrastruktur,
- Berücksichtigung der DFS Anforderungen aus Arbeitspaket WP1.1 Aviation Requirements,
- Berücksichtigung der Anforderungen aus Arbeitspaket WP1.3 Mobility Concept,
- Beschreibung aller relevanten Netzwerkkomponenten (Router, Time Synchronisation, etc.) und Standorte (Funkstandorte, DFS Test Umgebung, DLR Testlabor, Hersteller Test Netzwerk) und deren Netzwerkverbindungen.

2.3.8.1 Netzwerk Topologie

Das ausgearbeitete Netzwerk Topologie ist in Abbildung 18 dargestellt.

Im oberen Bereich ist die mobile Einheit „DLR Vehicle“ dargestellt, die eine LDACS Sende-/Empfangseinheit der Firma Rohde und Schwarz beherbergt.

Darunter ist der ausgewählte DFS Funkstandort „Radio Site“ in Berkheim dargestellt.

An dem darunter dargestellten DFS WAN ist links das DFS Labor in Langen wiedergegeben. Von dort kann direkt auf die Funkstandorte zugegriffen werden. Insbesondere besitzt die DFS die „Stromhoheit“ (dargestellt als „Site A/B IP Power Control“ Einheit an den Funkstandorten) über die installierten Rohde und Schwarz und Frequentis Systeme durch die Kontrolle über deren Stromversorgung durch Implementierung einer IP steuerbaren Steckdosenleiste. Die DFS hat den Kontrollzugriff auf die Steckdosenleiste, die die Gesamtstromversorgung für die LDACS-Systeme der Hersteller vor Ort bereitstellt.

Generell ist das Netzwerk aufgeteilt in ein Management-LAN (MGMT Netz) über das zum Beispiel Softwareupdates für die LDAN Systeme eingespielt werden können und eine LDAN-LAN (LDAN Netz) für die Übertragung der LDACS Nutzerdaten Ende-zu-Ende. Das Management-LAN basiert auf IPv4 und das LDAN-LAN auf IPv6.

Über einen VPN-Tunnel sind das DFS Netzwerk mit dem DLR Labor in Oberpfaffenhofen verbunden, der neben der Zeitreferenz für das LDAN Netzwerk auch die Endgerätepunkte für die Ende-zu-Ende Kommunikation mit dem DLR Fahrzeug bereitstellt. Über einen Wireguard Zugang können die beiden Hersteller Rohde und Schwarz und Frequentis mit dem DLR Netz als Relay auf deren LDACS Bodensystemen in Berkheim zugreifen.

Installation verteilt auf mehrere Bodenstandorte:

- DFS Radio Site in Berkheim ➔
- DFS LAB in Langen (VAN Testcenter – DFS Systemhaus) ➔
- LDACS Radio Hersteller:
 - Frequentis Home Site
 - Rohde & Schwarz Home Site
- DLR Lab in Oberpfaffenhof ➔

