

Vorhabenbezeichnung: MultiNet6G

Laufzeit des Vorhabens: 21 Monate

Berichtszeitraum: 01.10.2023 bis 30.06.2025

Abschlussbericht zu MultiNet6G Gesamtprojekt

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Nach Abschluss der Konzeptionsphase wurde mit dem Laboraufbau an der Hochschule Koblenz begonnen, um einen Proof-of-Concept des Multi-Netzes zu schaffen. Entsprechend der beantragten Geräteliste wurden hierfür FibroLAN Falcon Switches, Server und Access Points beschafft. Anschließend wurde die Hardware in Betrieb genommen, umfangreichen Tests unterzogen und die spezifischen Funktionen der Geräte eingehend erprobt.

Im nächsten Schritt wurde die zur Verfügung stehende Open Source Software für den 5G-Core evaluiert. Die Analyse unterschiedlicher Lösungen führte zur Entscheidung für free5GC, das anschließend als Core-Lösung implementiert wurde. Zur Überprüfung der Interaktion aller Komponenten wurde eine Version des OpenSource Cores mit den vorhandenen Elementen implementiert. Dabei wurde überprüft, welche Komponenten miteinander kompatibel sind und an welchen Stellen Schnittstellenprobleme auftreten. Gleichzeitig wurde die Planung des finalen Campusnetzwerks unter Einbeziehung der zusätzlichen MultiNetz-Komponenten vorangetrieben. Dabei wurden sowohl die Leitungsführung als auch unterschiedliche Standortoptionen sorgfältig geprüft und abgewogen.

Aufgrund von Lieferverzögerungen, die auf eine angespannte Situation der Lieferketten sowie auf zusätzliche Zollprobleme beim Import aus England zurückzuführen sind, konnte das geplante 5G NR Open RAN-System (ORAN) erst zum Ende des o.g. Berichtszeitraums vollständig geliefert und installiert werden. Um dennoch die Entwicklung voranzutreiben wurden eine Übergangslösung erarbeitet. Hierzu wurden die vorhandenen Indoor-5G-Zellen der Hochschule eingesetzt. Diese bieten nur einen stark eingeschränkten Funktionsumfang, da sie nicht für den Außeneinsatz konzipiert sind, über eine begrenzte Reichweite verfügen, keine Scheduler-Zugriffe zur Priorisierung von Datenströmen ermöglichen, generell nicht nach dem Architekturprinzip von ORAN ausgelegt sind und somit auch keine ORAN-Schnittstelle zur Überwachung und Anpassung der Radioparameter bereitstellen. Trotz dieser Einschränkungen konnte das Multi-Netz aus Sicht der Core-Integration damit in einem ersten lauffähigen Zustand gebracht werden und integriert damit die drahtlosen Technologien 5G NR, WiFi 6, WiFi 6E sowie Visible Light Communication (VLC). Für den VLC-Bereich wurde von SEW eine spezielle Firmware implementiert. Radar konnte nicht eingesetzt werden, da die passenden Chips nicht mehr verfügbar sind. Der Chiphersteller wurde zwischenzeitlich übernommen und dadurch keine weiteren der bei SEW in der Forschung eingesetzten Chips hergestellt. Die verbleibenden waren bereits für andere Projekte reserviert.

Für die Messinfrastruktur sollten alle benötigten Zeitstempel durch die FibroLAN RX/G Switche erzeugt werden, basierend auf deren PTP-Fähigkeiten sowie der Zeitsynchronisation zwischen beiden Switchen. Allerdings ist die Vergabe von Hardwarezeitstempeln für beliebige Pakete direkt in den Switchen nicht möglich, deswegen wurde die Messinfrastruktur um Netzwerkkarten erweitert, die Hardwareeingangzeitstempel ermöglichen. Somit erfolgt die Vergabe von Zeitstempeln im aktualisierten Aufbau innerhalb der Netzwerkkarten welche die Pakete über einen Mirror-Port empfangen während diese auf die FibroLAN Switche als Grandmaster synchronisiert sind.

