

Projekt AMMCOA
Abschlussbericht



Vorhabenbezeichnung:

Verbundprojekt: Autonomous Mobile Machine Communication for Off-Road Applications
Hochzuverlässige und echtzeitfähige Vernetzung für Land- und Baumaschinen

Laufzeit des Vorhabens:

01.04.2017 bis 31.03.2020 und verlängert bis 30.09.2020

Berichtsdatum

31. Aug 2021

Projektbeteiligte



Vorgelegt beim Projektträger:

VDI/VDE Innovation + Technik GmbH

Steinplatz 1

10623 Berlin

Ansprechpartner: Dr. Dimitar Kroushkov

Vorgelegt durch:

Dr. Christian Meyne

IFAG BEX RDE RDF PSI

Infineon Technologies AG

Am Campeon 1 – 15

85579 Neubiberg

Telefon: +49 89 234-89771

E-mail: christian.meyne@infineon.com

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Der Betrieb von Bau- und Landmaschinen unterliegt besonders hohen Anforderungen an Effizienz, Präzision und Sicherheit. Automatisiertes und perspektivisch auch autonomes Arbeiten sind hierbei wichtige Konzepte, deren Umsetzung für die Zukunftsfähigkeit einschlägiger Produkte entscheidend werden kann. Der Betrieb von Bau- und Landmaschinen unterscheidet sich hierbei in verschiedenerlei Hinsicht von dem Anwendungsfeld „Autonomes und vernetztes Fahren“ im Straßenverkehr auf digitalisierten Straßen, so dass eine separate – aber koordinierte – Betrachtung dieses Anwendungsfeldes notwendig wird. Besonderheiten des Anwendungsfeldes Bau- und Landmaschinen sind unter anderem die Nichtverfügbarkeit digitalisierter Karten, die Notwendigkeit eine sehr genaue relative und absolute Lokalisierung zur Verfügung zu stellen, die sehr hohe Bedeutung von koordiniertem Einsatz von Fahrzeugflotten (mit weit über Platooning hinaus gehenden Anforderungen) und die Notwendigkeit, auch bei unzureichender Funknetzabdeckung durch Netzwerk-betreiber (oder bei nicht kooperierenden Netzwerkbetreibern) eine lokale „5G“ Kommunikationsinfrastruktur zur Verfügung zu stellen, welche autark aber auch eingebunden in Weitverkehrs-netze arbeiten kann. Letzteres ist zum Beispiel für die Erschließung von Exportmärkten eine wichtige Anforderung. Der Begriff „5G“ umfasst hier die Gesamtmenge aller zellularen Technologien also Edge, HSDPA, LTE, LTE-A und die neuen 5G Luftschnittstellen. Gleichzeitig muss jedoch die Anforderung an niedrige Latenzzeiten bei gleichzeitig hoher Zuverlässigkeit erfüllt werden, was die Verwendung von zentralisierten Netzwerk-Infrastrukturen ausschließt.

Ziel des durchgeführten Projekts:

Erforschung einer lokalen, mobil mitführbaren und infrastrukturlosen „Taktile Internet“-Vernetzungslösung, die

- die lokal dieselben Anforderungen erfüllt wie das „5G Taktile Internet“, inkl. niedriger Latenzzeiten,
- sich automatisch als Erweiterung in bestehende Weitverkehrsnetze einfügt und somit eine dynamische und bedarfsangepasste Erweiterung des 5G Netzes darstellt,
- zusätzlich integrierte hochpräzise Lokalisierungslösungen zur Verfügung stellt und
- die besonderen Anforderungen der adressierten Anwendungen unterstützt.

Die zu entwickelnde Lösung soll als bedarfsangepasste lokale Erweiterung der 5G Netze von Mobilfunkbetreibern dienen und somit nicht nur in den adressierten Anwendungsfällen sondern in allen Fällen zum Einsatz kommen, in denen schnell, gegebenenfalls zeitlich temporär und möglicher-weise unabhängig von lokalen Netzwerken eine 5G-artige Vernetzung zwischen Fahrzeugen und örtlichen platzierten Maschinen benötigt wird. Das 5G-AMMCOA Vernetzungskonzept ist somit auch eine Schlüsselkomponente für 5G-enabled Exportprodukte aller Industrieausstatter, und Fahrzeughersteller.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Aufgrund der Bekanntmachung BMBF-Ausschreibung „5G: Taktiler Internet“ im Rahmen des Förderprogramms „IKT 2020 – Forschung für Innovationen“ reichte ein 8-kopfiges Konsortium innerhalb eines 2-stufigen Verfahrens (Einreichung Projektskizze 19.02.2016 – Einreichung Vollantrag 19.09.2016) seine Projektidee „5G-AMMCOA“ beim Projektträger VDI/VDE Innovation + Technik GmbH ein. Das Projekt wurde mit einer dreijährigen Laufzeit im Bearbeitungszeitraum 01.04.2017 – 31.03.2020 genehmigt. Nach einer kostenneutralen Verlängerung um weitere sechs Monate wurden die Arbeiten zum 30.09.2020 erfolgreich abgeschlossen. Ziel des Projektes "5G-AMMCOA" war es, neben typischen landwirtschaftlichen Anwendungsfällen, Maschinenkonzepte und Einsatzszenarien für zukünftige Landmaschinen zu entwerfen und zu untersuchen. Hierzu gehören insbesondere teil- und vollautonome mobile Maschinen bzw. Maschinensysteme bis hin zu Maschinenschwärmen, die nur mit einer breitbandigen Kommunikation in Verbindung mit hochpräziser Ortung und Umfelderkennung betrieben werden können.

Als 5G im engeren Sinne wird heute die vom Industriekonsortium 3rd Generation Partnership Project (3GPP) ab Release 15 seiner Familie von Standards spezifizierte Mobilfunk-technologie verstanden. Zum Zeitpunkt des Projektbeginns befanden sich diese Standards in einer Phase der hochdynamischen Entwicklung, in der viele für die Technologie fundamentale Systemparameter festgelegt wurden. Parallel wurden international koordiniert durch nationale Regulierungsbehörden die Voraussetzungen für die Nutzung von neuen Frequenzbereichen durch drahtlose Zugangsnetze geschaffen. Eine wesentliche Neuerung stellte hierbei die Nutzung von sehr hohen Frequenzen im Millimeterwellenbereich (im physikalisch engeren Sinne korrekte Bezeichnung für Frequenzen ab 30 GHz, hier aber bereits für Frequenzen ab 24 GHz verwendet) dar, die damit erstmals Anwendung in einem großen Endkundenmarkt finden sollten. Zwar wurde bereits im Jahr 2012 der Standard IEEE 802.11ad für drahtlose

lokale Netzze (WLAN) bei 60 GHz verabschiedet, jedoch haben sich die wenigen Produkte, die ihn umsetzen, bis heute nicht auf dem Markt etablieren können. Ursächlich hierfür sind unter anderem die nach wie vor hohen technologischen Hürden, die für einen alltagstauglichen Einsatz in diesem Frequenzbereich genommen werden müssen. Im Kontext der 5G Standardisierung war zu diesem Zeitpunkt daher für die Millimeterwellentechnologie vor allem ein Einsatz als ortsfeste Breitbandzugangstechnik für die »letzte Meile« zum Kunden (Fixed Wireless Access, FWA) vorgesehen.

Die im Projekt AMMCOA betrachteten Einsatzszenarien vereinen Charakteristika verschiedener Anwendungsfälle aus den Bereichen (nicht ortsfester) industrieller Produktion und vernetztem Fahren. Sowohl der Aspekt des infrastrukturunabhängigen Inselnetzes als auch die Nutzung von Millimeterwellentechnologie für Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in Kombination mit gleichzeitiger Lokalisierung stellen Neuheitsqualitäten des verfolgten Ansatzes dar.

In diesem Sinne wurden die Anforderungen an neue Kommunikations- und Ortungsdienste und die Kommunikationsarchitektur für zukünftige Landmaschinen, Maschinensysteme und Einsatzszenarien aufgestellt. Weiterhin wurde die Schnittstellenfunktionalität für landwirtschaftliche Arbeitsmaschinen für eine breitbandige und permanente Kommunikation des Maschinen- und Infrastruktursystems definiert und anschließend die entwickelten 5G-Architekturkomponenten auf entsprechende Landmaschinen oder Funktionsträger implementiert. Ferner konnte eine neuartige Methodik zur präzisen Evaluierung der Eigenschaften des im Projekt entstandenen Systems unter realen Bedingungen entwickelt werden. Die Einsetzbarkeit der neuen Kommunikations- und Ortungsdienste wurde evaluiert und experimentell verifiziert.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Dem Anspruch einer umfassenden Betrachtung innovativer Anwendungsfälle im Gesamtsystem wurde das Projekt AMMCOA durch ein Projektkonsortium gerecht, dessen Partner komplementäre Kompetenzen aus den Bereichen autonome Arbeitsmaschinen und Vernetzung zusammenbrachten. Insgesamt setzte sich das Konsortium aus drei Industrieunternehmen, drei kleinen und mittleren Unternehmen, einer Universität und einer Forschungseinrichtung zusammen. Im Einzelnen waren am Projekt beteiligt:

- BOMAG GmbH
- Core Network Dynamics GmbH

- Fraunhofer Institut für Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut, HHI
- Infineon Technologies AG
- John Deere GmbH & Co. KG
- Robot Makers GmbH
- Sensor-Technik Wiedemann GmbH
- Technische Universität Kaiserslautern (Lehrstühle WICON & RRLab)

Die Arbeiten des Projektes wurden in sieben Arbeitspakete aufgeteilt. Das Zusammenspiel der Arbeitspakete ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

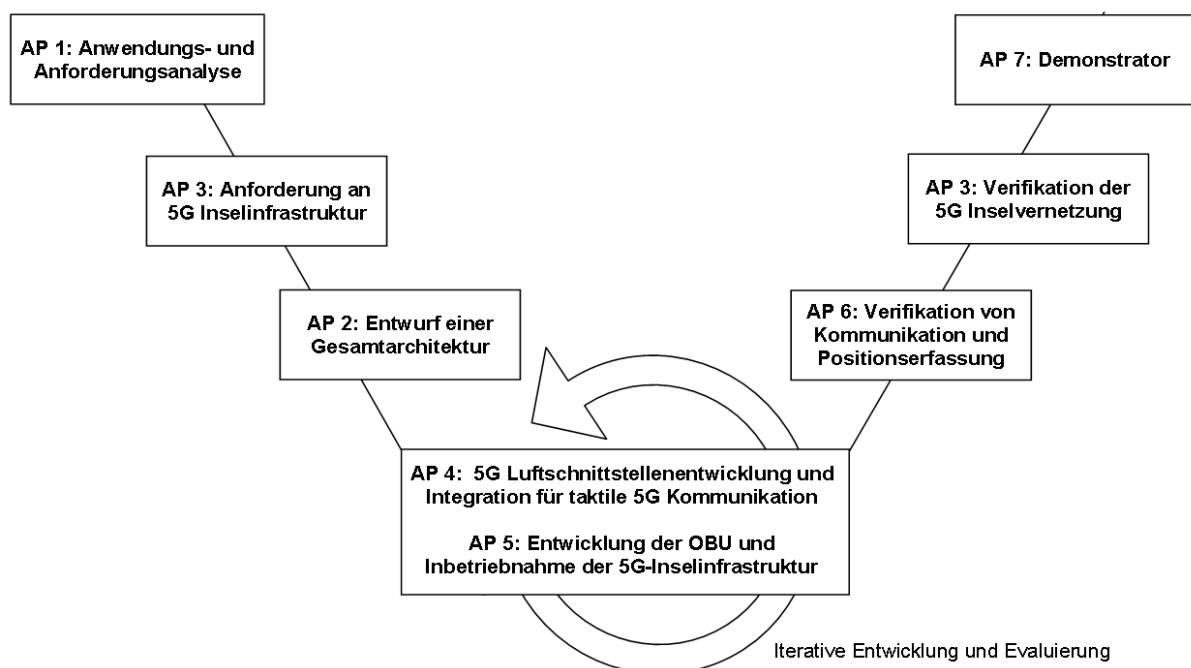


Abbildung 1: Darstellung der Arbeitspakete im Gesamtprojekt

Im Laufe des Projekts fanden sieben große Konsortialtreffen sowie zahlreiche zusätzlich Treffen statt. Die zusätzlichen Treffen fanden bilateral oder innerhalb der Untergruppen statt, insbesondere in der Phase der Implementierung.

Der kommunikationstechnische Aspekt des Projektes wurde abgedeckt durch die Partner HHI für die Realisierung der Funkschnittstellen und Erfassung der Lokalisierungsbeobachtungsgrößen, Infineon Technologies für die Millimeterwellen-Halbleitertechnologie, Core Network Dynamics für Mobilfunkkernnetztechnik und WICON für das 5G Inselkonzept und Lokalisierung. Die Anwendungspartner BOMAG für das Straßenbauszenario und John Deere für das Getreideernteszenario wurden bei der Umsetzung der Autonomie unterstützt durch robot makers und RRLab. Sensor-Technik

Wiedemann als Elektronikzulieferer für mobile Arbeitsmaschinen bildete die Schnittstelle für diese beiden Teile des Konsortiums.

	Jahr 1				Jahr 2				Jahr 3			
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
AP 0: Management und Liaisons, Zusammenarbeit mit anderen Projekten												
a. Management des Projektes (Kontakt zu BMBF und Projektträger, Organisation der Workshops und Telefonkonferenzen, des Projekt-Wikis und der -homepage, Editierung von White-Papern, usw.)												
b. Liaisons zu externen Stakeholdern (z.B. Industrieforen)												
c. Kooperation mit anderen Projekten												
AP 1: Anwendungs- und Anforderungsanalyse aus relevanten Anwendungsfällen												
a. Identifikation, Analyse und Klassifikation relevanter Anwendungsfälle und möglicher Automatisierungsansätze												
b. Spezifikation der Anwendungsanforderungen und resultierenden Fähigkeitsanforderungen an die Vernetzung												
c. Clustering und Spezifikation der notwendigen Netzwerkfunktionalitäten und –performanz												
d. Spezifikation einer Methodik zur Validierung der Projektergebnisse, Definition quantitativer KPIs												
e. Spezifikation des Demonstrator-Szenarios												
AP 2: Entwurf eines Gesamtarchitekturmodells												
a. Analyse bereits definierter Architekturmodelle, Funktionalitäten und „Quality of Service“ Konzepte für Industrie 4.0 und 5G												
b. Identifikation der Funktionalitäten sowie zusätzlicher Funktionen und Schnittstellen sowie Abschätzung der benötigten Performanz												
c. Spezifikation eines Gesamtarchitekturmodells für die infrastrukturloses 5G-Kommunikation und Positionierung												
d. Spezifikation der benötigten Schnittstellen und neuartigen Funktionalitäten												
AP 3: Infrastrukturlose 5G Inseln												
a. Entwicklung und Spezifikation eines 5G Insel Konzepts mit Identifikation aller benötigten Netzwerkfunktionen												
b. Dienstperspektive - Entwicklung der Netzwerkfunktionen und des Plattformkonzepts, die für die AMM-COA spezifische Dienstunterstützung benötigt werden (inkl. Dienste-Terminierung in 5G Inseln)												
c. Netzwerkperspektive – Entwicklung und Spezifikation der Netzwerkfunktionen und Algorithmen (außer AI, RRM und Lokalisierung), die für die Konfiguration, die autonome Kontrolle, die dynamische Rekonfiguration und das Management der Vernetzung benötigt werden.												
d. Entwicklung und Spezifikation der Netzwerkfunktionen und Schnittstellen, die für die Einbindung in (5G) Weitverkehrsnetze und Network Slicing benötigt werden												
AP 4: 5G Luftschnittstellenentwicklung und Integration für taktile 5G Kommunikation												
a. Evaluierung schon diskutierter 5G Luftschnittstellenvarianten												
b. Entwicklung und Integration einer Luftschnittstellenvariante für große Abdeckung												
c. Entwicklung und Integration einer Luftschnittstellenvariante für taktile Kommunikation, hohe Datenrate und Lokalisierung												
d. Dynamische Konfiguration, Radio Resource Management												
AP 5: Entwicklung der OBU und Inbetriebnahme der infrastrukturlosen 5G-Insel												
a. Abgleich der HW-Anforderungen und des OBU-Designs												
b. Umsetzung in eine konkrete Funktionsmuster-Hardware												
c. Grundsätzliche Inbetriebnahme und Test der internen / externen Schnittstellen												
d. Integration der Algorithmen für Kommunikation und Positionserfassung												
e. Grundlegende Inbetriebnahme der infrastrukturlosen 5G-Insel												
AP 6: Verifikation der Performance von Kommunikation und Positionserfassung												
a. Umsetzung der definierten Testaufbaus für die taktile Kommunikation (Testsoftware)												
b. Durchführung der Tests und Auswertung der Tests der Kommunikation mit Optimierungsschleifen												
c. Umsetzung des definierten Testaufbaus zur Positionserfassung (Referenzsystem)												
d. Durchführung der Tests und Auswertung der Test der Positionserfassung mit Optimierungsschleifen												
AP 7: Demonstrator für das autonome, vernetzte, kooperative Arbeiten												
a. Implementation einer Simulationsumgebung für die Entwicklung autonomer mobiler Nutzfahrzeuge												
b. Schaffung der Voraussetzungen für eine Autonomie an der Maschine												
c. Erforschung und Implementation der konkreten Autonomie für den Anwendungsfall												
d. Durchführung der Demonstration und abschließende Evaluation												

Abbildung 2: Ablaufplan des Gesamtprojekts

Das Projekt AMMCOA war im Laufe seiner Laufzeit geprägt durch, zum einen den sehr guten Fortschritt in der Erstellung der Hard- und Software, und zum anderen durch die Auswirkungen des Wegfalls von CND als Partner im Konsortium. Insbesondere Letzterer erzwang eine Neuplanung der benötigten Arbeitspakete, sowie die Anpassung des Projektzeitplans. So mussten die Aufgaben von CND bewertet und auf einzelne Partner verteilt werden. Unter Verzicht auf den wissenschaftlichen Anteil der Arbeiten von CND wurden die verbleibenden und für den Projekterfolg unbedingt notwendigen Arbeitspakete dann fremdvergeben. Diese

Anpassungen fanden dabei in enger Abstimmung mit dem Projektträger statt. Die Änderungen im Zeit- und Arbeitsplan machten eine Verlängerung der Gesamtprojektlaufzeit um 6 Monate bis zum 30.09.2020 nötig. Die verbliebene Arbeitspakete AP4, 5, 6 und AP7 wurden bis zum Projektende (Projektmonat 42) verlängert und die Meilensteine M3 und M4 in den Berichtszeitraum 2020 verschoben. Die entsprechenden Verlängerungsanträge wurden von allen Projektpartnern im Dezember 2019 gestellt und durch das Ministerium genehmigt.

Das Gesamtprojekt lag nach der Anpassung der Projektlaufzeit wieder gut im Plan. Die kritischen Herausforderungen durch den Wegfall von CND wurden gemeinschaftlich im Konsortium konstruktiv bearbeitet und gelöst. Hieran hat auch die vertrauensvolle Unterstützung durch den Projektträger einen maßgeblichen Anteil.

Für das Teilvorhaben der Infineon Technologies AG lagen die Schwerpunkte auf folgenden Arbeiten:

- Konzeption eines mmW Frontend inklusive neuartigem Transceiver im Gesamtsystem
- Design und Verifikation eines mmW Transceiver für Kommunikation und Lokalisierung
- Entwurf eines RF Frontend PCB für Kommunikation und Lokalisierung
- Entwurf einer Test Umgebung mit PC GUI und Mikrokontroller zum Test und Verifikation aller Transceiver Funktionen
- mmW Package Design für den Transceiver
- Inbetriebnahme und Integration des RF Frontend mit integriertem Transceiver in das Gesamtsystem sowie dessen Verifikation im finalen Demonstrator

1.4 Stand der Wissenschaft und Technik

Für die im Rahmen dieses Projekts fokussierten Anwendungsszenarien waren auf dem Markt bereits vereinzelte Lösungen zur Kommunikation und Lokalisierung verfügbar. Vermehrt werden dabei Applikationen auf Smartphones und Tablets zum Einsatz kommen, z.B. zur Ad hoc Wartung von Landmaschinen [1]. Produkte wie das AFS Connect [2] erlauben die Steuerung ganzer Farmbetriebe per Tablet, sind jedoch vollständig auf die Verbindung zu einem GSM Netzwerk angewiesen, welches in ländlichen Gegenden (z.B. in den USA) nicht immer verfügbar ist. Systeme wie Vehicle Sync von Trimble [3] ermöglichen Landmaschinen den drahtlosen Austausch von Daten wie Standort, Geschwindigkeit, Führungslinien, Karten, Ertrag- und Tankdaten etc. Diese Systeme sind aktuell auf maximal 6 Fahrzeuge beschränkt und haben bei direkter Sichtverbindung zwischen den Fahrzeugen eine Reichweite von

maximal 300 m. Satellitenbasierte Lokalisierungssysteme mit Genauigkeiten im dm-Bereich sind bereits verfügbar, in Echtzeit und ohne lokale Basisstationen oder telemetrische Verbindungen (zus. geostationäre Satelliten für Korrekturwert-Broadcast sind jedoch notwendig) [4]. Im Bereich der Baumaschinen, wie z.B. Straßenfertiger ist jedoch die erreichbare Genauigkeit mit GPS nicht ausreichend und zu ungenau, da dort Werte im Millimeterbereich gefordert sind [5]. Im Bereich der Landmaschinen werden Sensorsysteme basierend auf Ultraschall, Laser, Infrarot oder 3D-Kameras eingesetzt, um beispielsweise einen Häcksler während des Überladens auf einem nebenherfahrenden Wagen abzustimmen.

Die steigende Anzahl an Sensoren und computergesteuerter Systeme in Land- und Baumaschinen wird zukünftig den Bedarf an hohen Datenraten steigern. Die bestehende Netzinfrastruktur ist außerhalb von Ballungsgebieten dafür nicht ausreichend performant [6] und kann nur teilweise mit speziellen Datenkompressionsmethoden und schmalbandiger Kommunikation bewältigt werden. Im Projekt AMMCOA war daher die Errichtung eines lokalen und mobilen Kommunikationsnetzes mit hoher Bandbreite auf Basis von mmW Funkkommunikation mit niedriger Latenz und sehr hohen Datenraten über einige Hundert Meter bei Sichtverbindung geplant. Weiterreichende Funkkommunikation über einige Kilometer und bei Abschattungen wurden mit lokal mitgeführten ad hoc Funkkommunikationsmodulen im Frequenzbereich unter 1 GHz realisiert.

Neben der Kommunikation bieten Millimeterwellen zudem die Möglichkeit den Abstand zwischen Fahrzeugen oder zwischen Fahrzeugen und Referenzpunkten zu ermitteln. Komplementär und redundant zur bestehenden Lokalisierungssensorik am Fahrzeug kann durch Datenfusion die Zuverlässigkeit der Positionsdaten und somit die Sicherheit erhöht werden. Zudem gibt es Untersuchungen zur Nutzung von bildgebendem Millimeterwellen-Radar für Precision Farming-Anwendungen [7].

Im Bereich der OBU wurden im Forschungsbereich zu Projektstart applikationsspezifische Speziallösungen aufgebaut und für Testzwecke eingesetzt. Ein Beispiel ist das „Digitale Testfeld Autobahn“ A9, wo die Partner Continental, die Deutsche Telekom AG, das Fraunhofer ESK sowie Nokia Networks die Echtzeitkommunikation zwischen Fahrzeugen über das LTE-Mobilfunknetz demonstrierten. Hier befindet sich an Bord der Testfahrzeuge eine On-Board-Unit, die mit den Fahrzeugsystemen verbunden ist und über ein Funkmodul mit dem LTE-Netz kommuniziert. Dies ist jedoch nicht vergleichbar mit der Anwendungsbandbreite und universellen Einsetzbarkeit, der im Projekt AMMCOA zu realisierenden OBU.

Ein großflächiger kommerzieller Einsatz von OBUs im Mobilitätsbereich hat sich bislang nicht durchgesetzt, wenn auch OBUs mit applikationsspezifischen Funktionalitäten, beispielsweise für das Mautsystem Toll Collect oder den Bereich kommunaler Nutzfahrzeuge schon lange bekannt sind. Keine der bestehenden Lösungen bildete die Projektziele von STW in seinen Eigenschaften nur näherungsweise ab.

Der Stand der Wissenschaft war in starker Weise von den Projektbeteiligten Forschungsinstituten geprägt.

Im Projekt iGreen (Laufzeit 2009-2013) wurden standortbezogenen Dienste- und Wissensnetzwerke zur Verknüpfung verteilter, heterogener, öffentlicher, wie auch privater Informationsquellen erarbeitet, also einer Datendrehscheibe (Cloud) mit einheitlichen Schnittstellen und Datenformaten [9].