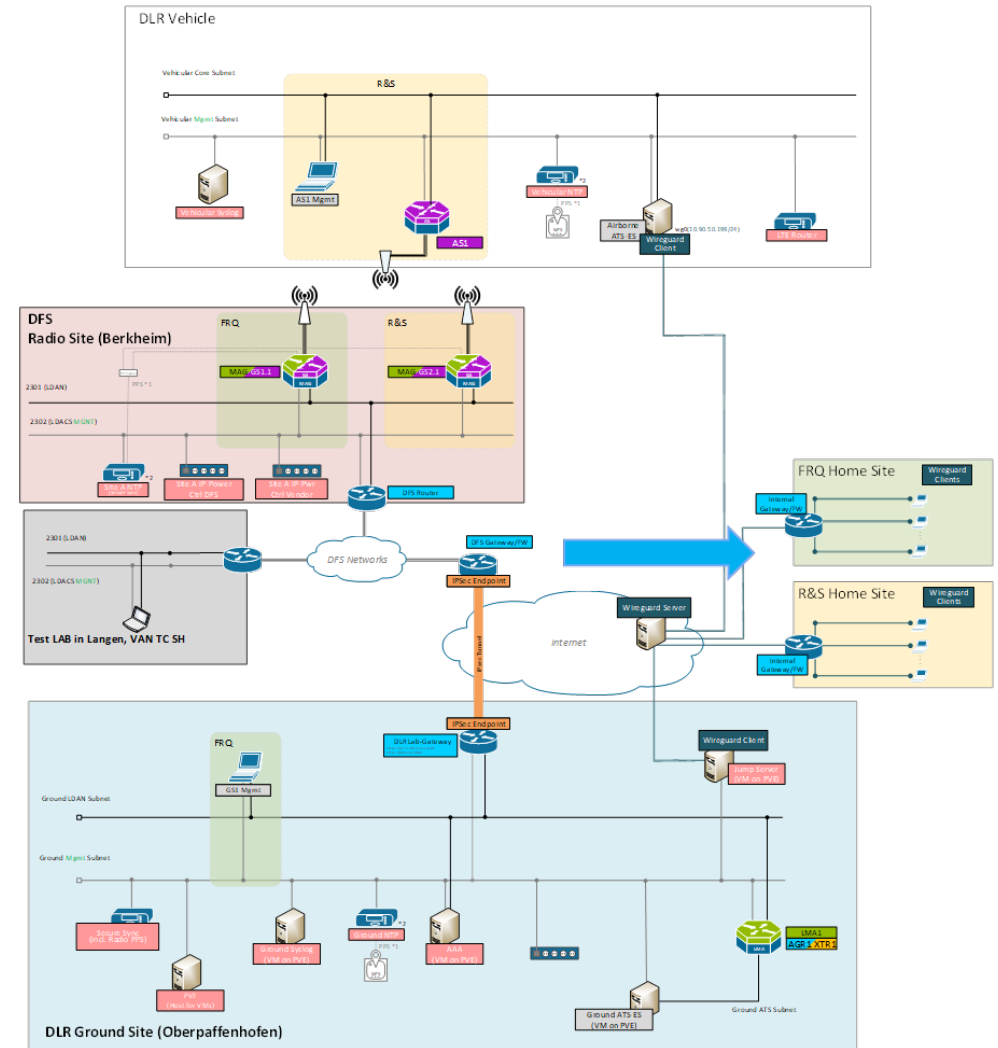


Abbildung 18: PaWaDACs Netzwerk Topologie

2.3.8.2 Zeitsynchronisation

Das ausgearbeitete Schema für die Zeitsynchronisation sowohl für die Bodeninfrastruktur wie auch die mobile Fahrzeugeinheit ist in Abbildung 19 dargestellt.

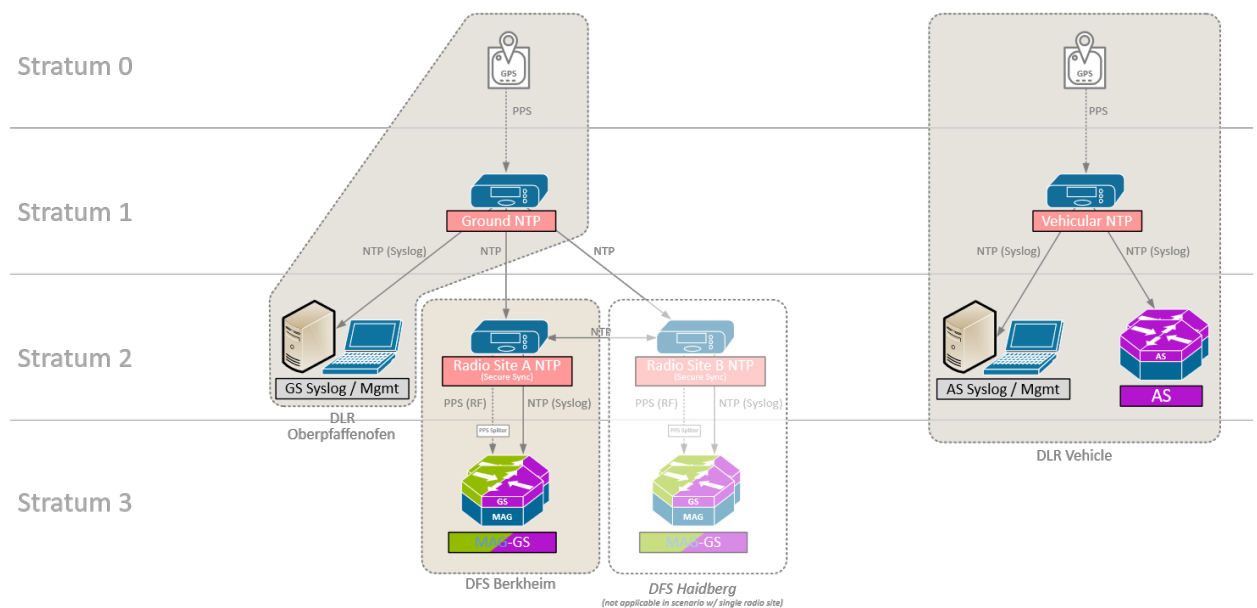


Abbildung 19: Zeitsynchronisation einschließlich NTP Stratum Levels

Als Zeitreferenz am Boden für die PaWaDACs Installation dient dabei das DLR Labor in Oberpfaffenhofen. Das im Kapitel 2.3.7.6 erwähnte System Secure Sync der Firma Rohde und Schwarz synchronisiert sich hierauf mittels NTP.