Als Endgeräte werden Industrie PCs (IPCs) eingesetzt, in die die zusätzlichen drahtlosen Technologien integriert sind. Im Bereich der 5G-Konnektivität kommt das Telit FN990-Modul zum Einsatz. Weitere Kommunikationskomponenten werden über Ethernet angebunden. Ein im Endgerät implementiertes Softwaremodul (ATSSS im UE) übernimmt die Auswahl der jeweils geeigneten drahtlosen Technologie sowie das Routing gemäß der vorliegenden Architekturabbildung.

Um die Flexibilität der Testumgebung zu erhöhen, werden die 5G Core-Komponenten in einer virtualisierten Umgebung betrieben. Die Virtualisierungsplattform Proxmox Virtual Environment (PVE) wird hierfür zur Bereitstellung entsprechender virtueller Maschinen (VMs) eingesetzt. Innerhalb dieser VMs wird das Kernnetz mittels einer eigens im Projekt entwickelten Ansible-Role automatisiert installiert. Ergänzend wurde eine CI/CD-Pipeline unter Anwendung des Infrastructure-as-Code-Paradigmas realisiert.

Die Architektur, die in der Konzeptphase entworfen wurde, findet sich in der folgenden Abbildung 1:

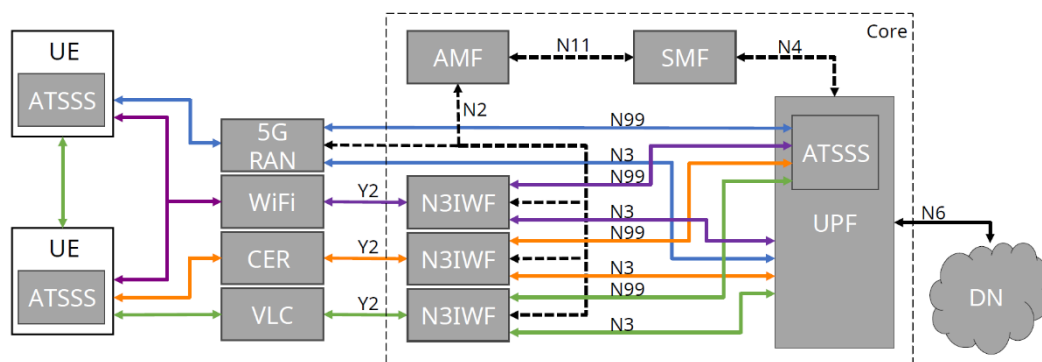


Abbildung 1 - Multinetzarchitektur

Diese Architektur wird vom implementierten Netz angenähert, da eine vollständige Umsetzung tiefgreifender Änderungen innerhalb des free5GC bedarf, was einen nicht vertretbaren Aufwand (mit entsprechenden Projektverzögerungen) der Umsetzung bedeuten würde.

Es wurden im aktiven Laboraufbau bereits diverse Messreihen durchgeführt, deren Ergebnisse in drei Publikationen (EUCNC 2024, Globecom 2024, CSCN 2025) veröffentlicht wurden bzw. werden. Der entsprechende Quelltext der Implementierung ist über <https://gitlab.uni-koblenz.de/multinet6g/public> als Open Source zugänglich.

Die **Drohnen** sind als Teil des Demonstrators vollständig in Koblenz vorhanden, und in das Multinetz vollständig integriert. Zudem wurden bereits umfangreiche Tests mit der neuen Kommunikationsarchitektur durchgeführt. Diese Tests haben positive Ergebnisse in Bezug auf die Netzwerkleistung und die Möglichkeit gezeigt, zwischen den Kommunikationskanälen zu wechseln. Der Ausgangszustand der Drohnen zu Projektbeginn nutzt Radiokommunikation bei 433 MHz gemäß der folgenden Abbildung 2:

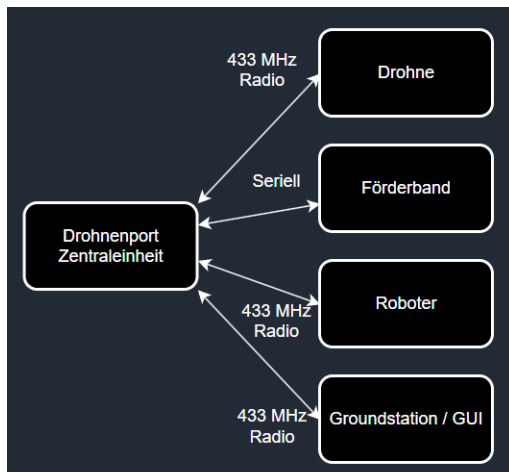


Abbildung 2 - Kommunikation Drohne vor Projektbeginn

Diese bisherige 433 MHz Telemetrikommunikation wurde von Emqopter im Rahmen des Projektes auf eine Wifi Verbindung umgestellt. Als Kommunikationsprotokoll kommt MQTT über TCP zum Einsatz, welches eine effiziente und flexible Datenübertragung ermöglicht.

Vorbereitend für die Umstellung auf ein Multinetz und wechselnde Kommunikationstechnologien im Allgemeinen, wurde in Drohne und Drohnenport MQTT als Middleware eingefügt. Dazu wurden die Komponenten mit ESP32 Mikrocontrollern ausgestattet, die sich mit dem Netzwerk verbinden und mit den anderen Komponenten über WLAN kommuniziert:

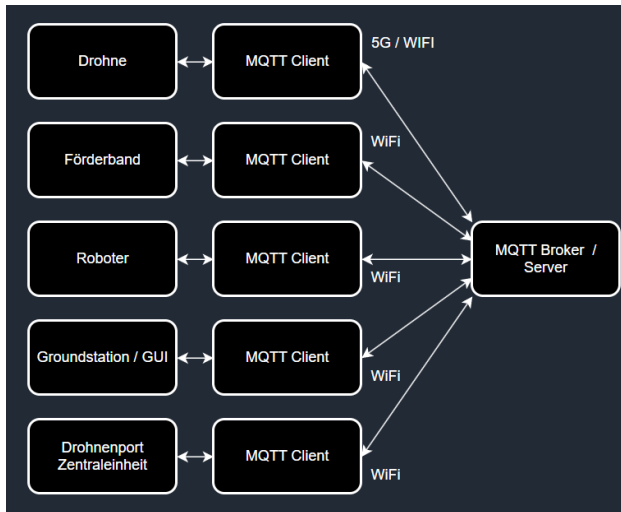


Abbildung 3 - Kommunikation Drohne mit Middleware

Dieser Aufbau wurde bei Emqopter vor Ort mit WLAN getestet. Daraufhin wurde 5G zusätzlich als alternativer Kommunikationskanal integriert, um die Drohne mit verschiedenen Netzwerken verbinden zu können. Diese Integration verbessert die Stabilität und Leistungsfähigkeit der Verbindung. Auch die Datenübertragung über ein öffentliches 5G Netz und einem VPN wurde mit dem verwendeten 5G-Modul des Modells „Telit FN 990A28“ getestet. Das Telit FN 990A28 ist ein 5G Release 16 Modul im m.2 Format. Als Zielarchitektur für den finalen Demonstrator ergab sich dadurch die folgende:

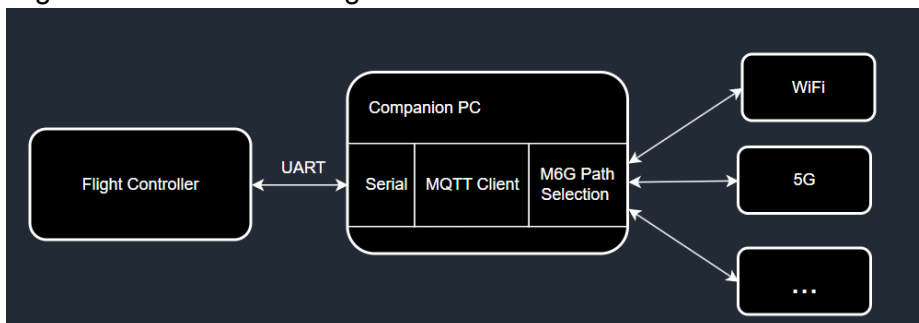


Abbildung 4 - Zielarchitektur Kommunikation Drohne

Die Hardware der Schwarmsteuerung wurde soweit vorbereitet, dass die Software des Demonstrators an der HS Koblenz integriert werden konnte.

Parallel zu den Arbeiten mit den Drohnen wurden Labor-AGVs (Automated Guided Vehicles) der Firma SEW in das Projekt MultiNet6G eingebunden. Diese Fahrzeuge sind mit einer ROS2-Schnittstelle ausgestattet und wurden der Hochschule Koblenz im Rahmen des Projekts dauerhaft zur Verfügung gestellt. Eines davon ist in Abbildung 8 dargestellt. Sie dienen als

zweite Demonstrator-Plattform zur Verifizierung des MultiNet-Ansatzes in einer mobilen Anwendung.

Die Steuerung und Regelung der AGVs erfolgt sowohl im realen Betrieb als auch in vorbereitenden Simulationen mittels ROS2. Hierfür wurde eine Anbindung an MATLAB/Simulink geschaffen, die die Entwicklung und Validierung von Pfadplanungs- und Regelalgorithmen erlaubt. Parallel wurde ein digitaler Zwilling aufgebaut. Auf dieser Basis entstand ein nichtlinearer modellprädiktiver Regler (NMPC), der Trajektorien vorausschauend berechnet und auf kontinuierlich aktualisierte Sensordaten reagiert.

Zur Validierung der Simulationsergebnisse wurde das Regelungskonzept auf das reale AGV übertragen und an die vorhandenen Sensoren und Aktoren angepasst. Dabei kam ein externes Motion-Tracking-System zum Einsatz, das eine Feinkalibrierung der Positionsbestimmung und eine systematische Fehleranalyse der Trajektorien ermöglicht.

Für den Betrieb der AGVs wurden IPCs integriert, die als Endgeräte im MultiNet fungieren. Dabei wurde sichergestellt, dass die ROS-Knoten Daten flexibel zwischen dem IPCs der AGVs und einem zentralen Server für höhere Rechenleistungen übertragen werden können. Dies ermöglicht eine dynamische Lastverteilung, insbesondere für rechenintensive Anwendungen wie die Pfadplanung und Umgebungswahrnehmung.

Ein regelbasiertes Steuerungskonzept, bei dem die AGVs einen Geschwindigkeitsvektor empfängt, wurde erfolgreich implementiert. Diese Regelung funktioniert stabil, selbst wenn das Netzwerk während des Betriebs zwischen verschiedenen Drahtlostechnologien automatisch umschaltet. Dies wurde im Rahmen der MultiNet-Integration über den Wechsel zwischen 5G und WiFi erfolgreich getestet. Die Steuerung bleibt während des Umschaltvorgangs stabil, sodass eine unterbrechungsfreie Kommunikation gewährleistet ist. Das Visible Light Communication-System (VLC) konnte hierbei nicht eingesetzt werden, da die verfügbare Bandbreite für eine zuverlässige Steuerung nicht ausreicht. Die Ergebnisse werden auf der diesjährigen ETFA veröffentlicht, siehe Kapitel zur Dissemination.

Zur Umsetzung sicherheitsgerichteter Funktionen wurde ein sogenannter „schwarzer Kanal“ in das MultiNet integriert. Ziel war es, sicherheitskritische Anwendungen wie beispielsweise eine drahtlose Not-Aus-Funktion für das AGV zu realisieren. Damit kann das Fahrzeug im Bedarfsfall von außen zuverlässig und normgerecht abgeschaltet werden.