Im Bereich infrastrukturlose 5G Inseln wird die TU Kaiserslautern Ihre Expertise im Bereich D2D-Kommunikation, die sie in den EU-Projekten METIS; METIS II, 5G Norma und Selfnet erlangt hat, ins Projekt einbringen. Im Bereich Luftschnittstellenentwicklung wird die TU Kaiserslautern Ihre Erfahrungen aus der Entwicklung neuartiger industrieller Funklösungen einbringen, die in den BMBF-Projekten SBDist, HiFlecs und Prowilan erlangt wurden.

Vorarbeiten des Fraunhofer HHI in den EU-Projekten METIS, 5GNOW, Fantastic5G und dem BMBF Projekt Kol zum Design neuartiger Rahmenstrukturen und Wellenformen zur Unterstützung spezifischer Systemanforderungen werden Grundlage und Ausgangspunkt für die Luftschnittstellendefinition mit eingebetteter Lokalisierungsfunktionalität sein. Der Aspekt der 5G Inselösungen kann mit Erfahrungen aus dem EU Projekt ABSOLUTE komplementiert werden, wo leistungsstarke Kommunikationsinseln auf Basis von 4G mit Helium-Ballons für die Notfallkommunikation in Katastrophenszenarien entwickelt wurden. Umfangreiche Erfahrungen zum System- und Modul-Design aus den Projekten MiWEBA [10-11], mmMAGIC und 5G-Crosshaul [12] lassen die Entwicklung neuartiger Millimeterwellen-Kommunikationslösungen zwischen mobilen Maschinen zu. Die für das Projekt AMMCOA relevante Expertise in der Fahrzeug-zu-Fahrzeug ad hoc Funkkommunikation und Kanalmodellierung wurde im BMWi Projektcluster KoFAS aufgebaut und bildet die Grundlage für eine simulative Systembewertung der entwickelten Komponenten im Projekt. Das HHI verfügt über einen eigenen breitbandigen Channel-Sounder für das Spektrum von 400 MHz bis 95 GHz. Zudem unterstützt das HHI aktiv IEEE 802.11p Plugtests mit Referenzmodellen in Funkkanalemulatoren und leistet seit Jahren aktive Beiträge in der 3GPP Standardisierung zur Funkmodellierung in neuen Frequenzbereichen und Anwendungsszenarien.

Im Bereich der Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation gab es bereits verschiedene Forschungsprojekte, wie z.B. FleetNet, KoFAS, NOW, SIM-TD, CONVERGE und andere, deren Fokus lag i.d.R. auf Aspekten der grundsätzlichen Vernetzung von Fahrzeugen im ad hoc Modus und den Austausch und die Distribution von Event-Messages im Fahrzeugumfeld. Eine dedizierte niederlatente und hochzuverlässige Kommunikation zwischen einzelnen Fahrzeugen zur kollaborativen Interaktion war zum Zeitpunkt der Untersuchungen technisch nicht realistisch.

Referenzen

- [1] Alcalá, Felix, and Matthias Rothmund. "Kabellose AdHoc-Wartung von Landmaschinen per Smartphone." GI-Jahrestagung. 2013.
- [2] <http://www.caseih.com/northamerica/en-us/products/advanced-farming-systems/afs-connect>
- [3] <http://www.trimble.com/Agriculture/vehicle-sync.aspx>
- [4] <http://www.omnistar.com/SubscriptionServices/OmniSTARHP.aspx>
- [5] Meyer, Henning. "Systeme zur leitdrahtlosen Nivellierung von Straßenfertigern." (2002).
- [6] Alcalá, Felix, and Johann Lecker. "Mobiles Internet auf dem Ackerschlag: Analyse empirischer Langzeitdaten." GIL Jahrestagung. 2012.
- [7] Essen, H., et al. "Polarimetric millimetre wave SAR for precision farming applications." Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2010.
- [8] Bauer, Wilhelm, et al. "Industrie 4.0–Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland." Studie. Hg. v. Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien eV (BITKOM) und Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO). Abgerufen am 11.05. 2014, unter http://www.bitkom.org/files/documents/Studie_Industrie_4.0.pdf (2014).
- [9] <http://www.igreen-projekt.de/>
- [10] K. Sakaguchi, G.K.Tran, H.Shimodaira, S.Nanba, T. Sakurai, K. Takinami, I. Siaud, E. C.Strinati, A. Capone, I. Karls, R. Arefi, T. Haustein; Millimeter-wave evolution for 5G cellular networks; IEICE Transactions on Communications 2015, pag-es 388-402,
- [11] R.J. Weiler, W. Keusgen, M. Peter, I. Filippini, V. Sciancalepore, T. Haustein; Millimeter-Wave Small-Cell Deployment Scenarios as an Enabler for 5G Applications and Use Cases; 2015
- [12] A. de la Oliva, X. Costa Perez, A. Azcorra, A. Di Giglio, F. Cavaliere, D. Tiegelbekkers, J. Lessmann, T. Haustein, A. Mourad, P. Iovanna; Xhaul: toward an integrated fronthaul/backhaul architecture in 5G networks; IEEE Wireless Communications, 2015

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die sehr gute Zusammenarbeit des acht Partner umfassenden-köpfigen Konsortiums, bestehend aus unserem Konsortialführer Infineon Technologies AG, BOMAG GmbH, Core Network Dynamics GmbH, Fraunhofer HHI, John Deere GmbH & Co. KG, Robot Makers GmbH, TU Kaiserslautern & Sensor-Technik Wiedemann, fand in regelmäßigen Telefonkonferenzen, bilateralen arbeitsplanabhängigen Gesprächen und den großen Konsortialtreffen statt, zu denen der Projektträger eingeladen wurde. Die gute Zusammenarbeit mit unserem fachlich zuständigen Kontakt des Projektträgers, Dimitar Kroushkov & Constanze Bohla wissen wir zu schätzen und bedanken uns sehr für die jahrelange gute Zusammenarbeit.

2 Ergebnisbericht Eingehende Darstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse

2.1.1 AP1 Anwendungs- und Anforderungsanalyse aus relevanten Anwendungsfällen

Im Projekt AMMCOA wurden die erarbeiteten und erforschten Hard- und Softwarelösungen anhand von zwei unterschiedlichen Anwendungsfällen getestet und analysiert. Die beiden Anwendungsfälle sind:

- beim Partner BOMAG: kooperierende Asphaltwalzen im Straßenbau
- beim Partner John Deere: Anwendungen in der Landwirtschaft

Beide Anwendungen wurden im Projekt analysiert und daraus die Anforderungen für die Systeme definiert.

2.1.1.1 Anwendungen bei BOMAG:

Anwendungsfall: Kooperierende Asphaltwalzen im Straßenbau

Bereits vor dem Forschungsprojekt gab es Veröffentlichungen von BOMAG über den korrekten Einsatz von Tandemwalzen aus Anwendersicht. Diese für den menschlichen Anwender konzipierten Anleitungen wurden als Teil der Grundlage für die Spezifikation des Anwendungsszenarios und des gewünschten Maschinenverhaltens genutzt.

Als Anwendungsfall wurde der Einbau von Asphalt mit einem Fertiger und mehreren Tandemwalzen gewählt. Der Fertiger legt die Asphaltspur aus und mehrere Tandemwalzen kooperieren, um die Asphaltsschicht zu verdichten.

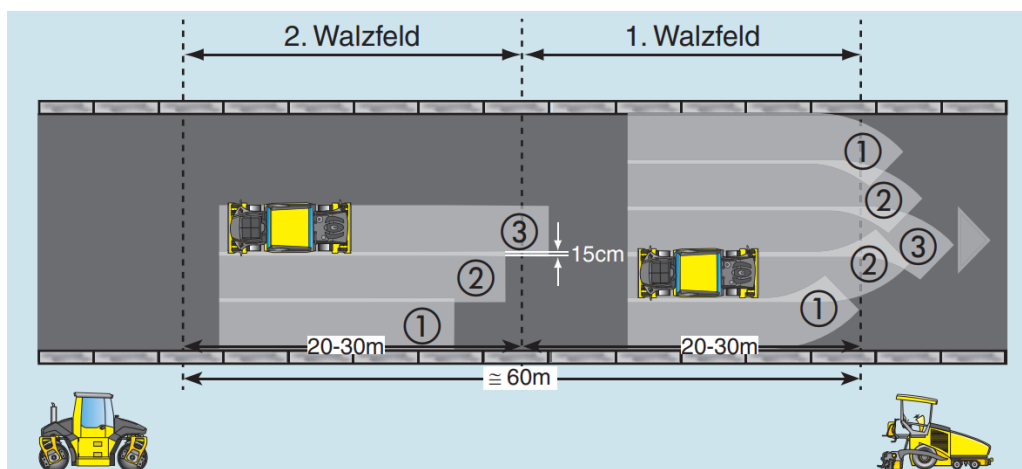


Abbildung 3: Walzschema im Asphaltbau

Die Walzen fahren, dem Einbau folgend, in Bahnen, Reversieren und Fahren dieselbe Bahn zurück. Sie bewegen sich mit maximal 7 km/h während der Verdichtungsarbeit mit Vibration. Bei statischer Verdichtung, wie sie beim Bügeln praktiziert wird, sind auch Geschwindigkeiten bis 10 km/h möglich. Am hinteren Ende der Bahn wird die Maschine um etwas weniger als eine Maschinenbreite zur Seite versetzt und der Vorgang wiederholt, bis eine Vorgabe (z.B. die Anzahl der Überfahrten oder ein Ziel-Messwert) erreicht ist. Dann fährt die Walze vor und bearbeitet den nächsten Abschnitt (das nächste Walzfeld).

Drei konkrete Szenarien für die Autonomie

Im Rahmen dieses Anwendungsfalls wurden drei Szenarien identifiziert, die autonom umgesetzt werden sollten:

1. Die **autonome Rückwärtsfahrt** ist ein geeignetes Szenario, um die Grundlagen der Automatisierung einer einzelnen Walze zu demonstrieren, ohne auf Kommunikation oder Interaktion mit anderen Teilnehmern angewiesen zu sein. Hierbei fährt der Walzenfahrer seine Bahn vorwärts, verzögert und schaltet die Vibration aus. Er drückt die Autonomietaste und führt den Fahrhebel mit gedrückter Taste über die Nullstellung in Rückwärtsrichtung. Dann übernimmt die Autonomie die Kontrolle und fährt die Spur rückwärts.
2. Die **autonome Hauptverdichtung** diene als Demonstrator-Szenario und nutzt alle angestrebten Kommunikationsmöglichkeiten. Der Fertiger stellt die Information der tatsächlich eingebauten Straße zur Verfügung. Diese Information wird während der laufenden Baustelle inkrementell erweitert, so dass stets eine Repräsentation des aktuell eingebauten Asphalts als Grundlage für die Planung existiert. Die Walzen planen darauf aufbauend ein Walzschema, teilen sich die Aufgaben auf und fahren das Schema ab.
3. Das **autonome Kantenandrücken** war ein optionales Szenario, welches einen hohen Grad an Genauigkeit in der Positionierung über einen längeren Zeitraum erfordert. Der Walzenfahrer bringt die Walze in eine Position, so dass sich das KSG (Kanten-Schneide-Gerät) über der Asphaltkante befindet. Die Autonomie übernimmt ab hier die Maschine und fährt mit dem gesenkten KSG eine vorgegebene Strecke/Kurve ab. Die Vorgabe kann beispielsweise vom Fertiger kommen oder aus der optischen Auswertung der vorliegenden Kante.

Anforderungsdefinition

Zur Erarbeitung der Anforderungen an die im Gesamtprojekt entwickelte 5G Komponente wurden ausgehend von den Anwendungen im Straßenbau Anforderungen an die Autonomie einer Tandemwalze und an die Kommunikationseinheit abgeleitet.

Anforderungen an autonome Tandemwalzen

Um die Anforderungen an die Arbeit der Walzen weiter zu präzisieren, wurden Interviews mit Experten aus dem Bereich Asphaltbau geführt. Die Fragen waren in drei Bereiche unterteilt, sie bezogen sich auf

- Rollen auf der Asphaltbaustelle,
- Aufgaben des Walzenfahrers und
- das Umfeld des Walzenfahrers.

Aus den Ergebnissen der Befragungen konnten Anforderungen abgeleitet werden, die bei der Umsetzung der Autonomie berücksichtigt werden müssen. Diese Anforderungen betreffen die Bereiche

- Kinematik der Maschine,
- Planung und Durchführung des Prozesses,
- HMI (Maschine zu Externen) und
- HMI (Maschine zum Fahrer).

Anforderungen an die Vernetzungskomponente

Neben der sehr detaillierten Beschreibung der Arbeit der Tandemwalzen bei der Hauptverdichtung wurde außerdem der gesamte Prozess des Asphalteinbaus mit allen beteiligten Rollen beschrieben. Die Rollen wurden unterteilt in

- Maschinen (z.B. Fertiger, Walzen),
- Personen (z.B. Labormitarbeiter, Bauleitung)
- Gebäude (z.B. Mischwerke) und
- Datenverwendung (z.B. FDVK, Logistik, Autonomie).

		Beschicker	Fertiger	Hauptverdichtung 1	Hauptverdichtung 2	Nachverdichtung 1	Nachverdichtung 2	Walze beim Tankwagen	LKW 1	LKW 2	Lieferscheine	Messungen	Bauleitung	Maschinenführer Walze/Fertiger	Mischwerk 1	Mischwerk 2	Autonomie (Haupt-) Verdichtung	FDVK	Logistik	
Maschinen	Beschicker	2																		
	Fertiger	2	3	3	3	3	3	0	0	0	2	0	0	0	0	0	3	2	2	
	Hauptverdichtung 1	0	3		3	3	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	
	Hauptverdichtung 2	0	3	3		3	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	
	Nachverdichtung 1	0	3	3	3		3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	
	Nachverdichtung 2	0	3	3	3	3		1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	
	Walze beim Tankwagen	0	0	1	1	1	1		0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	
	LKW 1	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2
	LKW 2	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	1	1	0	0	2
Personen	Lieferscheine	2	2	0	0	0	0	0	0	0		0	2	0	2	2	0	0	2	
	Messungen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		2	2	0	0	0	2	0	
	Bauleitung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2		2	0	0	2	2	2	
	Maschinenführer Walze/Fertiger	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	2	2	0	
Gebäude	Mischwerk 1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0		2	0	0	2	
	Mischwerk 2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	2		0	0	2	
Datenverwendung	Autonomie (Haupt-)Verdichtung	3	3	3	3	3	3	1	0	0	0	0	2	2	0	0			0	
	FDVK	0	2	2	2	2	2	2	0	0	0	2	2	2	0	0	0		0	
	Logistik	2	2	0	0	0	0	0	2	2	2	0	2	0	2	2	0		0	

Abbildung 4: Kommunikationsmatrix einer Asphaltbaustelle mit groben Kommunikationsanforderungen. 0: keine Kommunikation; 1: geringe Datenrate; 2: mittlere Datenrate; 3: hohe Datenrate. Die grün markierten Zellen wurden für das Demonstrator-Szenario berücksichtigt.

Aus der Liste aller Rollen auf der Asphaltbaustelle wurde eine Kommunikationsmatrix aufgestellt (Abbildung 4), die darstellt, welche Rollen miteinander kommunizieren. Aus diesen einzelnen Kommunikationswegen wurden die Anforderungen an die Kommunikation in Bezug auf Bandbreite, Latenz und Distanz der Kommunikationspartner abgeleitet, welche schlussendlich die Grundlage der Anforderungen an die zu implementierende Kommunikationseinheit in Form einer 5G-On-Board-Unit bildeten.

2.1.1.2 Anwendungen bei John Deere:

Im Bereich Systementwurf – also bei Identifikation, Analyse und Klassifikation relevanter Anwendungsfälle und möglicher Autonomisierungsansätze - entwickelte und untersuchte John Deere Maschinenkonzepte und Einsatzszenarien für zukünftige Landmaschinen. Hierzu gehören insbesondere teilautonome und autonome mobile Maschinen bzw. Maschinensysteme bis hin zu Maschinenschwärmen, die nur mit einer breitbandigen

Kommunikation in Verbindung mit hochpräziser Ortung und Umfelderkennung betrieben werden können.

Die Anforderungen Maschinenkonzepte und Einsatzszenarien für zukünftige Landmaschinen wurden hinsichtlich Positionsgenauigkeit, zeitlicher Auflösung und Bandbreite der Ortungsdienste, sowie der Bandbreite der Kommunikation für die verschiedenen landtechnischen Applikationen abgeleitet und in Verbindung mit einer Machbarkeitsstudie als Applikationsspezifikation für Landmaschinen dokumentiert. Die daraus resultierenden notwendigen Netzwerkfunktionalitäten und die entsprechende Netzperformanz wurden geclustert und spezifiziert, die erforderlichen Bandbreiten und die Anforderungen an deterministische Kommunikation wurde definiert.

Folgenden fünf Szenarien stehen als typisch und relevant eingestufte Anwendungsfälle im Fokus:

- Lokalisierung auf dem Feld (1 Maschine soll auf parallelen Fahrspuren mit dem Abstand der Arbeitsbreite ein Feld bearbeiten; betrifft Lokalisierung)
- Koordiniertes Fahren (2 Maschinen fahren nebeneinander auf einer parallelen Spur; betrifft Kommunikation und Lokalisierung)
- Echtzeitfähige Kommunikation (insbesondere für Anwendungsfall Koordiniertes Fahren; betrifft Kommunikation)
- Datenübertragung (auf Maschine werden während der Arbeitsausführung erzeugte Daten erzeugt und gegebenenfalls gespeichert; Die Daten sollen möglichst kontinuierlich und unterbrechungsfrei drahtlos übertragen und in Cloudsystemen gespeichert werden; betrifft Kommunikation)
- Anwendungsfall Logistik (Teilnehmer: 8 Traktoren, 8 Anhänger, 1 Feldhäcksler, 1 Tablet / Handy; betrifft Lokalisierung und Kommunikation)

In den John Deere Anwendungsfällen wurden insgesamt drei Maschinenkonzepte und fünf Einsatzszenarien für zukünftige Landmaschinen entwickelt und untersucht. Vier Einsatzszenarien betreffen den Kommunikationsaspekt und drei Einsatzszenarien wurden hinsichtlich Ortung festgelegt. Weiter wurden die erforderliche Genauigkeit, Auflösung und Bandbreite der Ortungsdienste sowie der Bandbreite der Kommunikation für verschiedene landtechnische Applikationen ermittelt. Dabei wurden vorrangig Anforderungen für zukünftige Maschinensysteme und Einsatzszenarien zukünftiger autonomer Landmaschinen berücksichtigt. Die Ergebnisse sind nachfolgend in Tabelle 1 und Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 1 - Lokalisierung:

Genauigkeit	Applikation
10 m	<ul style="list-style-type: none"> - Logistik, Position bzw. Standort der Fahrzeuge und Anbaugeräte - Dokumentation
1 m	<ul style="list-style-type: none"> - Lenkunterstützung bei Arbeitsbreiten >30 m, z.B. Düngerstreuen
10 cm	<ul style="list-style-type: none"> - Automatisierte Lenkung für Arbeitsbreiten von 3-15 m (Bodenbearbeitung, Ernte) - Automatisierte Parallelfahrt von Fahrzeugen - Auffinden von Ackergrenzen
1 cm	<ul style="list-style-type: none"> - Bearbeitung von Reihenkulturen mit Reihenabstand von 10 bis 100 cm
1 mm	<ul style="list-style-type: none"> - Bearbeitung von Einzelpflanzen, z.B. Hacken zum Entfernen von Unkraut

Tabelle 2 - Kommunikation:

Auflösung / Bandbreite	Applikation
250 kbit/s	<ul style="list-style-type: none"> - ISOBUS (CAN-Bus) zu Anbaugeräten: Automatisierung, Dokumentation - Maschinenzustand für Service und Support
100 Mbit/s	<ul style="list-style-type: none"> - Kamerabilder - Anbindung an Infrastruktur (Internet) - Real-time Ethernet für Automatisierung (Servoanwendungen, verteiltes Sensornetzwerk) - Sicherheitsrelevante Kommunikation zur Remotesteuerung des Fahrzeuges - Übertragen von Korrekturdaten für GPS-Systeme - Modulare selbstfahrende Arbeitsmaschine als Teil eines Verbundes; Anbindung des Bordnetzes an übergeordnete Steuerung - Datentransfer zur Dokumentation komplexer agronomischer Daten und Arbeitsaufträge - Software-Updates
1 Gbit/s	<ul style="list-style-type: none"> - High resolution cameras - 3D field mapping

Ebenso fand im Projekt die Definition der erforderlichen Bandbreite und der Anforderung an deterministische Kommunikation statt. Maßgebend sind hier in Zukunft sicherheitstechnische

Anforderungen, die aus dem Betrieb von Flotten autonomer oder teilautonomer Maschinen, sog. Maschinenschwärme, entstehen. Es ist davon auszugehen, dass ein Nothalt aller Maschinen eines Schwarms innerhalb von 200 ms sichergestellt sein muss.

Für die gewünschte relative Genauigkeit der Positionsmessung wurden +/- 2 mm und eine absolute Genauigkeit von +/- 3 cm als Grundlage der Arbeiten angenommen. Das Ziel war dabei, langfristig eine hochpräzise Aktuatorik mit einer Low-Cost Positionierung zu realisieren. Eine entsprechend hohe Messgüte konnte im weiteren Verlauf des Projektes nicht realisiert werden. Das ursprüngliche Ziel wurde somit zwar nicht bzw. nur eingeschränkt erreicht, allerdings lassen die im Projekt entworfenen Referenzmesssysteme eine Verbesserung der Positioniergenauigkeit von RTK (Real Time Kinematics) zu. Dies trifft insbesondere auf die kamerabasierte Lösung in Verbindung mit 5G-Konnektivität zu.

Abschließend wurde das Demonstrator-Szenario festgelegt, das in Abbildung 5 dargestellt ist.

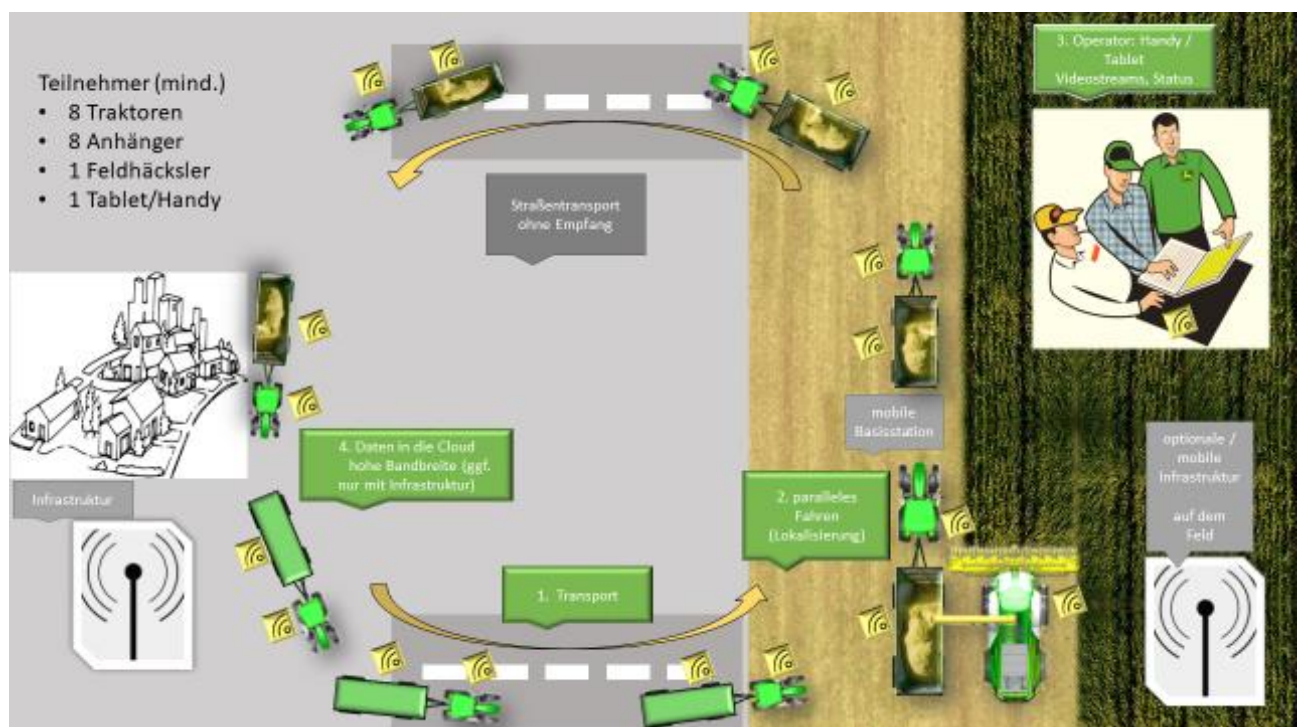


Abbildung 5: Use-Case für Demonstrator: Feldhäckselkette (hier Mais-Ernte)

Auf Basis der Anwendungsanforderungen der Unternehmen BOMAG und John Deere wurden konkrete Use-Cases von STW analysiert. Die resultierenden Use-Case Anforderungen sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Use-Case Anforderungen an das AMMCOA-Projekt. Außer den gezeigten Parametern wurden die Latenzzeit, die Genauigkeit in xyz-Richtung und der Anwendungsbereich (lokal/global/uplink) untersucht.