2.3.9 Implementierung und Tests der Netzinfrastruktur

Vor den eigentlichen Fahrzeugtests wurde die geplante Netzinfrastruktur eingerichtet und durch geeignete Verbindungstests im Hinblick auf ihre Funktionsweise überprüft. Dies hat sich als erheblich aufwendiger als ursprünglich geplant dargestellt, da final noch einige Änderungen des Adressierungsschemas erforderlich wurden. Solche Änderungen machten Änderungen an den DFS Firewalls erforderlich, die nur im üblichen Änderungsturnus von einigen Wochen möglich waren.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die implementierte LDACS Infrastruktur erfüllt alle operationellen und technischen Vorgaben der DFS für ein operationelles Funksystem. Deshalb bildet diese die Basis für einen weiteren Ausbau im DFS-Netzwerk. Da zurzeit noch keine finalen

Frequenzplanungskriterien für LDACS vorliegen (→ werden für Ende 2025 erwartet), wurden sehr hohe Margen für die Schutzabstände von DFS Seite angesetzt, um in jedem Fall zu gewährleisten, dass die Legacy System vor Ort und die Avionik der Flugzeuge im Anflug des Flughafens Stuttgart nicht gestört werden. Darüber hinaus wurde die Implementierung in das operationelle Datennetz der DFS auf Basis der Vorgaben durch das DFS eigene Security Risk Assessment vorgenommen (AP 1.1).

Aus den Ergebnissen des AP 1.1 und AP 3 konnten wertvolle Inputs zur Standardisierung des LDACS Systems innerhalb EUROCAE WG-82 geleistet werden (z.B. Diskussion der Architektur eines LDAN). Darüber hinaus erlangte die DFS beim Aufbau der Systeme an einem ihrer Funkstandorte wertvolle Informationen im Hinblick auf die Einbindung in das eigene Datenkommunikationsnetz und die dabei zu berücksichtigenden Security Anforderungen. Beide Aspekte erfüllen damit in vollem Umfang die geplante Verwertung der PaWaDACs Projektergebnisse.

2.5 Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt Dritter

Laut DFS Kenntnisstand gibt es keine vergleichbaren Fortschritte Dritter im Hinblick auf die Weiterentwicklung des LDACS Standards. Der aktuelle Entwicklungsstand weiterer an der LDACS-Entwicklung beteiligter Firmen/Institution aus China und Italien (Firma Leonardo) ist den DFS Beteiligten im PaWaDACs Projekt nicht im Detail bekannt.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses

Im Rahmen der ICNS 2025 wurde eine Präsentation von Seiten DLR mit dem Titel 'The Next Iteration of LDACS: Operation of an LDACS Air Radio Demonstrator in an ANSP-integrated LDACS Ground Access Network' gegeben. Bei der Erstellung war neben den Firmen Rohde und Schwarz und Frequentis auch die DFS beteiligt.

Darüber hinaus wurden von DFS Seite keine weiteren Veröffentlichungen publiziert. Es sind zunächst auch keine weiteren geplant.

3 Abkürzungsverzeichnis

AAA	Authentication, Authorization, and Accounting
ADS-C	Automatic Dependent Surveillance - Contract
AES	Advanced Encryption Standard
AGMI	Air/Ground Mobility Protocol as part of the ICAO ATN/IPS
ATS	Air Traffic Services
BNetzA	Bundesnetzagentur
CM	Context Management
CPDLC	Controller Pilot Data Communications
CSP	Communications Service Provider
CyMoDACs	Cyber-Security and Mobility for Digital Aeronautical Communications
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - German Aerospace Center
FHJ	FH Joanneum – University of Applied Sciences
FRQ	Company Frequentis
LDACS	L-band Digital Aeronautical Communications System
LDAN	LDACS Access Network
LMA	Local Mobility Anchor
MAG	Mobile Access Gateway
MN	Mobile Node
NTP	Network Time Protocol
OSI	Open Systems Interconnection
PaWaDACs	Paving the Way to Digital Aeronautical Communications
PMIPv6	Proxy Mobile IPv6
R&S	Company Rohde and Schwarz
Syslog	System Logging
VPN	Virtual Private Network