Der schwarze Kanal stellt einen Kommunikationspfad bereit, der unabhängig von der darunterliegenden Drahtlostechnologie arbeitet und die besonderen Anforderungen sicherheitsgerichteter Systeme erfüllt:

- Sicherheit: Gewährleistung der notwendigen Integrität und Authentizität der übertragenen Daten.
- Determinismus: Vorhersehbare Latenzen und Übertragungszeiten für sicherheitskritische Signale.
- Mobilität: Mitführung des mobilen Endpunkts auf einem Labor-AGV zur Demonstration der Praxistauglichkeit im Feld.

Damit konnte gezeigt werden, dass auch in hochdynamischen MultiNet-Umgebungen sicherheitsgerichtete Funktionen zuverlässig implementiert werden können.

Die Interaktion zwischen Drohne und AGV konnte während der Projektlaufzeit nur eingeschränkt untersucht werden, da die abschließende Fluggenehmigung durch die zuständigen Behörden zum Projektende noch nicht vorlag. Diese Genehmigung ist beantragt und soll in der an das Projekt anschließenden Verstetigungsphase zur Verfügung stehen.

Im Labor wurde ein prototypischer Demonstrator realisiert, bei dem die Drohne auf die relative Position des AGVs reagiert. Die Steuerlogik basiert auf der Berechnung des Annäherungswinkels: Je nachdem, aus welcher Richtung sich das AGV der Drohne nähert, wird der jeweils nächstgelegene Rotor aktiviert. Bei einer kreisförmigen Bewegung des AGVs um die Drohne herum erfolgt eine sequenzielle Aktivierung der Rotoren, wobei der jeweils vorherige Rotor wieder deaktiviert wird. Damit konnte eine einfache, aber technisch konsistente Form der Echtzeit-Reaktionslogik zwischen beiden Systemen demonstriert werden, die als Ausgangspunkt für komplexere Interaktionsszenarien im MultiNet dient.

Zum Projektende ist an der HSKO ein vollständiges „6G Netz der Netze“ vorhanden, das die Drahtlostechnologien 5G, VLC und Wifi in den Frequenzbändern bei 2.4, 5 und 6 GHz integriert.

Disseminationsaktivitäten

Vor Projektbeginn wurde vom Projektteam als erste öffentlichkeitswirksame Aktivität auf der innoNT Jahrestagung am 26. September 2023 die Förderurkunde entgegengenommen.



Abbildung 6 - Vertreter des Projektteams bei der Überreichung der Förderurkunden mit der Parlamentarischen Staatssekretärin Daniela Kluckert, 26.09.2023

Zu Projektbeginn am 17. Oktober 2023 startete das MultiNet6G Projekt mit dem offiziellen Kick-Off in Bruchsal bei der Firma SEW. Bei diesem Treffen wurde die Projektplanung aus dem Antrag weiter konkretisiert und weitere organisatorische Maßnahmen, wie das zweiwöchige



Abbildung 5 - Gruppenbild Kickoff bei SEW, 17.10.2023

Jour fixe festgelegt. Dieses fand während der gesamten Projektlaufzeit statt.

Es wurde des Weiteren eine Projektwebsite vom Partner Sicom erstellt, welche Beiträge zum Projektfortschritt, zu Veranstaltungen sowie die wissenschaftlichen Publikationen enthält. (<https://www.multinet6g.de/>) Unterstützt wurde die Online-Präsenz durch Posts der Projektpartner auf der Plattform Linked-IN zu den jeweiligen Veranstaltungen.

Neben den Projekttreffen und der Website wurde das Projekt im Rahmen der SPS Messe 2023 in Nürnberg am 16. November 2023 durch Prof. Kiess vorgestellt.

Bei der öffentlichen Auftaktveranstaltung des innoNT Projekts NoLa (an dem die Hochschule Koblenz ebenfalls beteiligt ist) wurde am 21. Februar 2024 auch das Projekt MultiNet6G vorgestellt.