Application	No	Use Case Description	Communication Requirements	
			Range / m	Throughput / bps
Agricultural	1	Transport off roads (without reception)	100	1M
	1b	Transport on roads (with reception)		10M
	2	Parallel driving	100	1M
	3	Data offload to the cloud	100	1G
	4	Remote control		100M
	5	Local control	500	1G
			100	1G
			500	100M
Construction	6	Autonomous compaction	300	1G
			100	1G
			300	100M
	7	Water Tanking	5k	256k
	8	Construction site manager (onsite)	100	<150M? ("4G")
	9	Construction site manager (offsite)		<150M? ("4G")
	10	Handover: Autonomous compaction and Water Tanking		
11	Autonomous compaction fallback handovers			

Auf Basis der technischen Anforderungen „maximale Reichweite, Datendurchsatz und schärfste Latenzzeit“ wurden diverse Funkstandards auf mögliche Verwendbarkeit im Projekt überprüft. In Tabelle 4 sind ermittelten Funkmerkmale der analysierten Funkstandards aufgelistet.

Tabelle 4: Funkmerkmale der Funkstandards Long Term Evolution (LTE) Insel, LTE (700 MHz), millimeter Wave (mmW), LTE (450 MHz) und Long Range (LoRa).

Funkstandard	Reichweite in m	Datendurchsatz in bps	Latenzzeit in ms	Standardkomponente (LTE Advanced Pro)
LTE Insel	500	100M	10	SDR (Software Defined Radio)
LTE (700 MHz)	500	100M	10	IFAG
mmW	100	1G	1	
LTE (450 MHz)	10k	500k	20	-
LoRa	5k	1M	20	Standard Component

Als Ergebnis dieser Analyse stellte sich heraus, dass für das LTE (450 MHz) im Moment keine Standardkomponenten für das AMMCOA Projekt zur Verfügung stehen und auch die Verwertbarkeit bzgl. der Frequenzvergabe fraglich ist. Somit haben sich als **relevante Netzwerkfunktionalitäten** mmW, LTE (700 MHz) und LoRa hervorgehoben. Als kritischsten Anwendungsfall wurde der Use Case Nr. 7 „Befüllen eines Wassertanks“ der Firma BOMAG definiert, da hier lediglich der Funkstandard LoRa die Anforderungen erreichen kann. In Tabelle 5 werden die Ergebnisse der Anforderungsanalyse für diesen Anwendungsfall aufgeführt.

Tabelle 5: Kritischster Anwendungsfall Nr. 7 „Befüllen eines Wassertanks“: Technische Anforderungen an Kommunikation und Lokalisierung.

Application	Use Case	Details	Communication Requirement				Location Requirement
			Scope	Range / m	Throughput / bps	Latency / ms	xyz Accuracy / cm r ≤
Construction	7 – Water Tanking	A vehicle moves away(5km) from the others to a tank vehicle	local	5k	max. 256k	1k	100

Die Ergebnisse weiterer Recherchen zum Funkstandard LoRa ergaben die folgende Liste der Eigenschaften von LoRa:

- Offener Funkstandard für ein Low Power Wide Area Network (LPWAN)
- Ergänzt klassisches Mobilfunknetz um ein IoT (Internet of Things)- oder M2M (Machine-to-Machine)-Netzwerk mit bidirektionaler Kommunikation

- Architektur: Kommunikation der Endgeräte über Gateways. Diese vermitteln Daten an Server. Schnittstellen am Server zur Anbindung an IoT-Plattformen und – Applikationen.
- Reichweite: bis zu 15km, gute Gebäudedurchdringung
- Energieverbrauch: im Ruhemodus: 10mA-100nA; Batterielebensdauer: 2-15 Jahre
- Übertragungsrate: 0,3-50 kBit/s; max. 25 mW Sendeleistung.

Wichtigstes Ergebnis der Recherchen war, dass eine LoRa-Verbindung über eine Entfernung von 5km (Anwendungsfall „Wassertank befüllen“) realisierbar ist.

Im Projektverlauf wurden zudem diverse Anwendungsfälle und Rahmenbedingungen für unterschiedliche Branchen/Marktsegmente innerhalb des Marktumfelds von STW evaluiert und bewertet. Dabei wurden für relevante Branchen diverse mobile Maschinen danach bewertet, ob Arbeitsprozesse innerhalb einer Maschinenflotte **komplex orchestrierbar** sind (dreiwertige Skala: 1:= trifft zu; 2:= trifft bedingt zu; 3:= trifft nicht zu). Eine nach Branchen zusammenfasste Übersicht über die Ergebnisse ist in Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6: Zusammenfassung der Bewertung diverser branchentypischer mobiler Maschinen nach ihrer Eignung zur komplexen Orchestrierung.

Branche	Zahl untersuchter Fahrzeugtypen	Bewertung		
		1= trifft zu	2=trifft bedingt zu	3=trifft nicht zu
Baumaschinen	11	8x	1x	3x
Bergbaumaschinen	4	4x	0x	0x
Flughafenfahrzeuge	9	7x	0x	2x
Hebe- und Fördertechnik	18	10x	0x	8x
Kommunalmaschinen	9	3x	3x	3x
Landmaschinen	21	10x	3x	5x
Sondermaschinen	5	2x	0x	3x
Transport und Logistik	7	7x	0x	0x
Bahn	4	2x	2x	0x

Wichtigste Ergebnisse dieser Analyse waren zum einen, dass bei einer Vielzahl von Fahrzeugen unterschiedlichster Branchen eine orchestrierte, hochautomatisierte, echtzeitfähige Kommunikation im Verbund mit anderen Fahrzeugen sinnvoll und nützlich ist. Eine **Ausstattung mit einer On-Board-Unit ist folglich in den meisten Fällen angezeigt.**

Als weiteres Ergebnis kann festgehalten werden, dass Anbaugeräte der unterschiedlichen Branchen jedoch eher keine OBU benötigen, die übergeordnete mobile Maschine in der Regel schon.

Darauf aufbauend wurde eine tiefere Anwendungsanalyse mit Fokus auf spezifische Anforderungen nach dem gleichen Bewertungsschema durchgeführt. Zur Analyse der knapp 30 verschiedenen Anwendungsfälle aus 9 relevanten Branchen wurde auch hier die dreistufige Bewertung der Orchestrierbarkeit herangezogen. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Ergebnis der Anwendungsanalyse. 28 verschiedenen Anwendungsfälle aus 9 relevanten Branchen, bewertet nach komplexer Orchestrierbarkeit (1:= trifft zu; 2:= trifft bedingt zu; 3:= trifft nicht zu)

Branche	Anwendung	Bewertung
Baumaschinen	Erdbewegungsarbeiten großer Mengen im Schwarm bestehend aus unterschiedlichsten Baumaschinen (Bagger, Planierraupen, Transportsysteme, Erdverdichter)	1
	Abrissarbeiten von Straßen oder ganzen Stadteilen (Straßenfräßen oder Mobile Steinbrecher)	1
	Straßenbau siehe Use-Cases BM im Rahmen von AMMCOA	1
Bergbaumaschinen	Minen Navigation; Indoor Navigation in Zusammenhang mit Minendisposition von Maschineneinsätzen.	1
	Bergbau / Tagebau Koordination der Maschinenschwärme zur besseren Auslastung der Kapazitäten	1
	Bei Tunnelbau zur Anforderung von Gütern oder Spezialequipment.	1
Branche	Anwendung	Bewertung
Flughafenfahrzeuge	Winterdienst Flughafen; (Schneeräumen große Flächen im Flottenverbund)	2
	GSE Automatisiertes, koordiniertes Fleet Management; Cargo People	1
	Winterdienst Flughafen, Flugzeugenteisungsanlagen	2
	Hochautomatisiertes Flottenmanagement um ein Flugzeug, zu be- und entladen sowie erweiterte Service Tätigkeiten.	1
Hebe- und Fördertechnik	Abstimmung mit dem LKW als Master und den Ladefahrzeugen, welche Palette wann wo platziert werden muss.	1
	Kommissionierung im Großlager.	3
	mmW basierte Indoor Navigation & Kommunikation	1
Kommunalmaschinen	Personen Transport; Bus/Haltestellen; Optimale Route; Taxi	1
	Automatisierung von Kommunalfahrzeugen zur Reinigung von Schildern, Straßen, Mäharbeiten etc. im Verbund.	1
	Hochautomatisierter Prozess zur Hausmüllbeladung.	2
	Hochautomatisierte Stromtrassenpflege (Drohnenbasiert)	2
	Hochautomatisierte Strandreinigung / Umweltreinigung mit unterschiedlichen Fahrzeugarten im Verbund	1

Landmaschinen	Drohnen Mähgeräte auslegerlos	2
	Erntearbeiten auf großen Flächen	1
	Pflegearbeiten auf großen Flächen (Düngen; Gießen; Pestizidaustrag)	1
Sondermaschinen	Maritimes Müllsammeln	1
	Flussvertiefungsarbeiten, Fahrrinnenverbreiterung im Verbund mit unterschiedlichen Maritimen Teilnehmern	1
	Hochautomatisierte Ski-Pisten Präparation im Schwarmverbund	1
Transport und Logistik	Hochautomatisiertes Container-Handling / Logistik in Großhäfen wie z.B. Hamburg	1
	Ladungs- Entladungsorganisation	1
Bahn	Gleisbauarbeiten außerhalb der 5G Abdeckung zur autonomen Kommunikation in einer Kommunikationsinsel für den Warenfluss auf dem zu bearbeitenden Gleisbett.	1
	Güterwagen 4.0 der weiß in welche Richtung er mit seiner Ladung hin muss und sich bei dem jeweiligen Zug automatisch anmeldet und mitgenommen wird. Auch als dezentralisierte Lösung möglich.	1

Eine wichtige Erkenntnis ist, dass in den meisten Anwendungsfällen eine Orchestrierung mobiler Maschinen dort vollzogen werden muss, **wo keine oder schlechte Netzabdeckung seitens allgemeiner Mobilfunkanbieter** zur Verfügung steht.

Darauf aufbauend wurden „Top Level“ Use-Cases erstellt. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass ein hoher Automatisierungsgrad und eine zuverlässige Kommunikation großes Einsparpotenzial an Zeit und Ressourcen verspricht. Tabelle 8 zeigt die Ergebnisse dieser Analyse.

Tabelle 8: Top-Level Use-Cases: Fälle, bei denen ein hoher Automatisierungsgrad und eine zuverlässige Kommunikation besonders hohes Einsparpotenziale bieten.

Branche /Anwendung	Use-Case
Flugvorfeldfahrzeuge	
Hochautomatisiertes Flottenmanagement um ein Flugzeug, zu be- und entladen sowie erweiterte Service Tätigkeiten.	Der Flugzeugschlepper soll die Position und Statusinformationen des Flugzeugs genau erfassen und an die für den Einsatz notwendigen Fahrzeuge bekannt geben.
	Die Servicefahrzeuge werden vom Flugzeugschlepper entsprechend des Ablaufprozesses koordiniert
	Servicefahrzeuge sind Fahrgasttreppen, Tankwagen, Saugwagen für Brauchwasser, Gepäckwagen und Scherenhebebühnen.
	Durch geeignete Sensorik wird der Andockvorgang überwacht und entsprechend dokumentiert.
	Kritische Ereignisse werden dem Flugzeugschlepper mitgeteilt, der wiederrum gibt aufgrund der Anbindung an das Flugzeug die Informationen an den verantwortlichen Kapitän weiter.
	Nach dem Serviceeinsatz fahren alle Fahrzeuge hochautomatisiert aus dem Kritischen Flugzeugsbereich.
Offene Funkkommunikation des Flugzeugs mit der Umwelt für hochautomatisierte Logistik. (Fahrgasttreppen, Tankwagen, Saugwagen für Brauchwasser, Gepäckwagen und Scherenhebebühnen)	
Kommunalmaschine	
Personen Transport; U-Bahn/ S-Bahn/ Bus/Haltestellen; Optimale Route; Taxi	Eine Dynamische Planung der öffentlichen Verkehrsmittel wird via Kommunalen Verkehrssteuerungszentrale Zentral gestaltet.
	Parameter alternativer Linienrouten können dem Busfahrer echtzeitfähig übermittelt werden.
	Zusätzliche Busse oder Großraumfahrzeuge können auf den Linien korrigierend und flexibel in die jeweilige Linie eingebunden werden.
	Haltestellen könnten deaktiviert oder zusätzlich in Betrieb genommen werden.
	Alles via taktilem Internet 5G.
Bergbau	
Bergbau / Tagebau Koordination der Maschinenschwärme zur besseren Auslastung der Kapazitäten	Ein aufspannen zur Kommunikation mit der Zentrale via 5G taktilem Internet um Maschinen Dezentral im Bergwerk vor allem Untertage zu organisieren.

Diese Top-use-cases zeigen vielversprechendes Verwertungspotential für die zu erwartenden Ergebnisse des AMMCOA Forschungsprojekts.

Dieses Arbeitspaket wurde somit erfolgreich abgeschlossen.

2.1.2 AP2 Entwurf einer Gesamtarchitektur

Die Kommunikationsarchitektur für die AMMCOA 5G-Insel baut auf dem HetNet (Heterogeneous Network) Konzept auf, das weithin als vielversprechende Option für die Integration von Millimeterwellentechnologie in mobile Kommunikationsinfrastruktur angesehen wird. Im HetNet wird die Millimeterwellenfunkschnittstelle mit mindestens einer weiteren Schnittstelle bei niedrigeren Frequenzen kombiniert, die eine omnidirektionale oder quasi-omnidirektionale Funkabdeckung realisiert. Auf diese Weise wird dauerhaft eine grundlegende Kommunikationskapazität bereitgestellt, die bei Verfügbarkeit durch Millimeterwellenverbindungen erweitert wird. Weiterhin können die Datenströme für Steuer- und Nutzdaten zwischen beiden Schnittstellentypen separiert werden (C/U-Plane Split).

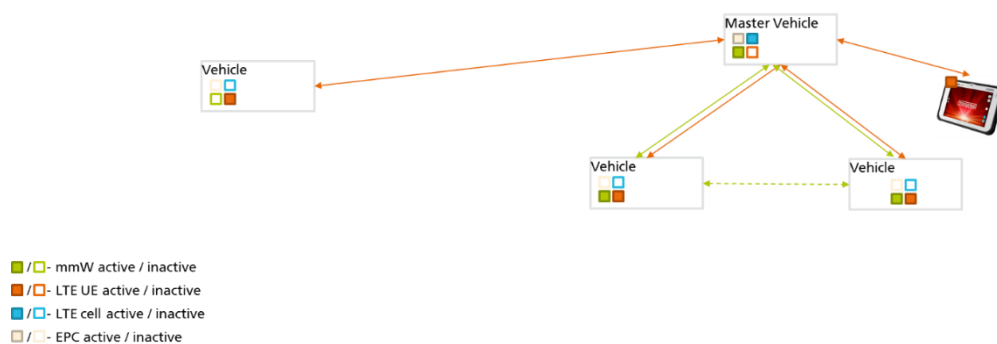


Abbildung 6: Einfaches Kommunikationsszenario

Abbildung 6 stellt exemplarisch ein einfaches Kommunikationsszenario in der AMMCOA 5G-Insel dar. Ein zentrales Fahrzeug (Master Vehicle, z.B. Mähdrescher, Straßenfertiger) agiert als Ankerpunkt der Insel und stellt Kernnetz- sowie Basisstationsfunktionalität der Funkschnittstellen bereit. Alle Teilnehmer der Insel (Fahrzeuge und weitere Geräte, z.B. Tablet-Rechner) haben durch die LR-Schnittstelle (orange) eine permanente Verbindung mit dem Master Vehicle. Fahrzeuge in Reichweite des Master Vehicle können zusätzlich eine Verbindung über die Millimeterwellen-Schnittstelle (grün) etablieren.

Im Unterschied zu klassischer infrastrukturgestützter Mobilkommunikation müssen Teilnehmer der AMMCOA 5G-Insel situationsabhängig sowohl als Basisstation- als auch als Endgerät innerhalb des lokalen Funknetzes agieren können. Dies muss bei der Definition und Implementierung der Funkschnittstellen berücksichtigt werden, außerdem muss eine Managementschnittstelle die Umschaltung zwischen den Betriebsmodi aus der Anwendungsschicht ermöglichen.

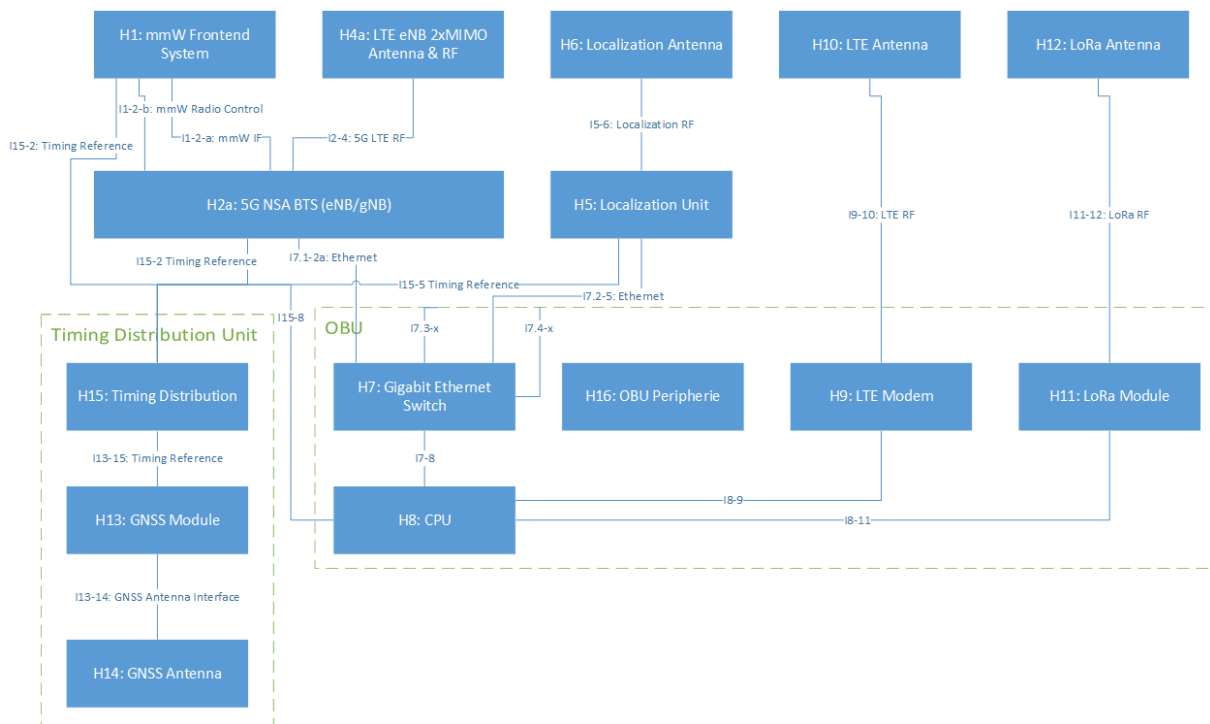


Abbildung 7: Übergeordnete Hardware-Architektur

Ausgehend von der Netzarchitektur wurde eine detaillierte Systemarchitektur auf Hard- und Softwareebene definiert, die die wesentlichen Komponenten und Schnittstellen spezifiziert. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt einen Auszug aus der obersten Ebene der Hardware-Architekturdefinition mit Fokus auf den Kommunikationsfunktionsgruppen. Die Spezifikation erfolgt hardwareseitig in enger Zusammenarbeit mit den Partnern STW und Infineon, softwareseitig mit CND.

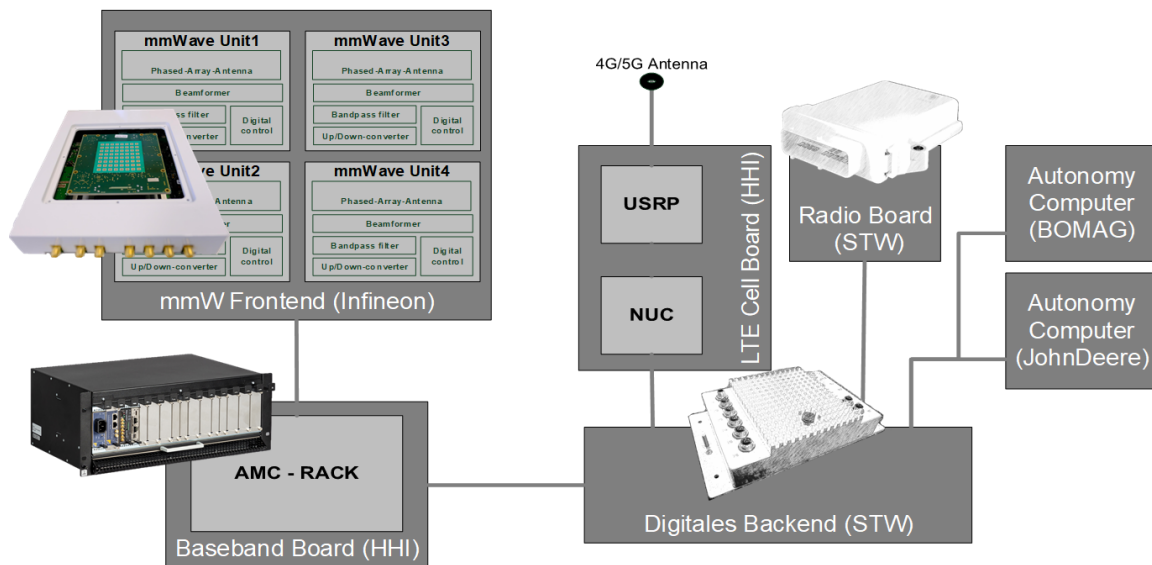


Abbildung 8: Blockdarstellung der Gesamtarchitektur

Die Infineon Technologies AG war in diesem Kontext für die Erstellung und Erforschung der mmWellen-Einheiten zuständig.

Die Eigenschaften des mm-Wellen Frontend wurden aufgrund von existierenden Kommunikationslösungen und neuen Systemkonzepten definiert. Die wichtigsten Funktionen sind:

- Beamforming des Antennenarrays mit beweglicher Strahlungsrichtung
- die Kommunikation mit kurzer Latenzzeit
- die flexible skalierbare Frontendarchitektur.

Die Überprüfung der beiden vielversprechendsten Frequenzbereiche von 57 - 64 GHz und 24,25 - 27,5 GHz, die für das mm-Wellen Frontend Module in Betracht gezogen wurden, führte dazu, dass letztere aufgrund der folgenden Vorteile ausgewählt wurde:

- Frühere Verfügbarkeit der Infrastruktur, da die 5G-Kommunikationssysteme in Frequenzbereichen über 6 GHz zunächst bei niedrigeren mm-Wellen Frequenzen umgesetzt werden, so gibt es weltweit deutlich mehr Anstrengungen in Systementwicklung und in 28 GHz-Module.
- Voraussichtlich wird der Frequenzbereich von 24,25 - 27,5 GHz zuerst lizenziert werden.
- Eine Kommunikation über eine längere Entfernung ist im Frequenzbereich von 24,25 - 27,5 GHz möglich.

- Bei 24,25 - 27,5 GHz ist eine höhere Effizienz, höhere Ausgangsleistung und bessere Temperaturstabilität von Halbleiter-ICs gegeben (für B11HFC SiGe-Technologie ist die Betriebsfrequenz 14-mal kleiner als f_{max} von 380 GHz).

Die Anforderungen des FE Moduls wurde definiert: Tabelle 9 zeigt die Haupteigenschaften.

Tabelle 9: Hauptanforderungen aus der Frontend v2 Spezifikation

Anforderung	Wert			Einheit	Anmerkungen
	Min	Nom	Max		
Allgemein					
Duplex Schema		TDD			
Hochfrequenzbereich HF	24250		27500	MHz	
Frequenz-Schritte HF	1	1	1	MHz	
Mittelfrequenz ZF		5.8		GHz	
Anzahl Ein-/Ausgänge		2			Analoges Beamforming bei zwei von vier FEMs mit aus 64 Elementen bestehenden Antennen-Arrays: 1 ZF Eingang pro FEM, gleichzeitiger Betrieb von bis zu 2 FEMs
TX/RX Umschaltzeit			500.0	ns	Gültig sowohl für TX nach RX und RX nach TX für alle RF Kanäle bei Verwendung der externen TXRX Umschaltung
Signalspezifikation					
Unterstützte Wellenformen	SC/OFDM	SC/OFDM	SC/OFDM		
Unterstützte Bandbreiten	100,0	400,0	800,0	MHz	800MHz: Angrenzendes Band oder Trägeraggregation
Modulationsarten	QPSK		256QAM		HF-Beeinträchtigung soll 256QAM oder SINAD von 33dB unterstützen. Gültig für TX ZF nach RX ZF
Link EVM			3,5	%	10dB über der Empfindlichkeitsstufe für TX und RX Link
PAPR	10.0			dB	
Anforderungen für die Modulkonfiguration					
Frontend Geräte		5			Der Frontend Aufbau beinhaltet 5 getrennte Einheiten: 4 FEMs mit Phased-Array Antennen und einer zentralen Recheneinheit welche die Umschaltung der ZF vornimmt sowie die digitalen Steuersignale zwischen dem 5G Modem und dem entsprechenden FEM zur Verfügung stellt.
Betriebsart für Frontend Konfiguration	Sequenziell (1 FEM gleichzeitig)	Parallel (2 FEMs gleichzeitig)			Sequenziell: Es agiert immer nur 1 FEM entsprechend der 5G Modem Steuersignale Parallel: 2 FEMs agieren gleichzeitig entsprechend der 5G Modem Steuersignale
FEM besitzt Beamforming Funktionalität		Ja			
FEM Antennen Array Konfiguration		1x [8x8]			

Alle Antennenelemente werden als ein großes Array gesteuert		Ja			
Azimuthsteuerung pro Einheit		110		Grad	Jedes FEM deckt einen 110 Grad Bereich ab
Azimuthsteuerung pro Modul		360,0		Grad	Aufbau von 4 FEMs und 1 CU deckt eine Fläche von 360 Grad vollständig ab

Das Blockdiagramm zum gesamten Frontend v2 ist in Abbildung 9 dargestellt. Vier separate Frontend Module (FEM), angesteuert durch eine Zentraleinheit (engl. Central Unit = CU), bieten eine 360° Azimut Winkelabdeckung. Zur Abdeckung kurzer Reichweiten bietet jedes FEM einen Azimut Steuerwinkel von bis zu 110°. Alle FEMs werden nach dem gleichen Design hergestellt und können dadurch leicht ersetzt werden. Ein FEM beinhaltet ein Motherboard und eine mmWave Einheit (HF Platine). Das Motherboard beherbergt die digitale Steuerung, Synchronisation, ZF und Spannungsversorgung zwischen FEM und CU. Die mmWave Einheit beherbergt ein Vervielfacher/Konverter IC, ein Bandpass Filter, 18 Beamformer ICs welche eine Phased-Array Antenne mit 64 Elementen in einer 8x8 Konfiguration speisen. Die CU stellt eine Schnittstelle zu einem 5G Modem bereit und schaltet die HF und Steuersignale zwischen den FEMs und dem 5G Modem der OBU. Das FEM Design erlaubt den von der CU getrennten und unabhängigen Betrieb mittels einem lokalen PC mit einer grafischen Bedienoberfläche über eine USB Schnittstelle.

Diese vier Einheiten sind mechanisch und elektrisch mit einem Motherboard verbunden, das digitale Steuerungs-, Synchronisations-, ZF- und Versorgungsschnittstellen zwischen dem Frontend-Modul und anderen Komponenten der OBU hat. Jede mm-Wellen-Einheit bietet die definierten Transceiver-Funktionalitäten wie Up-Down-Konvertierung im TDD-Modus, Sende- und Empfangsfunktionen mit Beamforming-Fähigkeit, bidirektionale ZF-Schnittstelle und ein SCI (Serial Control Interface) für schnelle Einstellung der Strahlgewichte. Um eine hohe architektonische Flexibilität des mm-Wellen-Einheitendesigns zu ermöglichen, ist die Integration von Transceiver-Funktionen in zwei getrennten integrierten Schaltungs-(IC) - Designs implementiert: Up-Down-Converter-IC und Beamformer-IC.

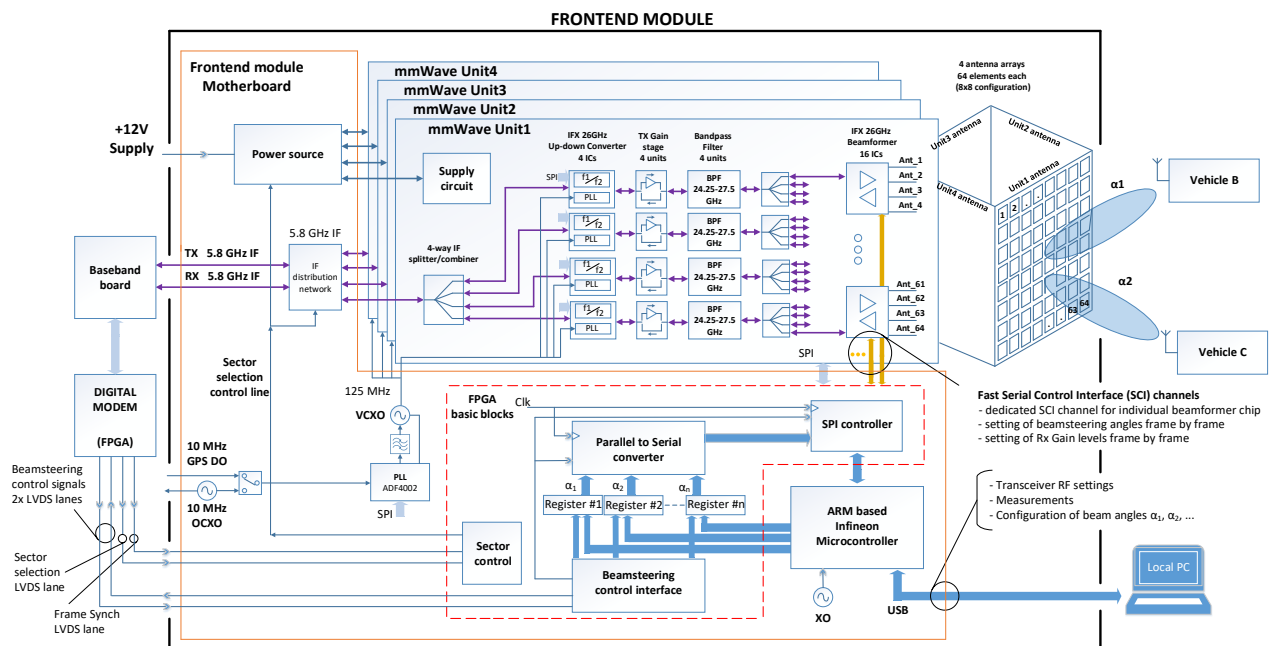


Abbildung 9: 28 GHz Frontend Modul Blockdiagramm

Das Blockdiagramm des Up-Down-Converter-ICs (UD) ist in Abbildung 10 zu sehen. Das UD unterstützt den Frequenzbereich von 24,25 bis 30,5 GHz und besitzt eine von 3 bis 7,5 GHz programmierbare ZF-Frequenz.

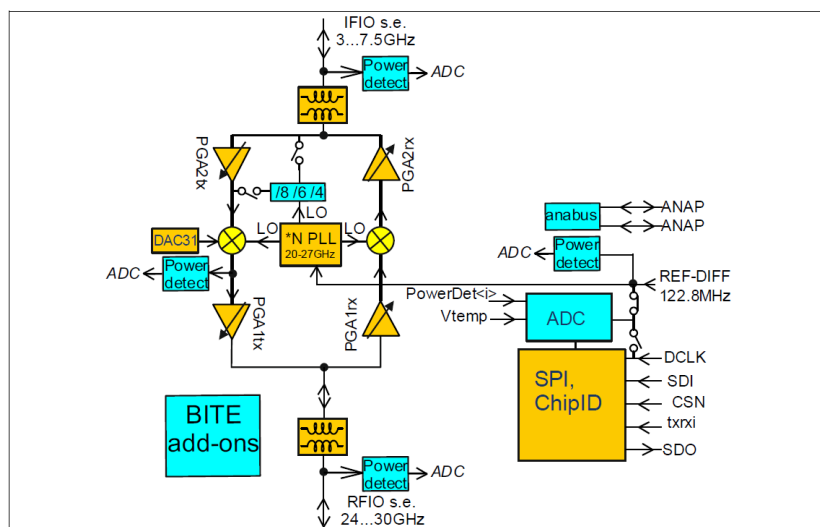


Abbildung 10: Up-down Converter IC Blockdiagramm

Das UD enthält RX- und TX-Signalfade, die mit den gleichen ZF- und RF-Single-Ended-Schnittstellen verbunden sind und im TDD-Modus arbeiten können. Jeder dieser Pfade besteht aus einem Mixer und zwei programmierbaren Verstärkern (PGA) mit mehr als 30 dB Dämpfungsbereich. Der integrierte VCO mit Ganzzahl-N-Typ-PLL erfordert keine zusätzlichen

externen Komponenten. Der Chip hat integrierte Testschaltungen (BITE) zur Selbstkalibrierung.

Das Blockdiagramm des Beamformer ICs (BM) ist in Abbildung 11 dargestellt.

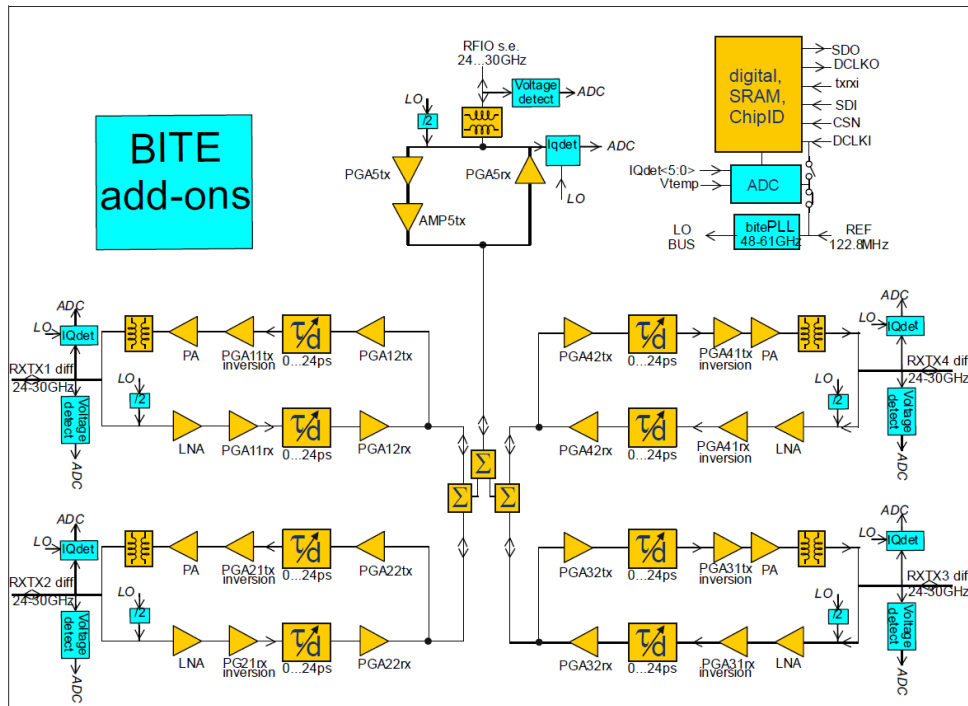


Abbildung 11: Beamformer IC Blockdiagramm

Das BM ist ein Vierkanal-Beamforming-Sende-Empfangs-RFIC mit über 30 dB Amplitudensteuerung. Basierend auf digital programmierbaren Verzögerungsleitungen ist eine Phasen-/Verzögerungssteuerung realisiert. Diese ermöglicht einen 360 Grad Phasensteuerungsbereich oder eine Echtzeitverzögerungssteuerung von mindestens 24 ps. Der IC arbeitet im TDD-Modus mit bidirektionalen Schnittstellen und unterstützt einen Frequenzbereich von 24,25 bis 30,5 GHz mit bis zu 800 MHz HF-Momentan-Bandbreite. Jeder dieser vier Kanäle besitzt einen programmierbaren Phasenverschiebungsbereich von 180 Grad mit einer effektiven Auflösung von 4 Grad für jeden Kanal. Eine extra +/-180 Grad Phasenverschiebung kann in den variablen Verstärkern jedes Kanales erzeugt werden. Der BM-Chip enthält ebenfalls integrierte Testgeräte für die On-Chip-Phasen- und Amplituden-Kalibrierung.

Die Anforderungen für die phasengesteuerten Array-Antennen, die in jeder mm-Wellen-Einheit implementiert werden sollten, wurden definiert und sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Phased array antenna Anforderungen

Requirement	Values	Unit	Notes
-------------	--------	------	-------

Antenna size	approx. 50 x 50	mm	Width x Height
Antenna configuration	8 * 8		n+2 * n+2 in case dummy radiators needed
Number of TRXs	64		TRX per antenna element
26GHz band: frequency range	24 250 - 27 500	MHz	
Antenna element gain	app. 6	dBi	Bore sight
Antenna total gain	21	dBi	Bore sight, antenna total gain = array gain + element gain
Antenna total gain with max. azimuth or max. elevation	18	dBi	Without tapering
XPD HPBW	18	dB	
Isolation between radiator input ports	20	dB	
Antenna element input port impedance	100 differential	ohm	
Antenna element input port return loss	≥ 14	dB	over the frequency band
Side lobe suppression (steering range 0...+/- 25)	≥ 20	dB	With tapering, e.g. Chebyshev
Side lobe suppression (steering range 0...+/- 55)	≥ 15	dB	With tapering, e.g. Chebyshev
Polarization	Vertical / Horizontal		Single polarization per each module
Elevation steering range	± 45	deg.	
Azimuth steering range	± 45	deg.	

Tabelle 11 zeigt die berechnete Spezifikation für das Phasenrauschen eines FEM basierend auf der 3,5% EVM Anforderung für die Modulation höchster Ordnung der 256 QAM der 5G NR OFDM Signale im n258 Frequenzband (24,25GHz bis 27,5GHz). Die Architektur des Up-Down Konverter ICs wurde verändert um die aufgelisteten, strengen Anforderungen zu erfüllen.

Tabelle 11: Spezifikation Phasenrauschen

Anforderung an das Phasenrauschen	Wert	Einheit
Integriert über 10kHz - 200MHz Offset	-38,0	dBc
10kHz Offset	-95,0	dBc/Hz
100kHz Offset	-95,0	dBc/Hz
1MHz Offset	-110,0	dBc/Hz
10MHz Offset	-135,0	dBc/Hz
100MHz Offset	-145,0	dBc/Hz
200MHz Offset	-150,0	dBc/Hz

2.1.3 AP3 Anforderungen an die 5G-Insellinfrastruktur

Aufbauend auf den Szenarien wurden Anforderungen an die Sensorik und die Kommunikationssysteme aufgestellt. Geeignete Sensorik zur lokalen Navigation und Steuerungshardware wurden ausgewählt. Die Soft- und Hardwareschnittstellen zur Ansteuerung der Fahrzeuge wurden mit den Partnern spezifiziert.

Zusammen mit dem Partner TUK-RRLab wurde die Struktur der Steuerungssoftware spezifiziert. Diese lässt sich in drei Ebenen gliedern. Die Schwarmebene beschreibt die Struktur zwischen den einzelnen Fahrzeugen, die Maschinenebene die Softwarestruktur auf einem Fahrzeug und die Komponentenebene die Umsetzung der Funktionen innerhalb einer Komponente. Da die Aufgaben der Robot Makers GmbH im Wesentlichen auf der Schwarm- und der Maschinenebene lagen, werden diese im Folgenden im Detail beschrieben:

Schwarmebene:

Die Steuerungssoftware im Schwarm soll so strukturiert werden, dass auf jedem Fahrzeug eine Instanz der Steuerungssoftware läuft. Die Softwareinstanz auf einer Maschine übernimmt dabei die Rolle des Koordinators. Im Fall des Straßenfertigungsszenarios könnte der Koordinator bspw. auf dem Fertiger laufen. Die Aufgabe des Koordinators ist es, den einzelnen Steuerungen ihre Aufgabe im Schwarm zuzuweisen. Ein Beispiel einer solchen Struktur ist in Abbildung 12 dargestellt. Diese Abbildung zeigt die Struktur für fünf Fahrzeuge. Das System soll so ausgelegt werden, dass Steuerungen beliebig dynamisch hinzugefügt oder weggenommen werden können. Um dies dementsprechend umzusetzen, soll das Robotik Framework finroc® um entsprechende Funktionalitäten erweitert werden.

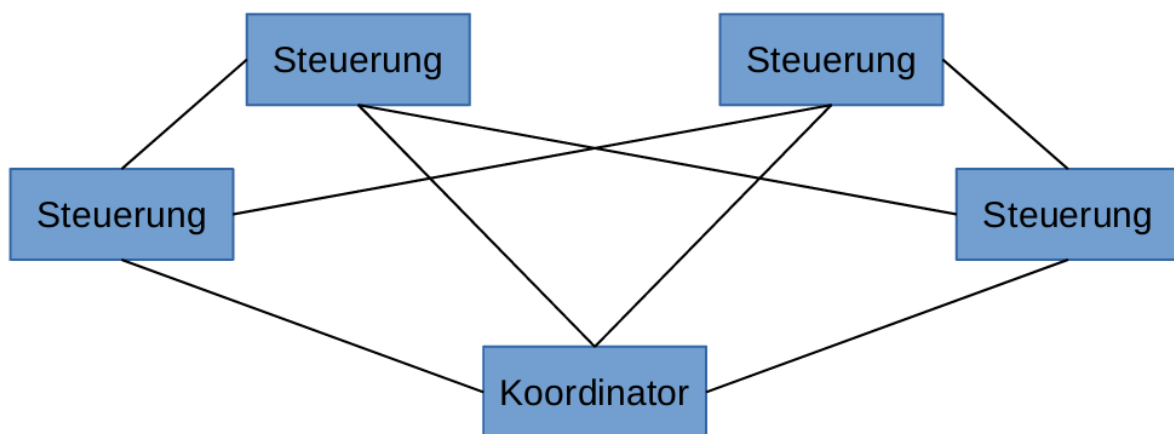


Abbildung 12: Struktur der Steuerungssoftware im Schwarm

Maschinenebene:

Die Software Struktur auf Maschinenebene, d.h. die Struktur der Software, die auf einem Fahrzeug läuft, ist in Abbildung 13 dargestellt. Sie ist in zwei Komponenten aufgeteilt. Ein Teil, der für die Realisierung der Autonomie zuständig ist, läuft auf einem „High Performance Computer“, während ein zweiter Teil, der das Verbundmanagement realisiert auf der OBU läuft.

Das Robotik Framework finroc® unterstützt eine derartige netzwerktransparente Aufteilung der Steuerungssoftware. Während der Partner TUK-RRLab für die Realisierung der Steuerungssoftware auf dem „High Performance Computer“ zuständig war, lag die Aufgabe der Robot Makers GmbH in erster Linie auf der Realisierung der Steuerungssoftware auf der OBU.

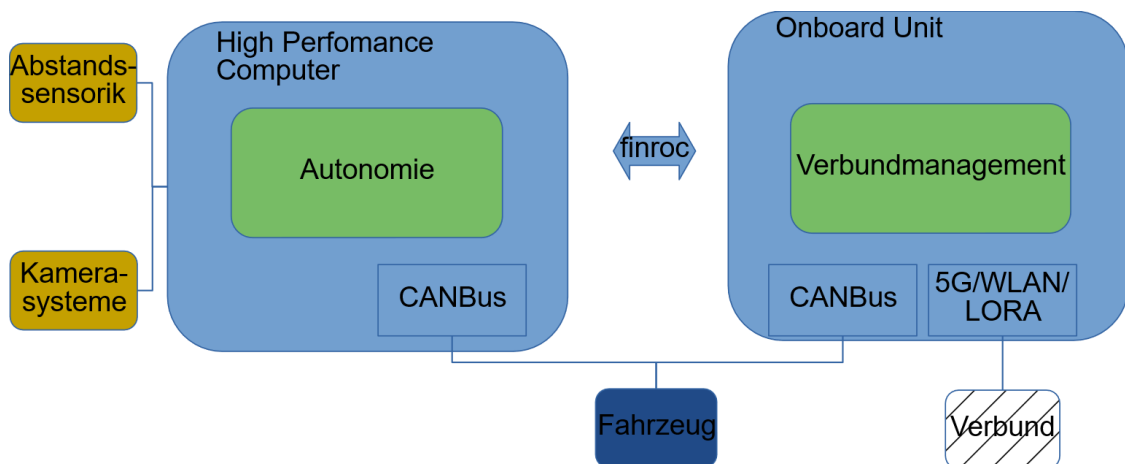


Abbildung 13: Struktur der Steuerungssoftware auf Maschinenebene

Hieraus ergaben sich die weiteren Aufgaben, die die Robot Makers GmbH zu lösen hatte: Zum einen das Verbundmanagement, zum anderen die Portierung von Teilaspekten der Fahrzeugsteuerung auf die OBU.

Unter Verbundmanagement wird dabei das Finden und Qualifizieren möglicher Verbundteilnehmer, sowie das Verbinden der jeweiligen Softwareinstanzen verstanden. Da zur Steuerung der Fahrzeuge das Robotik Framework finroc® genutzt wird, wurde also das Finden und Qualifizieren von finroc-Instanzen, sowie das Verbinden von finroc-Instanzen zur Laufzeit benötigt.

Das Portieren von Teilaspekten auf die OBU beinhaltet im Wesentlichen das Portieren von Teilen der Steuerung sowie das Portieren des GCB-Software-Stacks (GCB = Generic Control Box der Robot Makers GmbH), der das Verbundmanagement beinhaltet.

Verbundmanagement:

Eine wesentliche Idee dabei ist, dass der Maschinenverbund dynamisch zusammengestellt und aufgelöst werden kann. D.h. es sollen spontan verfügbare Maschinen zum Verbund hinzugenommen und, falls diese nicht mehr verfügbar sind, auch wieder entfernt werden können. Eine vorherige statische Konfiguration des Verbunds ist also nicht erwünscht. Vielmehr muss der Verbund dynamisch zur Laufzeit erzeugt werden können.

Grundvoraussetzung hierfür ist die Fähigkeit mögliche Verbundteilnehmer zu finden und entsprechend ihrer Fähigkeiten zu qualifizieren. Hierfür wurde der GCB Software-Stack der Robot Makers GmbH entsprechend erweitert, sodass andere GCBs die sich im selben Subnetz befinden, erkannt werden können. Hierbei werden insbesondere die IP-Adressen der einzelnen GCBs detektiert, da diese benötigt werden, um die finroc-Instanzen zu verbinden. Zusätzlich werden die Fähigkeiten der jeweiligen Komponente ausgetauscht. Im konkreten Fall bspw., ob es sich um einen Fertiger oder um eine Walze handelt.

Eine weitere Voraussetzung die geschaffen werden musste, ist die Erweiterung des Frameworks finroc® zur Realisierung dynamischer Verbünde. Die Ausgangslage war die, dass das Framework die transparente Kommunikation über TCP/IP unterstützt. Dabei konnten bisher Komponenten auf unterschiedlichen Rechnern im Netzwerk laufen, solange die einzelnen Rechner und deren IP-Adresse beim Programmstart bekannt waren. Für die Realisierung des oben beschriebenen dynamischen Verbunds, war diese Fähigkeit des Frameworks jedoch nicht ausreichend. Darum wurde es im Rahmen des Projekts derart erweitert, dass Verbindungen zwischen Rechnern, insbesondere zwischen den Maschinen, zur Laufzeit erstellt und entfernt werden können. Die hierfür benötigten Informationen über die einzelnen finroc-Instanzen werden dabei durch den zuvor beschriebenen GCB-Stack zur Verfügung gestellt.

Portierung auf OBU:

Um das Robotik Framework finroc® und ausgewählte finroc-Bibliotheken auf der OBU zu verwenden, ist eine Portierung, der bisher in erster Linie auf Intel-Architekturen verwendeten und für diese entwickelten Softwareteile, nötig. Die OBU besteht aus dem Radioboard, das mit einem 32-Bit Singlecore ARM Prozessor ausgestattet ist und dem Digital-Backend, welches über einen 64-Bit Dualcore ARM Prozessor verfügt.