Am 9. Juli 2024 fand ein Projektworkshop mit Teilnahme des Projektträgers statt, bei dem an der HS Koblenz ein Zwischenstand der Projektergebnisse demonstriert wurde. Emqopter und SEW zeigten dort auch live vor Ort den Betrieb der autonomen Fahrzeuge und des Drohnenports.

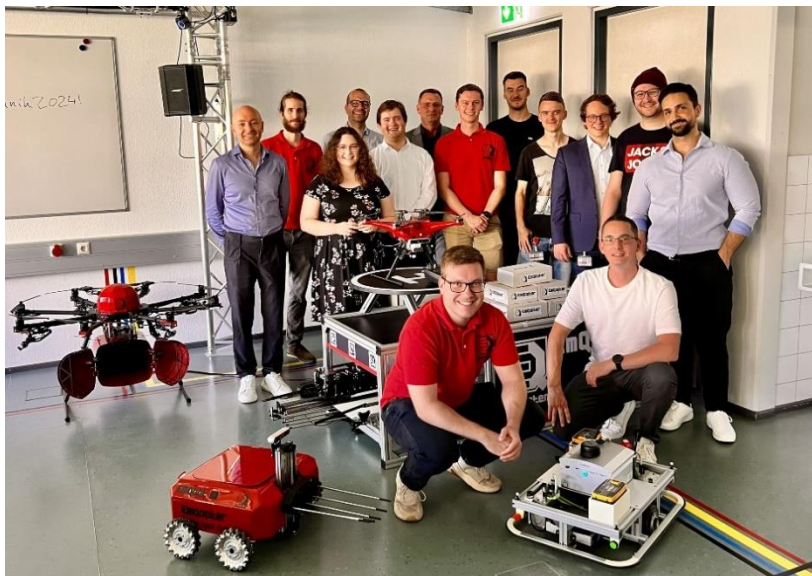


Abbildung 7 - Workshop zur Mitte der Projektlaufzeit (9.07.2024)

Am 25. November 2024 fand die vorläufige, öffentliche Abschlussveranstaltung des Projekts an der Hochschule Koblenz statt (da zum Zeitpunkt der Planung der Veranstaltung noch nicht klar war, ob eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts möglich war). Bei dieser vorläufigen Abschlussveranstaltung wurden die bisherigen Projektergebnisse durch Vorträge der einzelnen



Abbildung 8 - Gruppenbild Abschlussveranstaltung und AGVs und Drohnen

Projektpartner präsentiert. Hierbei wurden sowohl der Status des Multinetz gezeigt, als auch die CI/CD Pipeline und die Nutzung des Netzes durch das AGV.

Im April 2025 (31.3.-4.4.2025) präsentierte sich das Projekt auch auf der Hannover Messe. Hierbei wurden die Ergebnisse im Bereich DevOps bzw. CI/CD durchgehend auf dem Stand der Logicalis (ehemals Sicom) gezeigt. Hierbei wurde das Projekt durch Maximilian Dietrich vertreten, der diese Ergebnisse mittlerweile auch als Journalbeitrag im IEEE Communications Standards Magazine zur Begutachtung eingereicht hat. Außerdem wurden die Ergebnisse und deren Zusammenhang zu modernen Produktionsumgebungen auf der Industrial Wireless Stage durch Stefan Höltken und Eike Lyczkowski am 1. März 2025 vorgestellt.

Dank der gewährten kostenneutralen Projektverlängerung wurde eine zweite Abschlussveranstaltung am 16. Juni 2025 unter Teilnahme des Projektträgers und Mitarbeitern des für 5G zuständigen rheinland-pfälzischen Ministeriums für Arbeit, Soziales, Transformation und Digitalisierung (MASTD) durchgeführt. Die abschließenden Ergebnisse wurden im Rahmen der Veranstaltung vorgestellt, was insbesondere auch eine Demo umfasste, die eine Interaktion zwischen Labor-AGV und Drohne zeigt.