Es wurde eine Tool-Chain entwickelt, um finroc® sowohl für das Radio-Board als auch für das Digital Backend zu kompilieren. Das finroc®-Basissystem sowie die notwendigen Bibliotheken zur Trajektorienregelung und zur Verwendung von Schnittstellen wie bspw. CAN-Bus wurden erfolgreich portiert. In einem ersten Test wurde zusammen mit dem Partner STW zwei Fahrzeuge mit jeweils einem Radio-Board und entsprechender Steuerungssoftware ausgestattet. Die Fahrzeuge konnten über das Radio-Board miteinander kommunizieren und auf diese Art und Weise koordiniert Trajektorien abfahren. Nach der Portierung der Sensordatenverarbeitungsbibliotheken der Robot Makers GmbH wurden Benchmarktests durchgeführt, um die Performance der Software auf der OBU zu testen. Die Testergebnisse

waren sehr positiv, so dass eine Verwendung der OBU Komponenten durch Robot Makers auch über das Projekt hinaus angedacht ist.

Abbildung 14 zeigt einen Testaufbau der verwendeten Komponenten.

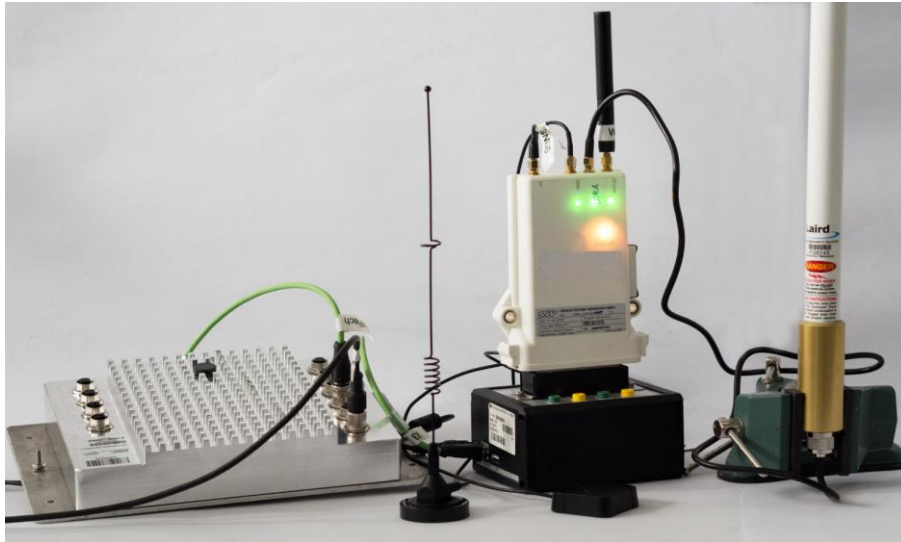


Abbildung 14: Testaufbau der OBU bestehend aus Digital Backend und Radio Board sowie den benötigten Antennen

2.1.4 AP4 Luftschnittstellenentwicklung

Basierend auf den Anforderungen der 5G-Insellinfrastruktur wurde die eigentliche Luftschnittstelle erstellt. Durch die Infineon Technologies AG und ihren Unterauftragnehmer Green-Waves wurden im Verlaufe des Projektes mehrere Versionen eines Beamforming-Frontendmoduls entwickelt. Dieses Modul realisiert eine steuerbare planare Gruppenantenne aus einer Anordnung von 8x8 Patch-Antennen. In enger Kooperation mit Infineon fanden dann am HHI umfangreiche Arbeiten und Tests für die Integration des Frontendmoduls in das Gesamtsystem statt.

Eine erste Version der Beamformer- und Up-Down-Converter-ICs wurde entwickelt und hergestellt. Sie sind im Ball-Grid-Array-Gehäuse für eingebettete Wafer (eWLB) geplant und produziert worden. Die Chipfotos sind in Abbildung 15 zu sehen.

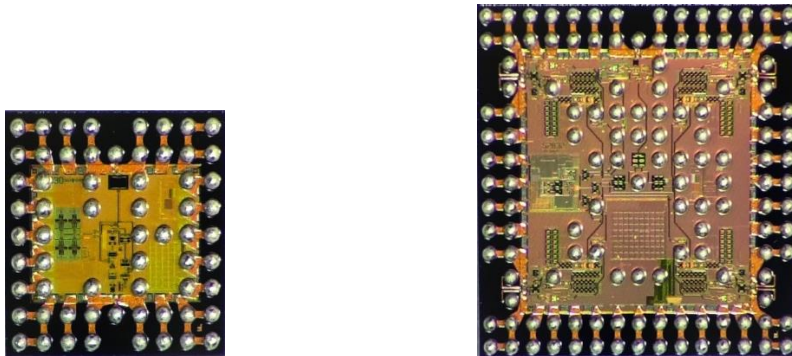


Abbildung 15: Rückseitenansicht des UD ICs (links) und des BM ICs (rechts)

Beide ICs wurden in der SiGe BiCMOS-Technologie B11HFC von Infineon gefertigt (Hochleistungsprozess mit 380 GHz f_{max}). Die Größe des Up-down-Converters eWLB beträgt 3,7 mm x 3,7 mm und die des Beamformer-eWLBs 6,03 mm x 6,03 mm. Beide Gehäuse haben einen Pinabstand von 400µm.

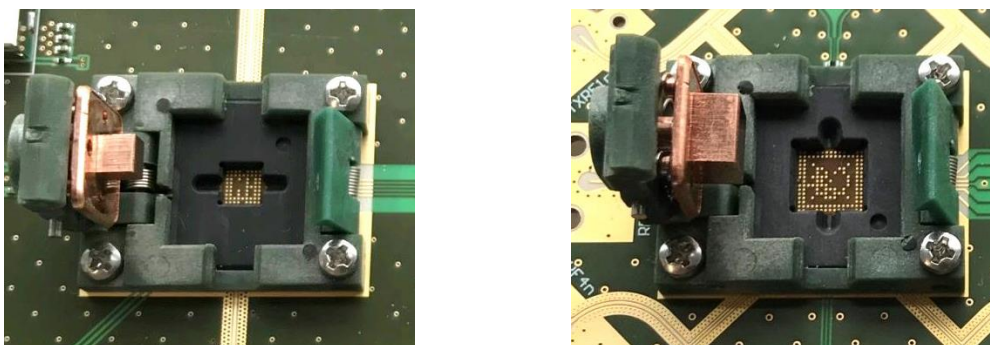


Abbildung 16: HF Messsockel der UD ICs (links) und der BM ICs (rechts)

Die Hochleistungssteckverbinder für die HF-Messungen der BM- und UD-ICs wurden in Zusammenarbeit mit Aries Electronics, Inc. entwickelt und hergestellt. Die Fotos der auf Evaluation-Boards montierten Sockel sind in Abbildung 16 dargestellt.

Die Erkenntnisse aus den ersten Tests flossen in eine zweite, verbesserte Version der Hardware-Komponenten ein. Diese zweite Version betrafen den Beamformer, den Up-down-Konverter, sowie das Design des Frontendmoduls. Alle Komponenten wurden getestet und in entsprechende Gehäuse eingebunden.

Die Gehäuse der zweiten IC Version wurden verkleinert. Der MP Chip wurde von 3.7mm x 3.7mm auf 3.7mm x 2.9mm und der BM Chip von 6.03mm x 6.03mm auf 5.23mm x 5.23mm verkleinert. Alle anderen Gehäuseeigenschaften blieben im Vergleich zur ersten IC Version gleich.

Die Hochleistungssockel mit Einlegern (Interposer) für HF Messungen der zweiten BM und MP IC Version wurden in Zusammenarbeit mit Aries Electronics Inc. entwickelt und gefertigt. Die Fotos der Sockel sind in Abbildung 17 dargestellt:

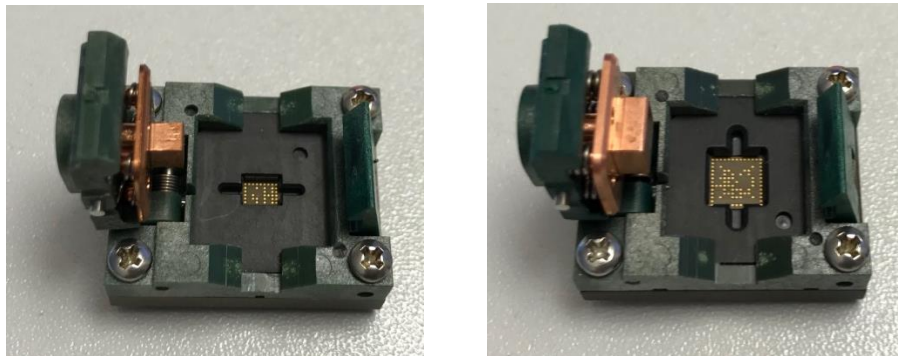


Abbildung 17: HF Sockel für die 2. IC Version MP (links) und BM (rechts)

Zur Charakterisierung der grundlegenden Funktionen und der Leistungsfähigkeit auf System-Ebene der zweiten BM und MP IC Version wurden Evaluierungsplatinen entwickelt und gefertigt. Das Bild des BM IC Evaluierungsboards und ein Prototyp für das MP IC Evaluierungsboard sind in Abbildung 18 dargestellt.

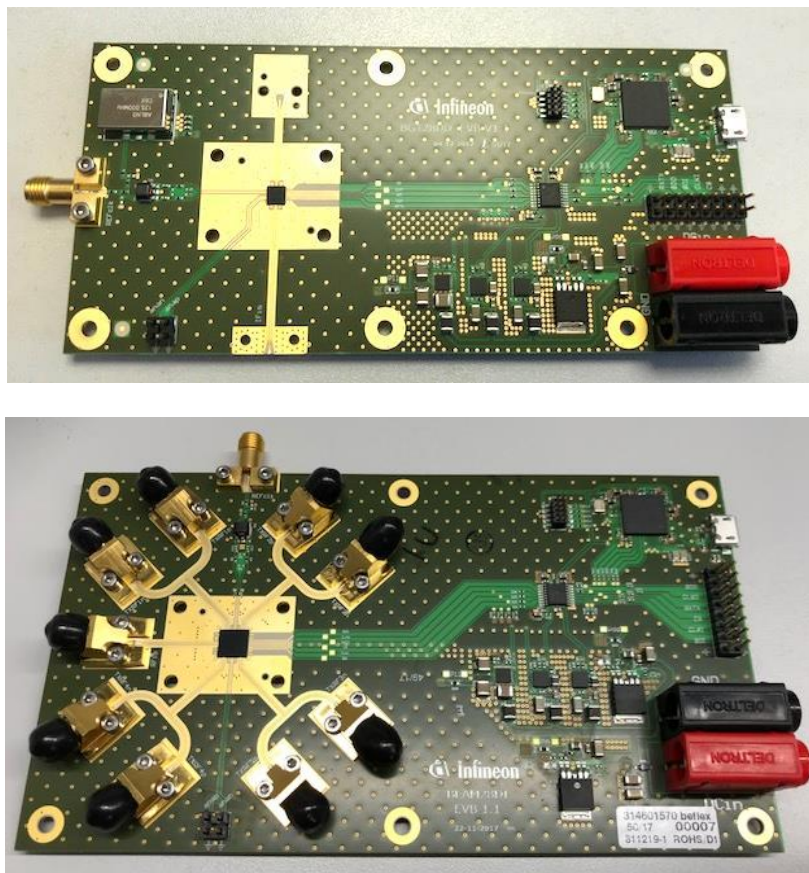


Abbildung 18: Test Boards des UD ICs (oben) und des BM ICs (unten)

Eine zweite Version des Up-Down Converter in der Ausführung des Multiplizierer Chip BGT28MP wurde aus Gründen der besseren Wärmeleitfähigkeit in ein verbessertes Package eingesetzt. Diese Version war ab April 2019 als Muster verfügbar und wurde in die FEM V2 für AMMCOA eingebaut. Der Beamformer Baustein BEAM28 PA war bereits im Vorfeld fertiggestellt worden.

Mit dem neu entwickelten PCB für die Charakterisierung des BGT28MP wurde die Eigenschaft des Bausteines verifiziert und in das FEM V2 Modul Design integriert. Das BGT28MP IC Evaluierungsboard ist in Abbildung 19 dargestellt.

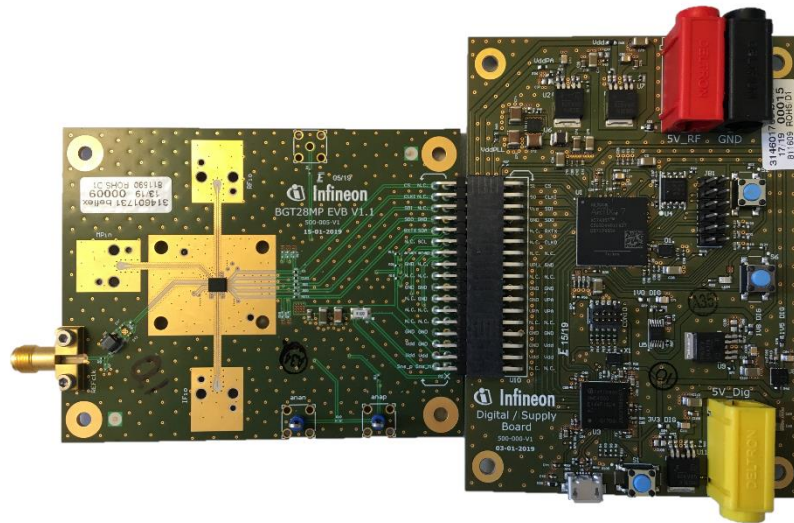


Abbildung 19: BGT28MP Evaluierungsboard mit Digitalem Kontroll- und Versorgungsboard

Messungen an dem Evaluierungsboard zeigen den generellen Verlauf des Empfängerpfades bei verschiedenen DAC Register Werte zur Beeinflussung der Verstärkung in der Kette. Hierbei wurde die HF Eingangsleistung bei einer fixierten IF Frequenz konstant gehalten und die HF Frequenz von 25,5GHz bis 28,5GHz verändert.

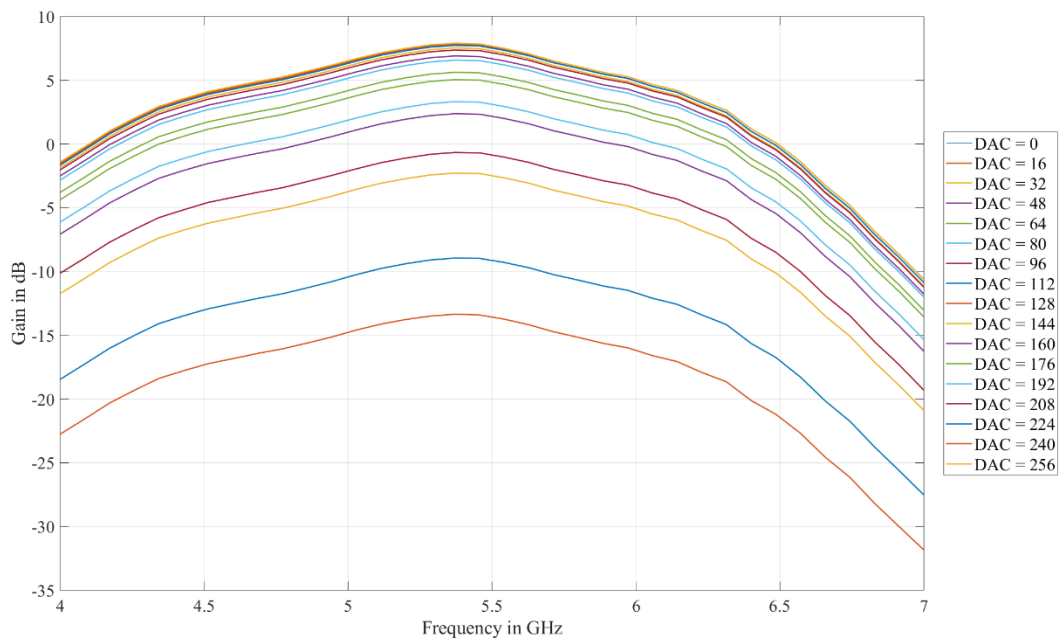
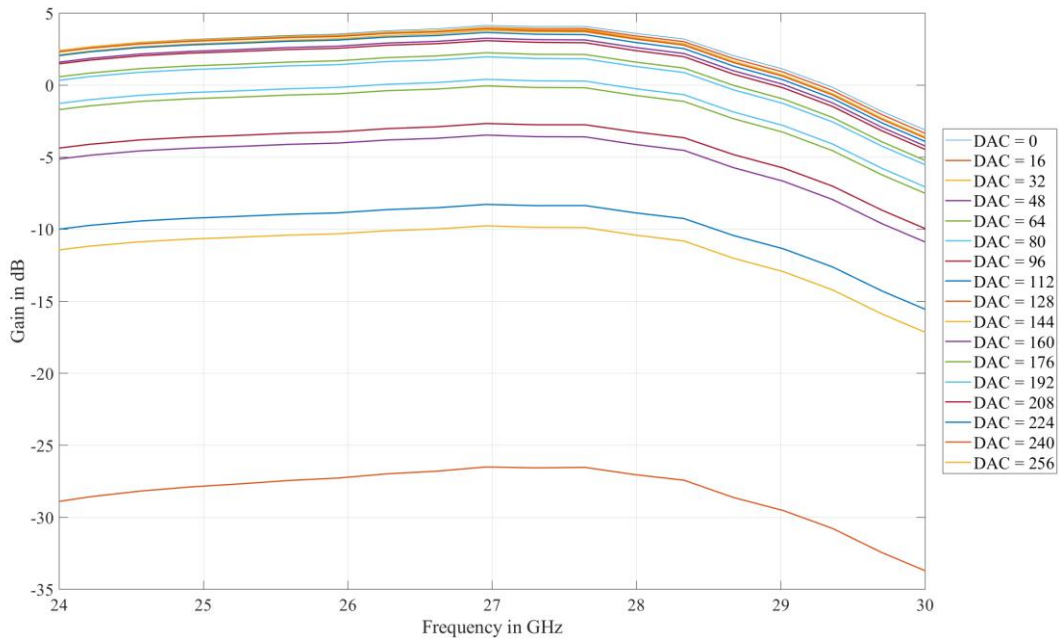


Abbildung 20: Messungen des Empfängerpfades bei konstanter RF Eingangsleistung über die IF Frequenz aufgetragen



**Abbildung 21: Messungen des Sendepfades bei konstanter IF
Eingangsleistung über die RF Frequenz aufgetragen**

Getestet werden die ICs mit den entwickelten Test-Boards. Im Blockdiagramm werden diese als DUT (Device Under Test) dargestellt. Die im Setup enthaltenen Instrumente ermöglichen die Charakterisierung aller spezifizierten Parameter von BM- und UD-ICs: N5225A-Netzwerkanalysator, N5244A-Spektrumanalysator, DSOS 404A-Oszilloskop, N5183B MXG-Analogsignalquelle und ein N1911A-Leistungsmesser.

Die Testumgebung zur Charakterisierung der Grundfunktionen des BM und UD ICs ist in Abbildung 22 in einem Blockdiagramm dargestellt.

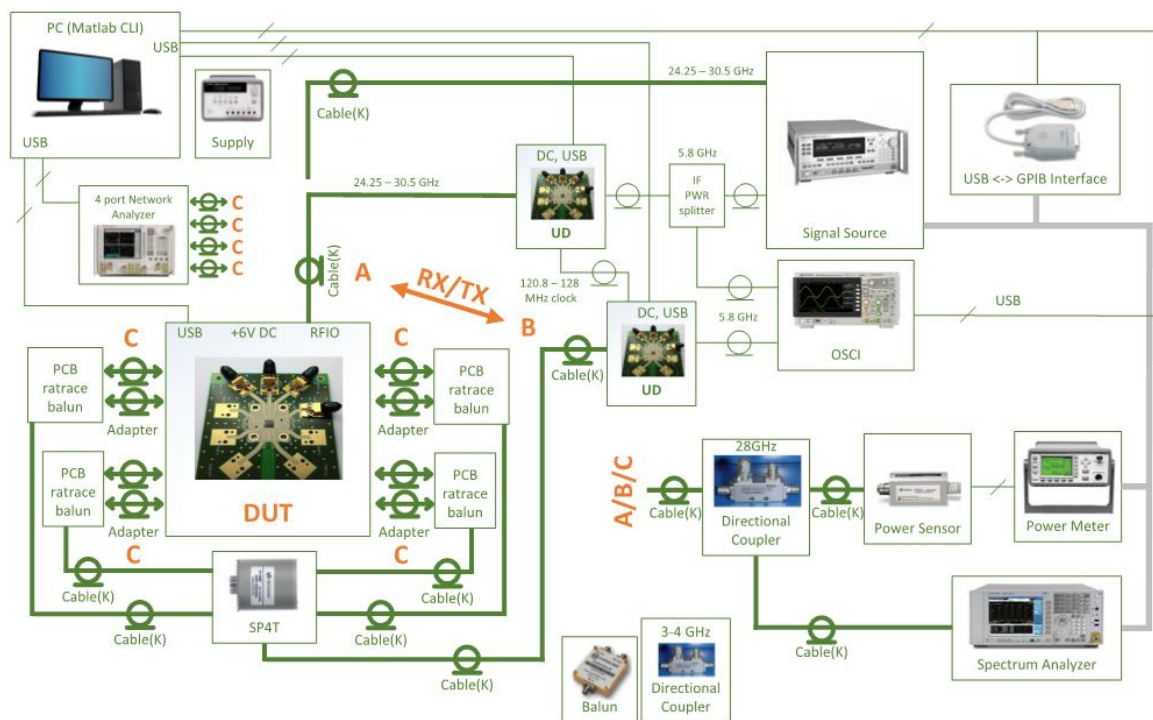


Abbildung 22: Testumgebung zur Charakterisierung der Grundfunktionen des BM und UD ICs

Diese Testumgebung wurde in einer Matlab-Umgebung mithilfe von manuellen Befehlsätzen (CMD) automatisiert. Die Automatisierungsskripte wurden teilweise entwickelt. Das Setup ist so konzipiert, dass es sehr flexibel ist und für verschiedene Arten von Messungen neu konfiguriert werden kann, einschließlich der Wiederverbindung von physischen Schnittstellen, die mit A, B und C im Diagramm markiert sind.

Für die Kommunikationsfunktionen auf Systemebene von BM- und UD-ICs und / oder Frontend-Modulen ist eine Testumgebung entwickelt worden, welche in Abbildung 23 dargestellt ist. Das Setup ermöglicht unter Verwendung einer Kombination aus Keysight-Instrumenten und -Software die Durchführung frühzeitiger, unabhängiger Tests der Systemleistung. Diese Tests können für alle von Infineon innerhalb des AMMCOA-Projekts zu entwickelnden Hardwareelemente, welche aus UD- und BM-ICs, mm-Wellen-Einheiten und Frontend-Modulen bestehen, durchgeführt werden. Softwareplattformen wie der M9099 Waveform Creator oder das flexiblere SystemVue werden für die Single-Carrier- oder OFDM-Wellenformgenerierung verwendet und in den M8190A Arbitrary Waveform Generator heruntergeladen. Letzterer liefert das zur Durchführung der Messungen notwendige ZF-Signal. Das DSOS 404A Oszilloskop wird zum Abtasten des empfangenen Signals verwendet, welches durch den zu testenden Kanal läuft und die 89600 VSA- oder SystemVue-Software wird für die Demodulation und Analyse verwendet.

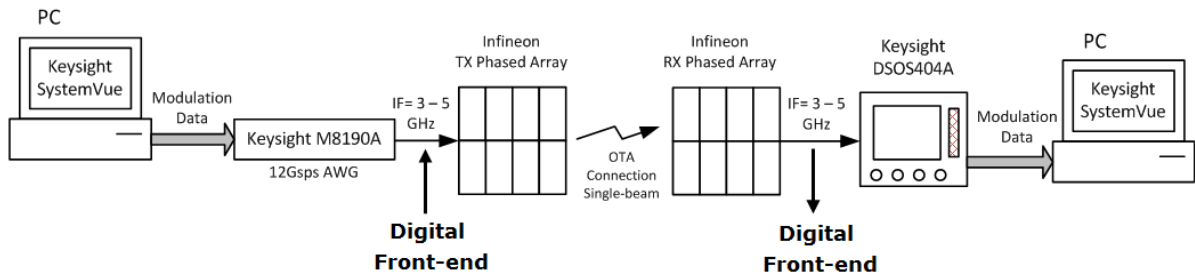


Abbildung 23: Testumgebung auf Systemebene aller Komponenten

Die komplette Testumgebung für die Basisfunktionalität des mmWave-Frontend-Moduls (einschließlich OTA-Messungen in der reflexionsfreien Kammer) wurde erstellt.

Die mmWellen Frontend Module wurde in zwei verschiedenen Setups getestet:

- 1) Labor Messaufbau mit einzelner Hornantenne
- 2) Antennen Messkammer von einem externen Anbieter

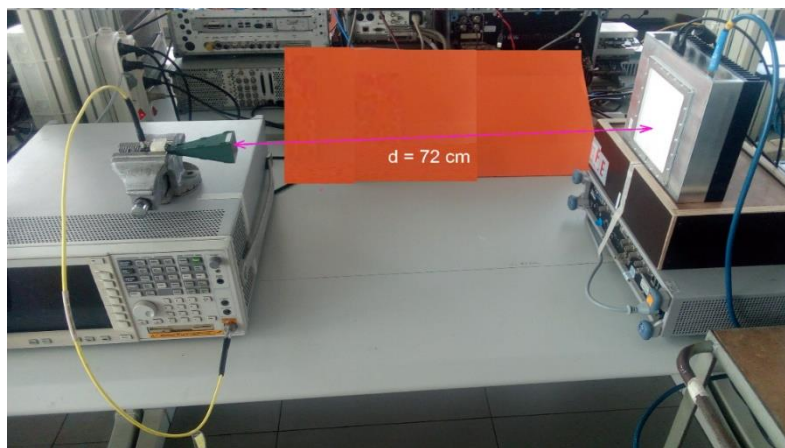


Abbildung 24: Labor Messaufbau mit einzelner Hornantenne

Die FEM teilt sich in zwei Versionen auf, V1 mit einem analogen Eingang für modulierte Daten auf Niederfrequenz und V2 mit einem IF Eingang, bei dem die Modulation auf einer IF von 5.8GHz vorhanden ist. Die Lieferung für das finale System baut auf dem FEM V2 auf, diese beinhalten auch die finalen Versionen der für dieses System entwickelten Bausteine (IC).

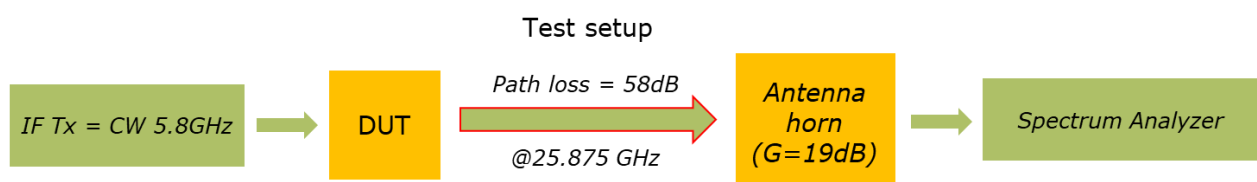


Abbildung 25: Pegelplan der Teststrecke für die Validierung der FEM Funktion

Die zur Charakterisierung der Leistungsfähigkeit des Beamformings einer mmWave FEM Antenne notwendige Testumgebung ist in Abbildung 26 dargestellt. Der Aufbau erlaubt das Messen eines Phased-Array Antennendiagramms mit einer hohen Winkelauflösung bis zu 0.1° . Basierend auf Rohde&Schwarz Messgeräten mit einem Vector Network Analyzer ZVK40 als Kernkomponente erlaubt der Aufbau aufgrund seiner Rekonfigurierbarkeit, Messungen von RX wie auch TX Antennendiagrammen. Die Absorberkammer (Compact Range Chamber) der Hochschule München wurde gemietet. Abbildung 27 zeigt das FEM v1 bei einer Messung in der Kammer.

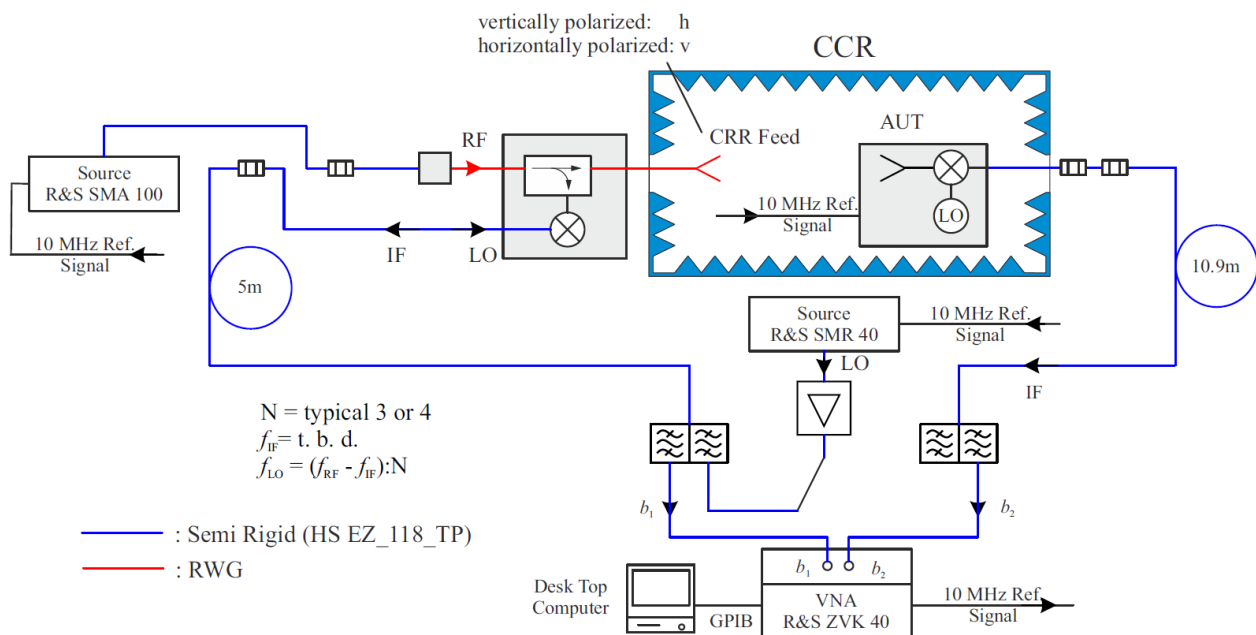


Abbildung 26: Blockdiagramm der Testumgebung für FEM Antennendiagramme

Im Laufe des Projekts wurden die Testumgebung für den Up-Down Converter (UD) Chip (IC), der Beamformer (BM) und das mmWelle Frontend Modul (FEM) entwickelt und aufgebaut. Dabei wurden die UD und BM Chips mit der identischen Labor Messausstattung im gleichen Aufbau unter Zuhilfenahme von MatLab Automatisierungs-Software getestet.



Abbildung 27: Anechoic CCR Kammer für die Antennenabstrahlanalyse

Die im FEM V2 getesteten Eigenschaften im Sende Fall beinhalten das Phasenrauschen, welches einen maßgeblichen Einfluss auf das EVM des Gesamtsystem hatte und ein wesentlicher Anlass für das Redesign von BGT28UD auf BGT28MP war. Die abgestrahlten Leistungen, bezogen auf verschiedene Bereiche der Antenne (Cluster) und der einzelnen Träger, sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

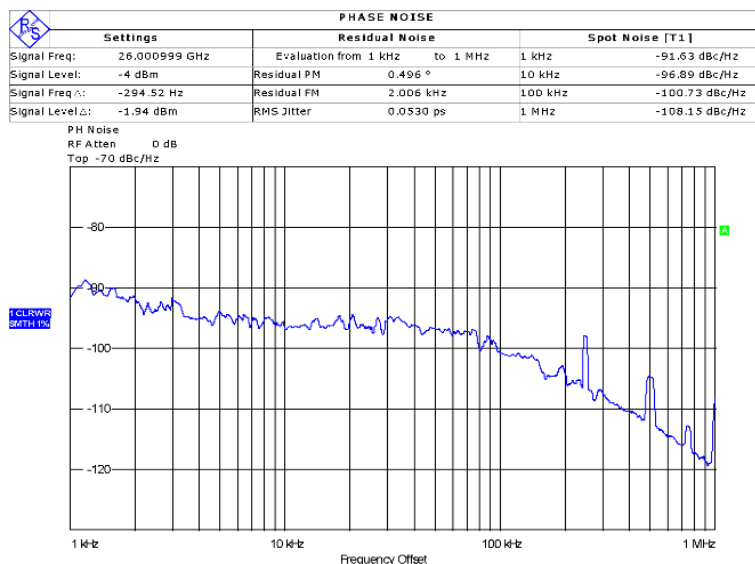


Abbildung 28: Phasenrauschen des Signales, erfüllt die Anforderungen

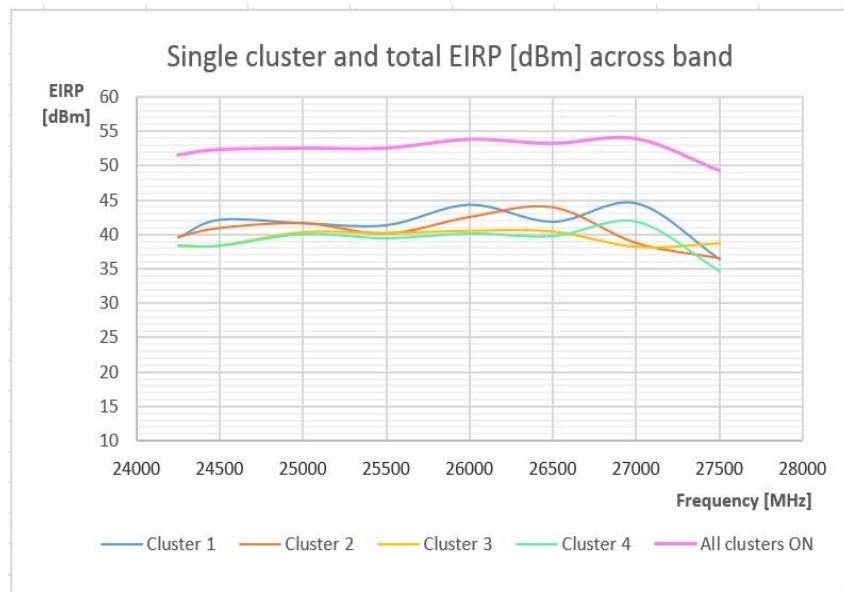


Abbildung 29: EIRP @ 1dB, abgestrahlte Leistung in 1dB Leistungskompression

Mit dem gewählten Antennendesign wird eine ausreichende abgestrahlte Leistung EIRP erreicht, um die für die Anwendung gewünschte Abdeckung abzusichern.

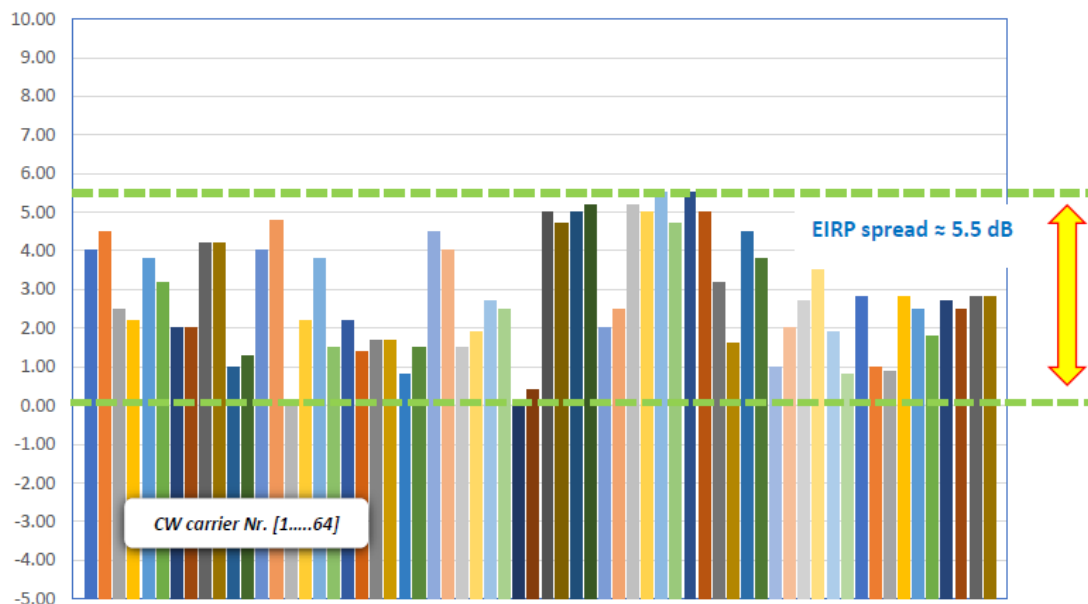


Abbildung 30: Abgestrahlte Leistung in Abhängigkeit der Träger

In Abbildung 30 ist die EIRP aufgetragen über den Träger (CW), mit noch unkalibriertem FEM V2 Modul.

- Skalierung 1dB/dev

- Frequenz = 25.875 GHz
- IF Pin = -15dBm (5.8 GHz)
- TX IF VGA = -10

Zu beachten ist dabei, dass die Y-Achse nicht den absoluten Wert repräsentiert. Vielmehr stellt die 0 das Element mit der niedrigsten abgestrahlten Leistung dar. Die Verstärkung wurde für jeden Kanal gleich gewählt.

Die im FEM V2 getesteten Systemeigenschaften im Empfänger Fall fokussieren sich auf die Verstärkung der Kette. Diese wurde mit einer Pegelmessung am IF Ausgang gemessen und über der Frequenz in der HF aufgetragen. Alle Antennencluster waren bei dieser Messung aktiv.

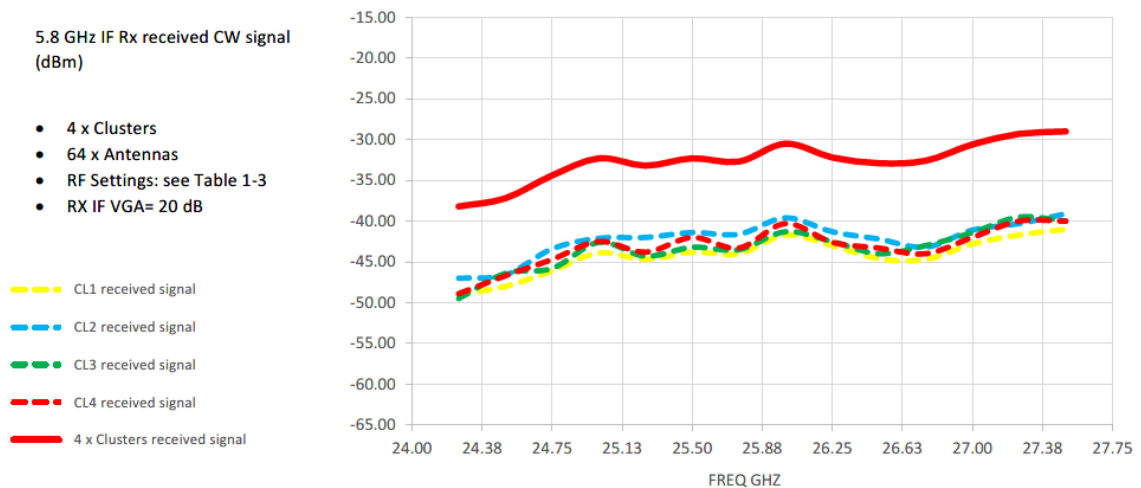


Abbildung 31: Eingangsleistung gemessen am IF Ausgang bei konstanter Leistung an der Antenne über Frequenz

In Abbildung 32 sind die im Aufbau der FEM V2 getestete Charakteristik der Antenne dargestellt. Diese Werte wurden hier noch in einem nicht kalibrierten System ermittelt. Dennoch konnte auch mit bestehenden default Werten eine ausreichend reproduzierbare und verwertbare Abstrahlungscharakteristik erreicht werden.

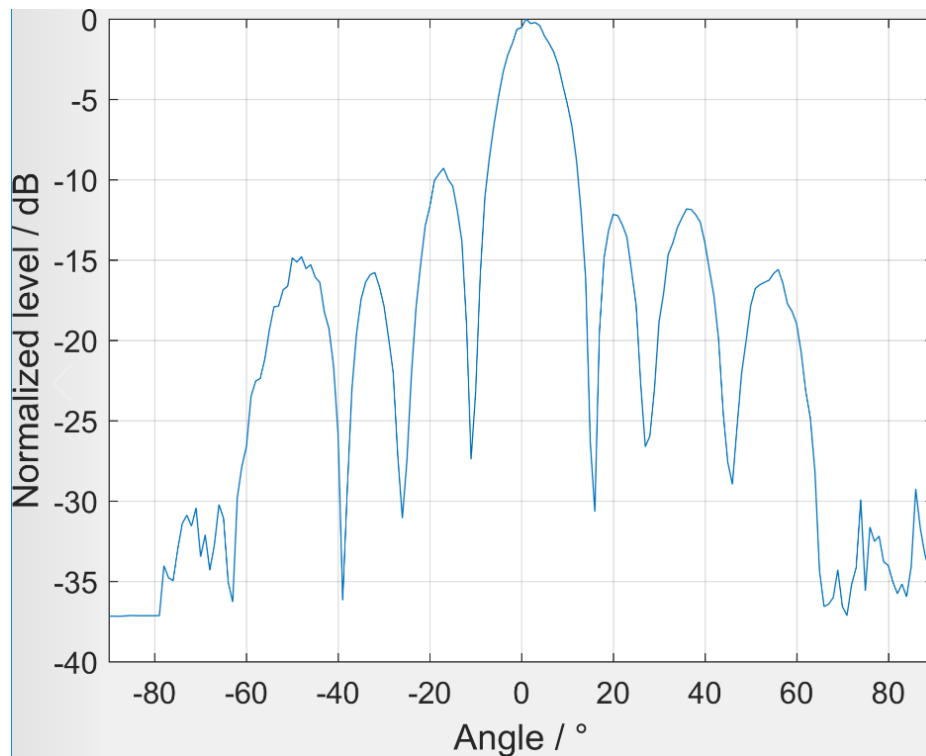


Abbildung 32: Unkalibrierte Beam Messung, die Abstrahlung in den Seiten sind bereits mit default Werten nutzbar

2.1.5 AP5 Inbetriebnahme der 5G-Inselinfrastruktur

Eine erste Version des mmWave Frontendmoduls wurde den Projektpartnern für erste Versuche zur Verfügung gestellt. Die Charakterisierung der ersten Version des Frontendmoduls wurde in der dafür entwickelten Testumgebung durchgeführt (einschließlich reflexionsfreier Kammer). Darauf aufbauend wurde eine automatisierte Phasenkalibrierung basierend auf Messergebnissen in einer reflexionsfreien Kammer erarbeitet.

Die Abbildung 33 zeigt ein Foto der ersten Version des mmWave FEM. Die interne Platinenanordnung, das Gehäuse und die passive Kühlung sind in Abbildung 34 dargestellt. Das FEM umfasst das Motherboard und die HF Platine verbunden durch die zwei in der Abbildung rot dargestellten Multi-Pin Stecker. Die HF Platine beherbergt 4 Up-Down Konverter und 16 Beamformer ICs auf der Rückseite. Diese wiederum speisen, wie in Abbildung 35 gezeigt, ein Array mit 64 Antennenelementen auf der Platinenvorderseite. Ein passiver Aluminium Kühlkörper ist über eine Öffnung im Motherboard mit der Rückseite der ICs thermisch verbunden und führt die Wärme über Kühlrippen am Gehäuse ab.



Abbildung 33: Die erste Version des FEM

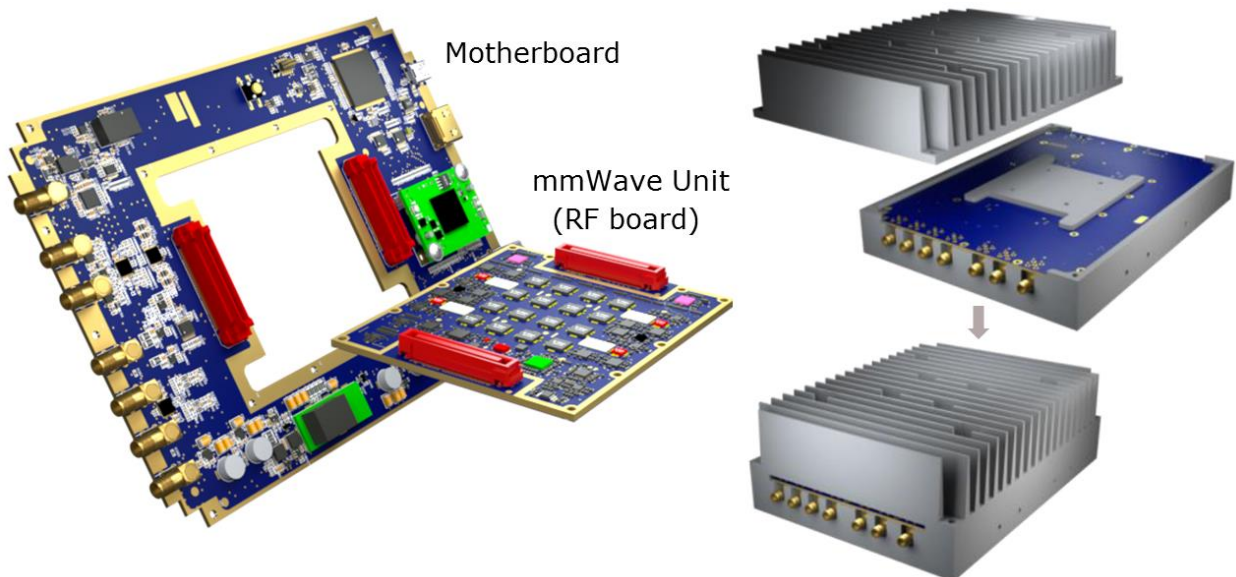


Abbildung 34: Interner Aufbau der ersten Version des FEM

Die erste Version des FEM teilt sich ein ähnliches Design Konzept mit dem FEM v2, hat aber ein vereinfachtes Design, um eine frühzeitige FEM Konzeptevaluierung durch Infineon und dem AMMCOA Konsortium durchzuführen. Die Messergebnisse des FEM v1 bewiesen, dass die Schlüsselentscheidungen korrekt getroffen wurden.

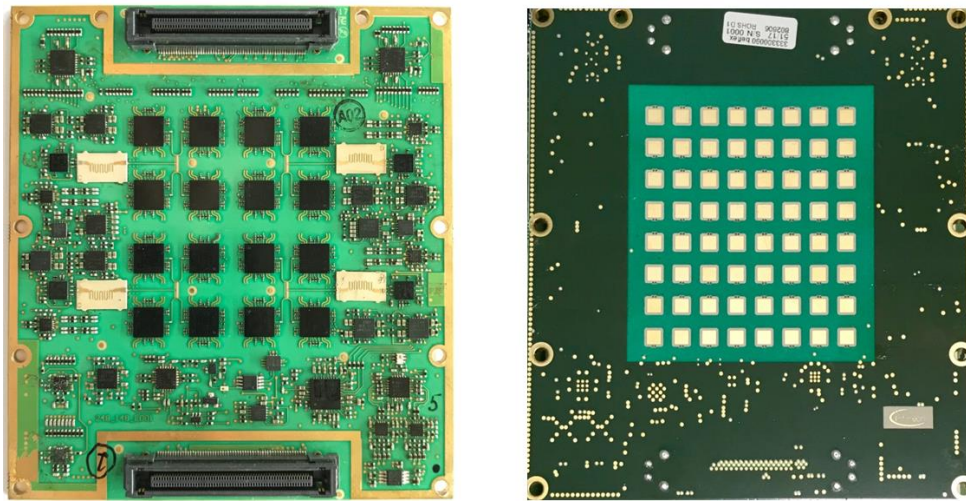


Abbildung 35: mmWave Einheit (HF Platine) der FEM v1

Abbildung 36 zeigt das Ergebnis der Messung des Antennendiagrammes des FEM v1 Phased Array. Die Messergebnisse wurden mit der oben beschriebenen Testumgebung erzielt. Die gemessenen Diagramme bestätigen die hohe Genauigkeit der Beam Steuerung in einem weiten Frequenzbereich von 2GHz, die hohe Leistung der Antennenkreuzpolarisation unter -30dB und die Nebenkeulen nahe den theoretischen Pegeln.