Neben den beiden Abschlussveranstaltungen trafen sich nach Ende der Projektlaufzeit am 16. Juli 2025 die beiden Projektpartner SEW und Hochschule Koblenz mit dem assoziierten Partner Docomo Eurolabs. Im Rahmen dieser ganztägigen Veranstaltung wurden die Projektergebnisse präsentiert, entsprechende Demonstration gezeigt und die Ergebnisse mit den ersten Arbeitspaketen der 6G Standardisierung verglichen. Hier zeigten sich erfreuliche Überschneidungen und Synergien. Ebenso zeigte sich, dass private Zellfunknetze in Japan identischen Schwierigkeiten wie auf deutscher Seite unterliegen.

Es wurden vier wissenschaftliche Veröffentlichungen publiziert:

- Tim Farnschläder, Maximilian Dietrich, Iftikhar Ahmed Saeed, Wolfgang Kiess, Eike Lyczkowski, *On the Interplay of 5G NR, WiFi and LiFi Towards 6G Multi-Connectivity* 2024 European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit), Antwerpen, Belgien,
- Konstantin Schneider, Eike Lyczkowski, Daniel Rittershofer, Wolfgang Kiess, Sebastian Treib, Maximilian Dietrich, Stefan Hoeltken, *The industrial 6G network of networks*, 2024 GLOBECOM Workshop on 6G Architecture (6GArch), Kapstadt, Südafrika
- Eray Bektas, Konstantin Schneider, Daniel Zöller, Wolfgang Kiess, Eike Lyczkowski, *NMPC Control Stability for AGVs in a multi-radio-technology wireless network*, 2025 Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Porto, Portugal
- Konstantin Schneider, Sebastian Treib, Maximilian Dietrich, Wolfgang Kiess, Eike Lyczkowski, *MultiNet6G: 5G NR, WiFi and Visible Light Communication Working As Single Network*, 2025 Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN), Bologna, Italien

Neben diesen akzeptierten Veröffentlichungen wurde (nach Projektabschluss auf Basis der Projektergebnisse) ein weiteres Paper erstellt und eingereicht:

- Maximilian Dietrich, Konrad Junkes, Markus Ammon, Sebastian Treib, Nour Ben-Kebaier, Manuel Utsch, *Software Defined 5G Campus Networks with DevOps* IEEE Communications Standards Magazine, Special Issue Future Mobile Core (submitted)

Vergleich mit ursprünglichem Zeit-, Arbeits- und Zeitplan

Die Abweichungen zur Projektende bestehen in der nicht vorliegenden Fluggenehmigung, die die Möglichkeit zum Testen und Implementieren der Interaktion zwischen AGV und Drohen deutlich einschränkt und bei der fehlenden Integration von Radar, da keine passenden Chips für Prototypen mehr verfügbar waren.

Fortschreibung des Verwertungsplans

Die Logicalis Connected befindet sich bereits in der Anbahnung von Kundenprojekten, die Ergebnisse aus dem Projekt verwerten werden.

Emqopter plant derzeit einen Drohnenport zu Demonstrationszwecken auf dem eigenen Firmengelände und wird hier die neuen Fähigkeiten im Bereich der Drahtloskommunikation integrieren.

Das bei SEW entstandene Labor-AGV wird in weiteren Forschungsprojekten genutzt werden ebenso wie die ROS2-Schnittstelle, die für die Ansteuerung genutzt wird und sich insbesondere eignet, um die Schnittstelle zwischen SEW und Forschungspartnern darzustellen. Im Bereich des Netz der Netze zeigt sich, dass eine Abstraktion oberhalb von IP möglich ist und dadurch eine zukünftig einfache Integration von Anwendungen umsetzbar.

Es werden mehrere Folgeprojekte angestrebt, an denen wechselnde Teile des Konsortiums teilnehmen wollen, wobei sich durch die derzeitige schwierige Fördersituation alle Ansätze in einer neuerlichen Konsortialfindung befinden.