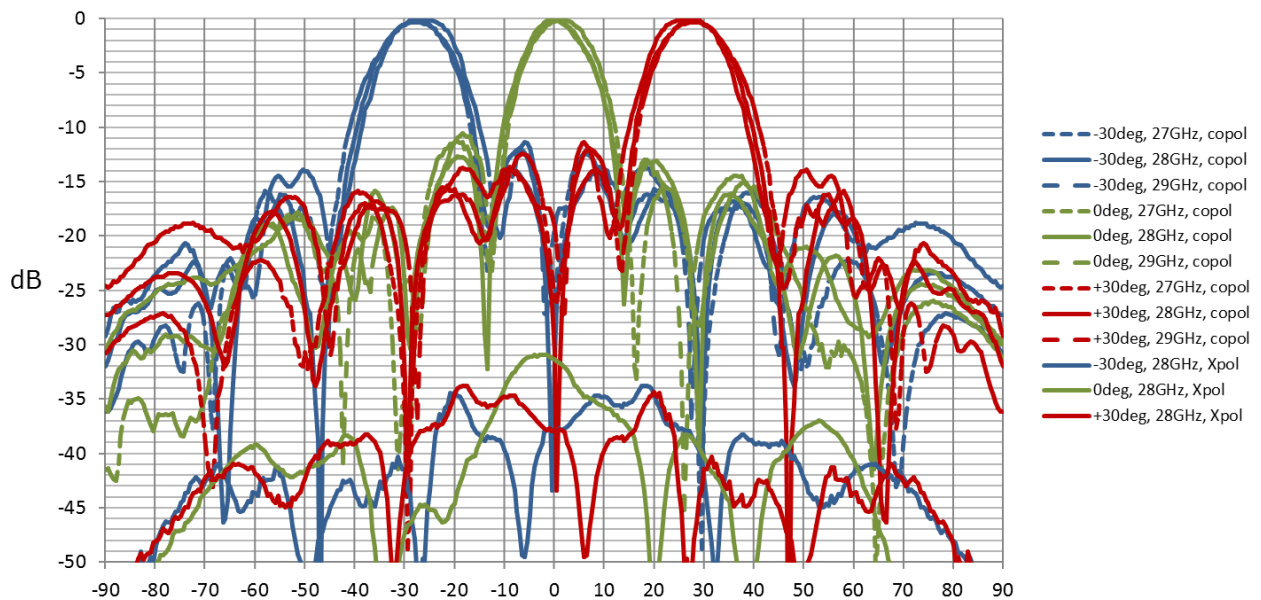


Abbildung 36: Normalisiertes FEM v1 Antennendiagramm, RX, 27-29 GHz, E-Ebene

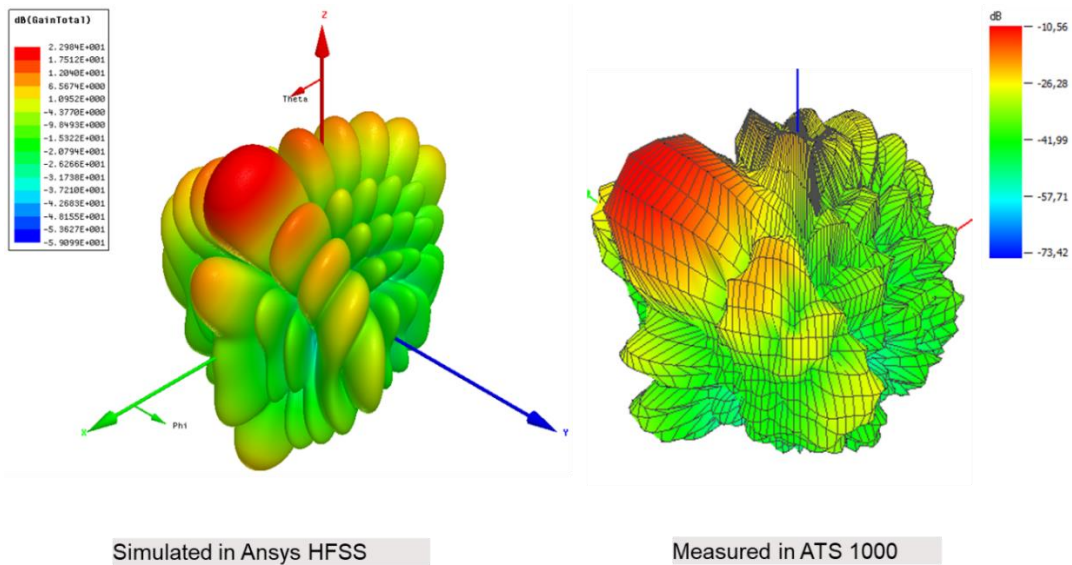


Abbildung 37: Simulierte und gemessene Abstrahlcharakteristik des FEM

Weitere 10 FEM und 2 CU wurden aufgebaut, so dass in Summe alle Komponenten für 3 komplette Systeme zur Verfügung gestellt werden konnten. Jede Einheit wurde für sich auf Funktionalität getestet und mit entsprechenden Kabeln für die Verbindung von Ansteuersignalen und RF Signalen bereitgestellt. Neben der Bereitstellung der Hardware-Komponenten war die Kalibrierung der FEM V2 Module eine weitere wichtige und notwendige Aufgabe, sowie die vollständige Inbetriebnahme des Gesamtsystems. Aufgrund der verspäteten Verfügbarkeit der FEM und der Komplexität der Kalibrierung wurde diese Aufgabe erst in den letzten Monaten der Projektlaufzeit durchgeführt.

Entsprechend der Definition des Gesamtsystems der mmW Anlage als Teil einer mobilen Station musste zusätzlich zu den Frontend-Modulen auch eine Central Unit für die Verteilung der Datensignale und Kontrollsignale entwickelt und aufgebaut werden. In den folgenden Abbildungen ist die Central Unit dargestellt.

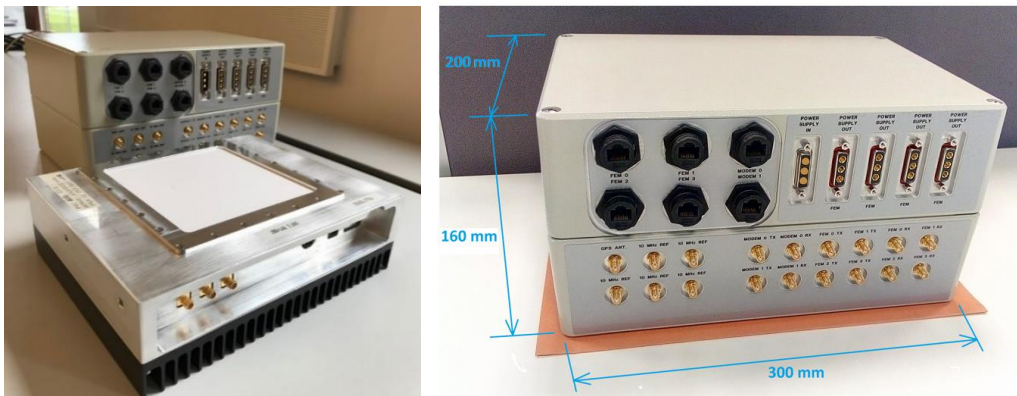


Abbildung 38: Central Unit und ein FEM V2

Nach dem Aufbau der 3 Central Units wurden Funktionstests durchgeführt, um die generelle Einsatzbereitschaft des Gesamtsystems zu verifizieren und mögliche Fehler noch im Labor beheben zu können.

Die folgenden Ergebnisse der Funktionstests der CU zeigen die Bandbreite und die Verluste für die Schaltunit. Die Werte zeigen ausnahmslos die erwartete Performanz der Komponenten.

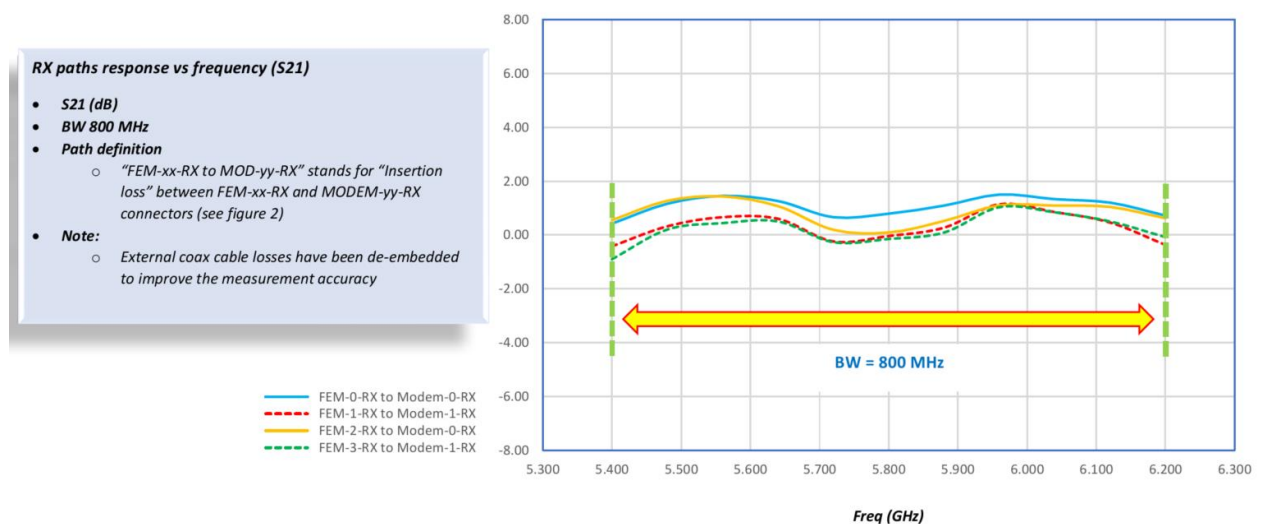


Abbildung 39: CU RX Pfad Frequenzgang über die Datenbandbreite von 800MHz

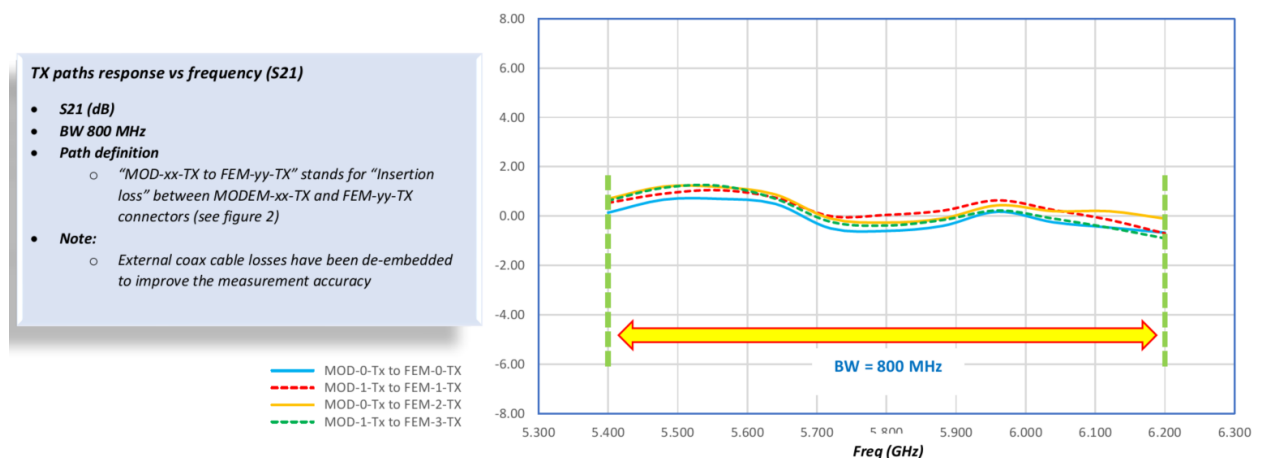


Abbildung 40: CU TX Pfad Frequenzgang über die Datenbandbreite von 800MHz

Mit der Herstellung der notwendigen 3 Central Units und 12 FEM V2 konnten die Hardware Vorbereitungen am mmWave Frontend für den Demonstrator abgeschlossen werden. Die weiteren Arbeiten bezogen sich dann auf die Gesamt-Systemintegration.

Aufgrund des in AP 2 beschriebenen Paradigmenwechsels **von zentraler hin zu dezentraler Datenverarbeitung/Kommunikation** könnte die geplante **frühe Entwicklungsplattform** den jetzt verfolgten Systemansatz nur in unzureichender Weise abbilden und wurde deshalb von den Projektpartnern nicht mehr benötigt. Die Arbeit an der frühen Entwicklungsplattform und der zugehörigen internen/externen Schnittstellen seitens STW (AP5b) wurden zu Gunsten von Analysen und Vorversuchen zum neuen Systemansatz in Kooperation mit den Projektpartnern zunächst herausgezögert. Ergebnis eingehender Analysen war, dass stattdessen ein dezentraler Systemansatz weiterverfolgt werden soll.

Die folgende Abbildung 41 zeigt eine Übersicht der von STW und den Projektpartnern für die OBU beigesteuerten Komponenten.

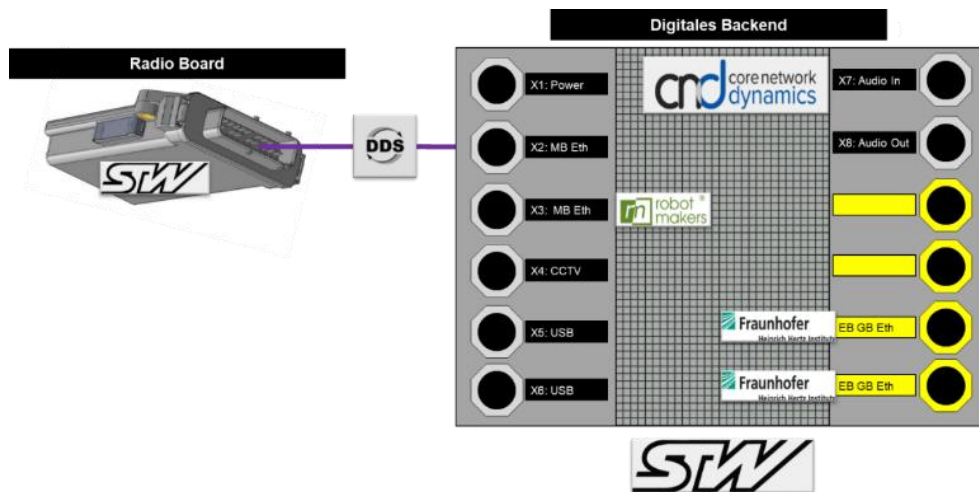


Abbildung 41: Mechanische Übersicht der von STW beigesteuerten Komponenten.

Aufbauend auf die Vorarbeiten erfolgte die Entwicklung des mechanischen Designs sowie der Hardware-Schaltpläne und -Layouts für das digitale Backend der OBU. In Abbildung 42 wird die Hardware-Architektur für das digitale Backend gezeigt.

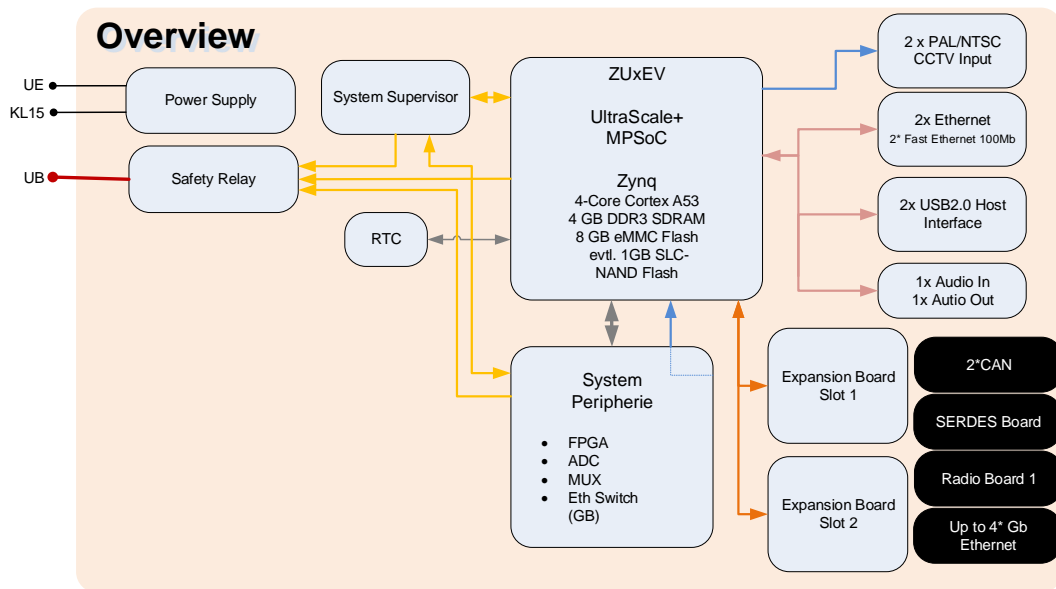


Abbildung 42: Übersicht Hardware-Architektur der OBU Komponente "Digitales Backend"

In einem ersten Schritt wurde für die Grundlagenuntersuchungen und erste Funktionstests ein Ultrascale+ Evaluationsboard des Herstellers Xilinx beschafft und die von STW entwickelte Software implementiert. Die aus dem Radio-Board und dem Evaluationsboard bestehende Testumgebung wurde anschließend bei STW aufgebaut, initialisiert und in Betrieb genommen. Darauf aufbauend wurden Untersuchungen, unter anderem zur Verifikation der externen und internen Schnittstellen, usw. bei STW durchgeführt. Abbildung 43 zeigt links (weißes Gehäuse) das von STW entwickelte Radio-Board sowie rechts das Ultrascale+ Evaluationsboard.



Abbildung 43: Digitales Backend und Radio Board für die OBU.

Auf Basis der Ergebnisse aus den Grundlagenuntersuchungen wurde das Hardware-Konzept für das digitale Backend weiter detailliert und entwickelt. Abbildung 44 zeigt die Architektur für die von STW im AMMCOA Projekt für die OBU geplanten Hardware-Komponenten

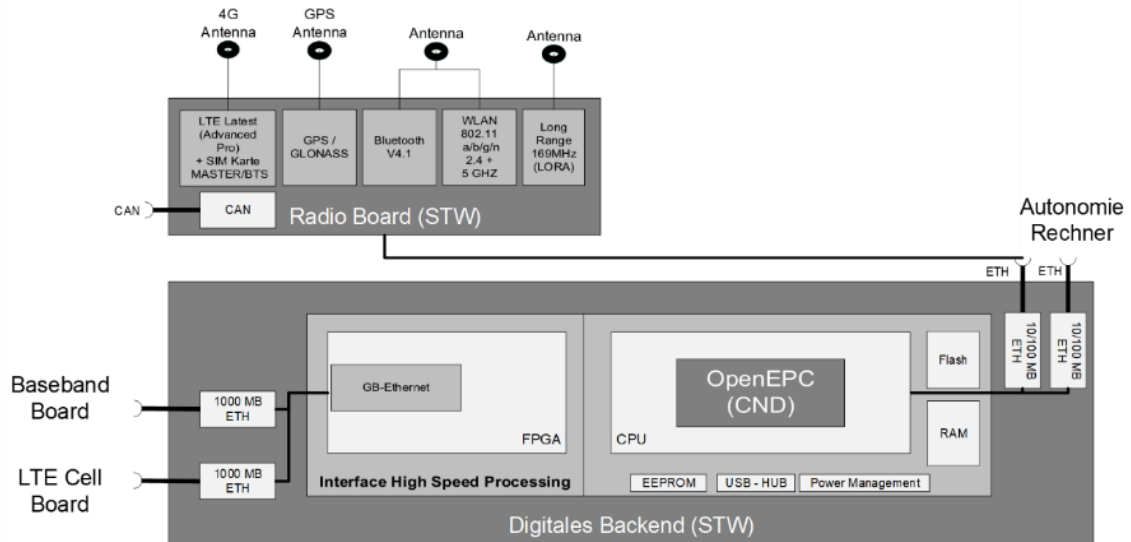


Abbildung 44: HW-Architektur für die OBU Komponenten: Radio Board und Digitales Backend

Aufbauend auf dem zuvor ausgearbeiteten Konzept erfolgte die Entwicklung der elektronischen Schaltungen und Layouts sowie die Analyse und Auswahl der elektronischen Bauteile wie CPUs, FPGAs, Hardware für die Implementierung der Schnittstellen usw.

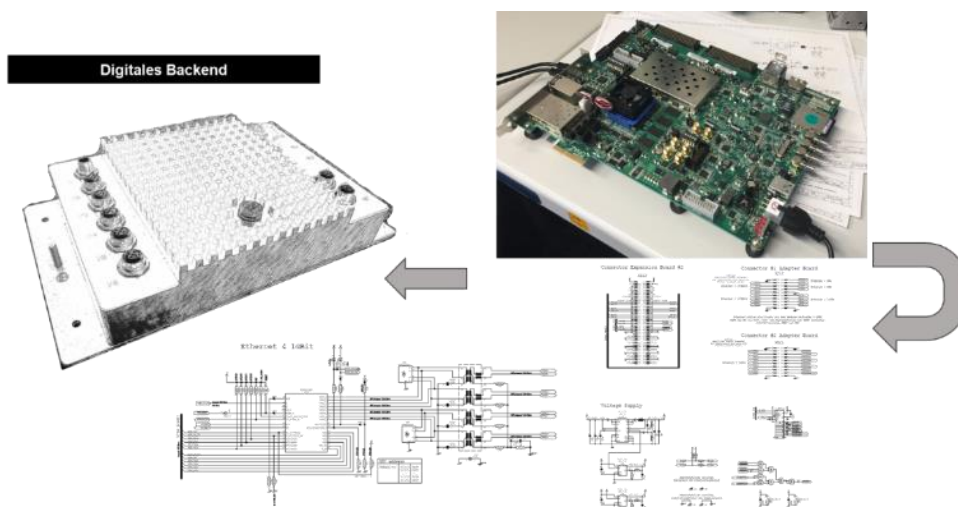


Abbildung 45: Digitales Backend

Im Projektverlauf wurde das Hardware-Testmuster für das digitale Backend fertig gestellt (siehe Abbildung 45). Für das Radio-Board wurde ein entsprechendes Schaltungsdesign und Layout entwickelt (siehe Abbildung 46).

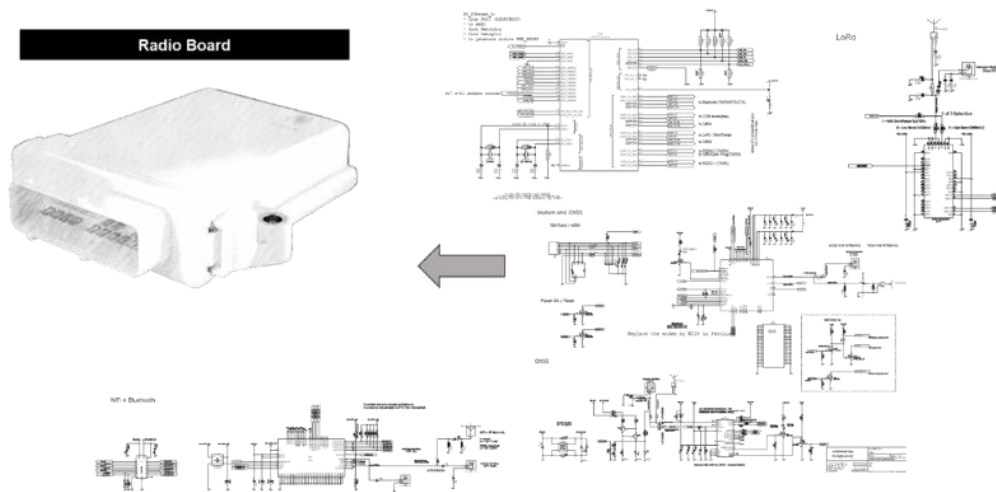


Abbildung 46: Radio-Board

Ein weiterer Arbeitspunkt war die Konzeption und Entwicklung der mechanischen Konzepte für das Radio-Board und Digitale Backend der OBU. Die Ergebnisse werden in Abbildung 47 gezeigt.

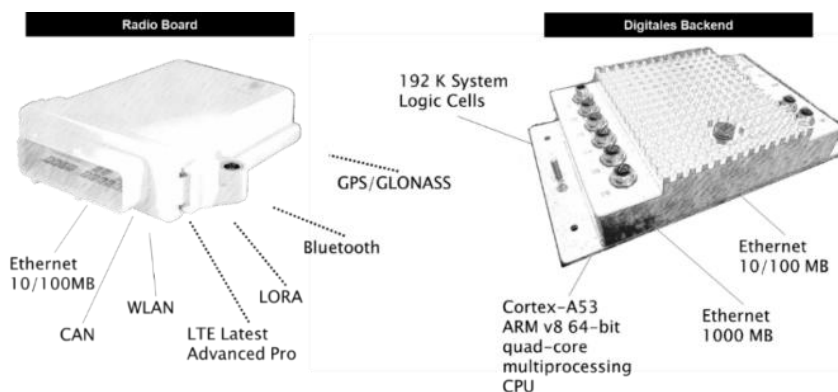


Abbildung 47: Mechanische Konzepte für die OBU-Komponenten: Radio-Board und digitales Backend

Das Roboter Operation System ROS 2.0 wurde zunächst mit einer DDS Library konzeptionell auf dem bereits bei STW verfügbaren Funk-Kommunikationsmodul TC3G implementiert und

verifiziert. Die Tests zeigten gute Ergebnisse. Lediglich die Performance des TC3G genügt nicht den Anforderungen für den produktiven Betrieb. Hier haben die im Projektverlauf mit der für das Radio-Board ausgewählten CPU durchgeführten Testreihen gezeigt, dass wir mit dem neu im AMMCOA Projekt entwickelten Radio-Board die Performanceanforderungen erfüllen werden.

Als weiterer wichtiger Hardware-Baustein wurde der für das Echtzeit-Datenmanagement ausgewählte DDS Stack von TWINOAKS erfolgreich in Bezug auf die im AMMCOA Projekt geforderten Funktionalitäten und Performance hin geprüft. Innerhalb des echtzeitfähigen Systems einer Mobilen Maschine bzw. eines Maschinenschwarmes müssen vom System erzeugte bzw. erfasste Daten den anderen relevanten Komponenten bzw. mobilen Maschinen echtzeitfähig zur Verfügung gestellt werden. Die im Projektverlauf durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass das ausgewählte DDS von TWINOAKS diese Performance-Anforderung für die im Fokus des Projektes stehenden Anwendungen erfüllt.

Ebenfalls wurde das von der Firma Finroc angebotene Roboter-Framework erfolgreich in Bezug auf die im AMMCOA Projekt geforderten Funktionalitäten und Performance getestet. Hierzu wurde das FINROC Robotik Framework mit dem Projektpartner Robot Makers GmbH erfolgreich auf einem aktuellen Display VSX von STW implementiert. Die Evaluation des Finroc Roboter-Framework erfolgte mit einer vereinfachten Algorithmik für die Bahnplanung der im Fokus des FuE-Projektes stehenden Anwendungen Straßenfertiger und Tandemwalze. Bei diesen Testreihen war noch nicht die Erfassung der Umwelt in die Algorithmik eingebunden (siehe Abbildung 48).

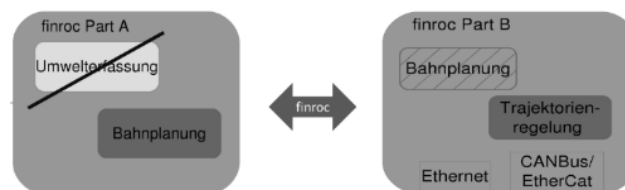


Abbildung 48: Vereinfachte Algorithmik z.B. ohne Umwelterfassung

Einen weiteren Arbeitspunkt bildete die Untersuchung einer geeigneten seriellen Datenübertragung zwischen zwei parallelen Endpunkten mittels ultraschneller Backbone Kommunikationstechnologien. Hierzu wurde im Projektverlauf die Kommunikation am Beispiel einer konkreten, anspruchsvollen Anwendung untersucht, bei der die Ansteuerung und Sensor-Datenauswertung über die Schnittstelle auf dem Digitalen Backend realisiert wird. Hierzu

wurde ein einfaches Display ohne Intelligenz verwendet und wie im Praxisbeispiel über die CPU-Plattform des zuvor genannten Display SoC angesteuert. Der im AMMCOA Projekt favorisierte SERDES- (Serialisierer/Deserialisierer-) basierte Lösungsansatz eignet sich auch für zukünftige mmW-Frontend Anwendungen im Kontext des Digitalen Backends. Hierbei ist die Überbrückung längerer Strecken mit LVDS-Serialisierer/Deserialisierer ein wichtiger Erfolgsfaktor. Denn die Übertragung erfolgt über ein differentielles Leitungspaar (STP) mit bis zu 15 m Kabellänge. Diese Technologie erlaubt zusätzlich sogar die Übertragung von I2C-Bus Daten und GPIOs zu Konfigurationszwecken über das differentielle Leitungspaar (siehe Abbildung 49).

Aufgrund der komplexen Aufgabenstellung und Problemen mit dem MAXIM Treiber waren die Entwicklungsarbeiten zur Realisierung der seriellen Datenübertragung deutlich aufwändiger als ursprünglich in unserem Antrag geplant.

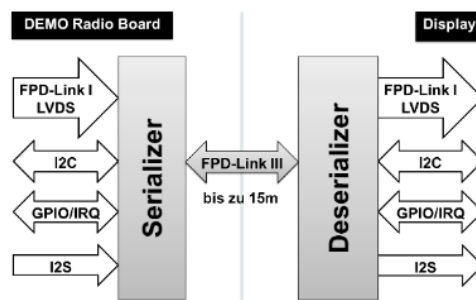


Abbildung 49: Schematische Darstellung der hochperformanten Serialisierer/Deserialisierer-basierten Schnittstelle zwischen Digitalem Backend und Display

Abbildung 50 zeigt den Messaufbau für EMV-Untersuchungen an der hochperformanten SERDES (Serialisierer/Deserialisierer) Schnittstelle.

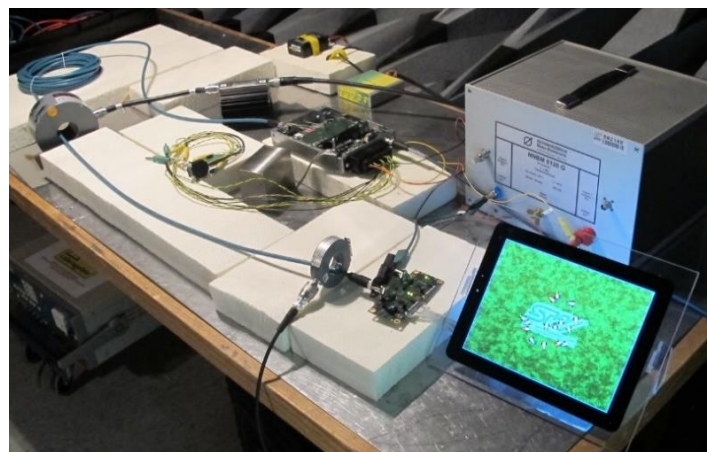


Abbildung 50: EMV Messung der SERDES Schnittstelle

Im Projektverlauf wurden weiterhin Entwicklungsarbeiten zur Erforschung des Einsatzes von Linux-basierten Systemen für eine zuverlässige Steuerung in der Hochautomation durchgeführt. Eine OBU einer hochautomatisierten Mobile Maschine muss zusätzlich zu den hohen Rechenleistungen auch zukünftig hohe Zuverlässigkeitsanforderungen erfüllen.

Im Rahmen dieses Teilarbeitspaketes beteiligte sich STW als Review Partner eines Open-source Projekts mit dem Ziel, ein generisches Linux Betriebssystem zu entwickeln, welches die Anforderungen von Sicherheitsnormen erfüllt. Unsere Auswertung der Ergebnisse ergab, dass Linux Betriebssysteme aufgrund der unzureichenden Kompatibilität mit den geforderten Safety-Normen nicht für den Einsatz in Mobilien Maschinen geeignet sind.

Aufbauend auf den Schaltplänen und –Layouts sowie der Hardwarearchitekturen und Testergebnissen wurde im Anschluss das erste Hardwaremuster für das Radio-Board realisiert und die Versuchsmuster des digitale Backend (DBE) der OBU sowie des Radio-Board softwareseitig initialisiert und getestet.

Beim Projektpartner Fraunhofer HHI wurde das Radio Board in die für AMMCOA vorgesehene Mobilfunkzelle integriert und einem Schnittstellentest unterzogen. Man konnte vom Laptop via Radioboard und Zelle Internetseiten anpingen. Dieser wichtige funktionale Test wurde erfolgreich absolviert.



Abbildung 51: Versuchsaufbau des Schnittstellentests des Radio Board der OBU beim Fraunhofer HHI

Diese relevante Schnittstelle dient zur Kommunikation der Fahrzeuge mit der autonomen 5G Insel. Gelöst werden soll diese Anforderung durch die Integration einer Radio Board Komponente in die OBU. Im Versuchsaufbau wurde die Radio Board Einheit mit einem Laptop via Fast Ethernet (10/100Mbit) Datenschnittstelle angeschlossen. Diese Schnittstelle wurde auch im Demonstrator verwendet, um mit den anderen OBU Komponenten zu kommunizieren. Durch die im Radioboard implementierte Kommunikationslösung, für das LTE Band B28-A, sowie der speziell für AMMCOA Konfigurierten SIM Karten, kann nun mit der aufgespannten 5G Insel (LTE Zelle supported by HHI) eine Verbindung aufgebaut werden. Zusätzlich wurde die LTE Zelle mit dem Internet angeschlossen. Abschließend konnte mit dem Laptop welches am Radio Board angeschlossen ist, über die HHI LTE Zelle eine Internetverbindung mit dem WWW realisiert werden.

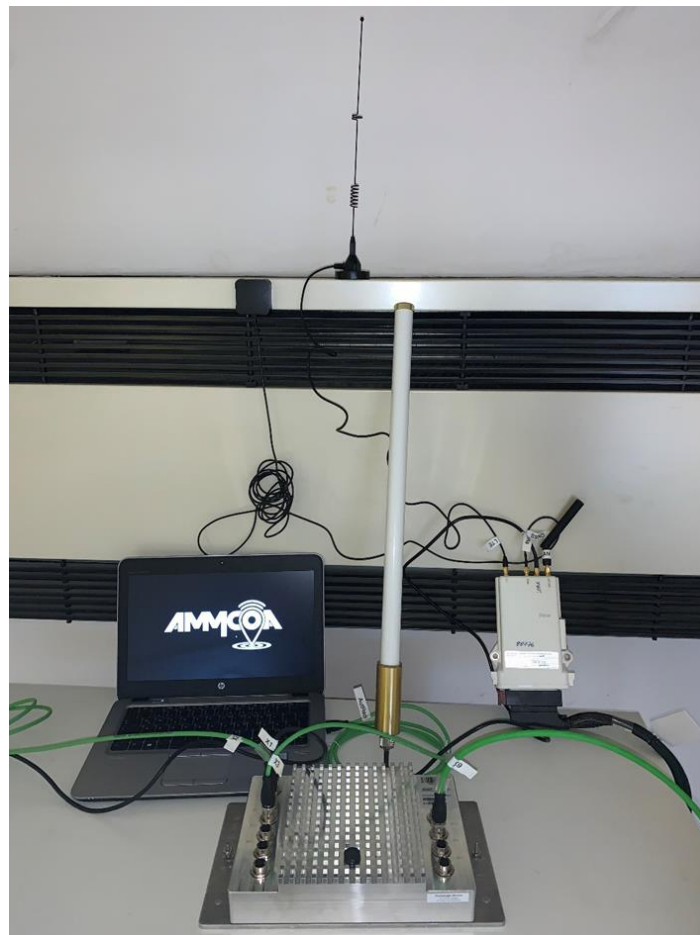


Abbildung 52: HW der OBU Komponenten DBE und Radioboard mit den notwendigen Antennen. Laptop soll die Autonomie Recheneinheit der Projektpartner darstellen.

Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass übergeordnete Systemanforderungen von den beiden Partnern HHI und STW hinsichtlich korrektem Frequenzband und SIM Karten Konfiguration korrekt umgesetzt wurden.

Weiterhin stellten sich bei den durchgeführten Tests und Untersuchungen jedoch folgende Anomalien heraus.

- EMV Eigenstörungen auf dem GB Ethernet Interface des DBE
- Bei Kommunikation dieser notwendigen schnellen Kommunikation können andere HW Module so sehr gestört werden, dass manchmal das DBE die Initialisierung nicht durchführen kann und einen Reset erzeugt.
- Die Leistungsaufnahme des SoC ist größer als angenommen
- Bei längerem Betrieb führt die Leistungsaufnahme zu einem Temperaturpeak innerhalb des Gehäuses, diese Temperatur liegt außerhalb der zulässigen SoC Spezifikation. Das DBE musste somit in einigen Elektronikschaltungen und bzgl. des Wärmemanagements (Wärmeanbindung/ Kopplung) nachgearbeitet werden.

In der Folge wurde die OBU Komponente DBE dem notwendigen Redesign zur Beseitigung der identifizierten Probleme und Einschränkungen unterzogen.

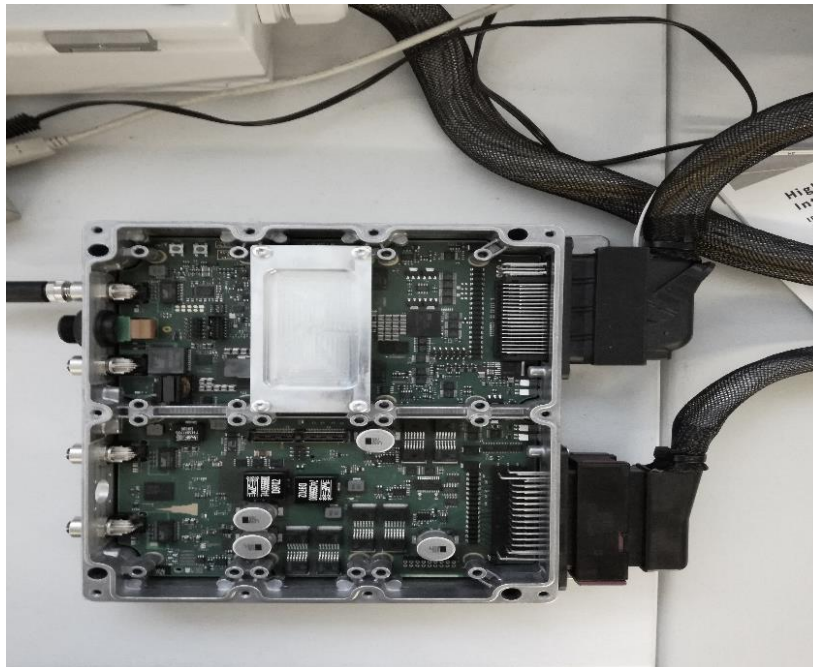


Abbildung 53: Neues Mechanik-Konzept für ein verbessertes Wärmemanagement.

Die redesignten und überarbeiteten Hardwaredemonstratoren des DBE der OBU für AMMCOA wurden unter teilweise Einsatz fremdbeschaffter Komponenten im März 2020 den Projektpartnern für Ihre FuE-Arbeiten, zur Verfügung gestellt.

Im Juni 2020 wurde für die Demonstratorversuche das seitens STW final überarbeitete DBE den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Hierbei mussten aufgrund des neuen Wärmemanagements die Abmessungen vergrößert werden, wodurch ein neues Mechanik-Konzept zum Tragen kam.

Die für den erfolgreichen Abschluss dieses Arbeitspaketes notwendigen FuE-Arbeiten in den Bereichen Algorithmik zur Positionserfassung, Softwareimplementierung und Vernetzung mehrerer OBUs konnten in diesem Zusammenhang abschließend durchgeführt werden. Somit wurde dieses Arbeitspaket erfolgreich abgeschlossen.

2.1.6 AP6 Verifikation der Performance von Kommunikation und Positionserfassung

Der Schwerpunkt in diesem Arbeitspaket bestand in dem Aufbau einer Testplattform in Form eines Fahrerlosen LKW für den Funktionsnachweis des OBU-Testmusters. STW war am Aufbau der Testplattform im Wesentlichen durch die Implementierung und Inbetriebnahme des Radio-Boards und des digitalen Backend für die On Board Unit beteiligt. Weiter wurden die anschließenden Versuchsreihen mit der LKW-Testplattform zur Aufrechterhaltung der OBU-Funktionalität eng von STW begleitet. Die LKW-Testplattform wurde auf dem Halbjahrestreffen am 16. und 17.10.2018 bei STW in Kaufbeuren in Anwesenheit von Herrn Dr. Dimitar Kroushkov, dem zuständigen Projektbetreuer des Projektträgers VDI/VDE-IT präsentiert. In der Abbildung 54 wird die LKW Testplattform gezeigt.



Abbildung 54: STW LKW angesteuert mit FINROC LAPTOP Instanz

Die weiteren Arbeiten der Projektpartner in diesem Arbeitspaket wurden von STW begleitet.

Beim Jahrestreffen vom 07.05.2019 bis 08.05.2019 wurde im Rahmen einer Praxisvorführung die Spurfolge zwischen zwei Fahrzeugen vorgestellt. Ein Operator gab die Spur des ersten Fahrzeugs A vor. Das FINROC Part A hatte zur Laufzeit die geografischen Koordinaten gemessen und übermittelte diese dann mit geringer Latenz an die nachfolgende LKW-Testplattform bzw. die FINROC Part B Instanz. Die LKW-Testplattform konnte die Spur des Fahrzeugs A eigenständig nachverfolgen und diese falls notwendig hochautomatisiert nachregeln.

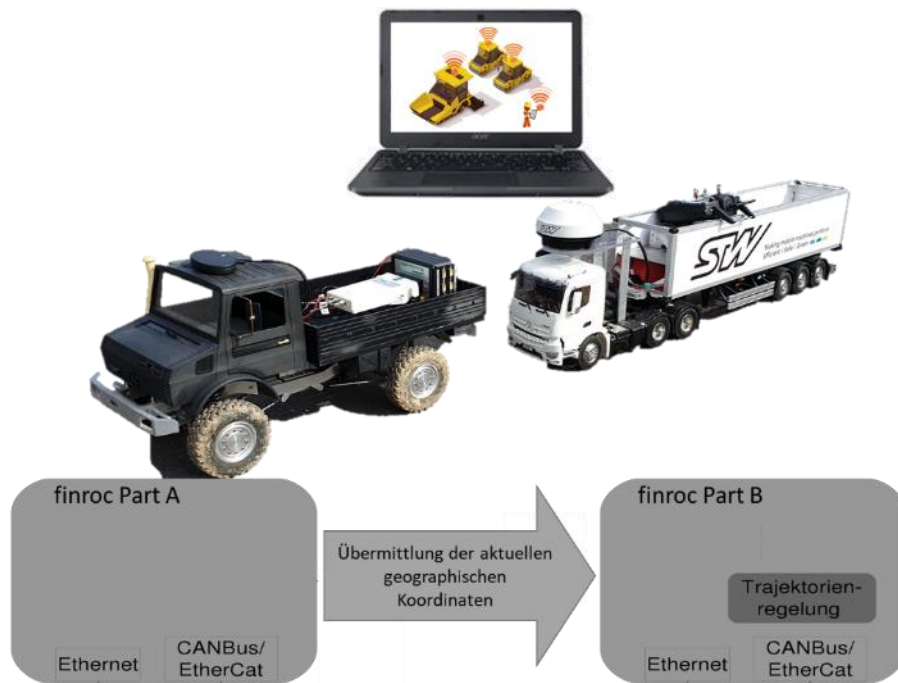


Abbildung 55: Architektur der Praxisvorführung.

Dieses Arbeitspaket wurde erfolgreich abgeschlossen.

2.1.7 AP7 Demonstrator

Das letztendliche Design der Autonomieschnittstelle, des HMI sowie das Sensorkonzept sind die Ergebnisse eines iterativen Prozesses über die Projektlaufzeit in dem immer wieder Versuche zu einzelnen Aspekten durchgeführt wurden. Die Ergebnisse der Versuche flossen dann als Änderungen in das nächste Update mit ein.

Ein nennenswerter Meilenstein in der Versuchsdurchführung war das erste autonome Anfahren von GPS-Punkten auf dem Gelände der BOMAG. Hier konnten auf einer Google-Maps Karte Wegpunkte angeklickt werden, welche die Maschine selbstständig angefahren hat.

Nach der Überführung der Maschinen zur TU Kaiserslautern wurden umfangreiche Tests in Bezug auf das Sensorkonzept durchgeführt sowie die Autonomie implementiert, bis das finale Ergebnis erreicht wurde.

Bei der Abschlussdemonstration im Trainingscenter der BOMAG wurden das erste und das zweite Anwendungsszenario (die autonome Rückwärtsfahrt und die autonome Hauptverdichtung mit 2 Walzen) erfolgreich demonstriert. Ein zusammenfassendes Video der Veranstaltung ist online verfügbar (<https://www.youtube.com/watch?v=lb7CzVil4Mc>).

Die Demonstration der mmWellen-Übertragungsstrecke sollte im Projekt AMMCOA ferner zwischen zwei John Deere Traktoren stattfinden. Hierfür mussten alle Komponenten auf einem Dachträger befestigt werden und individuelle Befestigungskonzepte berücksichtigt werden.



Abbildung 56: Dachträger zur Aufnahme von Versuchskomponenten

In Abstimmung mit den Projektpartnern wurde der folgende Versuchsaufbau definiert: Zwei John Deere Traktoren dienen als Versuchsträger für die mmWellen-Übertragungsstrecke. Dabei bewegen sich diese über einen Acker und tauschen Daten aus. Die im Projekt AMMCOA entwickelten Komponenten befinden sich jeweils auf dem Dach der Versuchsfahrzeuge (siehe Abbildung 57). Die Position der Versuchsfahrzeuge und ihre Orientierung wurde durch John Deere GPS-Empfänger bestimmt.

Dabei ist insbesondere die freie Sichtverbindung zwischen den mmWellen-Antennen der Übertragungsstrecke relevant. Durch die erhöhte Position und den Einsatz von vier an den Seiten zentrierten Antennen wird eine unterbrechungsfreie Kommunikation ermöglicht. Für die Durchführung der Versuche war es erforderlich, alle Komponenten auf einer gemeinsamen mechanischen Basis zu befestigen. Dies ermöglicht eine Kalibrierung der Antennenpositionen in einem Vorversuch. Zudem muss in diesem Fall die zeitaufwändige Verkabelung, insbesondere der mechanisch empfindlichen Hochfrequenzkabel nur einmalig durchgeführt werden.

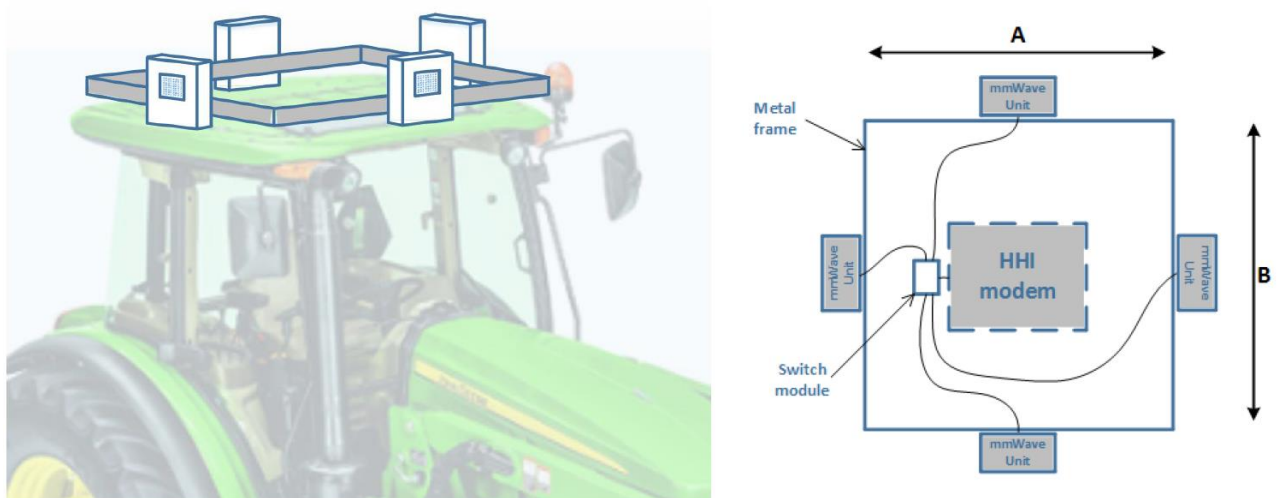


Abbildung 57: Skizze des Versuchsaufbaus

Für die geplanten Feldtests musste der Dachträger die folgenden Anforderungen erfüllen:

- 1) Aufnahme aller Komponenten auf einem einzigen Träger
- 2) Ausreichender Platz für alle Steckverbinder. Insbesondere sind die Freiräume für das Stecken freizuhalten

- 3) Ausreichende Anzahl von Befestigungsmöglichkeiten für Kabel
- 4) Steife Ausführung des Halters: Die relativen Antennenpositionen dürfen sich nicht verändern
- 5) Einfache Montage auf dem Traktordach: Dies erfordert eine leichte Ausführung der Konstruktion, da die erforderlichen Komponenten für die Übertragungsstrecke bereits mehrere Kilogramm wiegen.
- 6) Kranösen als Anschlagpunkte für die Aufnahme mittels eines Kranes
- 7) Die Abmaße und das Gewicht des Trägers müssen so klein sein, dass ein Transport in einem Transporter (z. B. Sprinter) möglich ist
- 8) Kompatibilität zu den Traktormodellen John Deere 6210R und John Deere 6250R. Dies betrifft insbesondere die Form der Dachverkleidung and die Anbindungspunkte an den Kabinenrahmen
- 9) Berücksichtigung aller dynamisch auftretenden Kräfte für einen Fahrbetrieb bis 40 km/h
- 10) Regenschutz für die beteiligten Komponenten
- 11) Witterungsbeständige Oberflächenbeschichtung: Farbe schwarz
- 12) Montage ohne Spezialwerkzeug
- 13) Keine scharfen Kanten

Die erforderlichen Komponenten für die Übertragungsstrecke wurden in Absprache mit den Projektpartnern festgelegt. Für die Konstruktion wurden CAD-Modelle der einzelnen Übertragungskomponenten vom jeweiligen Partner zur Verfügung gestellt. Die Verkabelung für hochfrequent arbeitenden Komponenten erforderte im Vergleich zur „üblichen“ Fahrzeugverkabelung relativ steife Kabel und ausreichend Platz für die Montage der Steckverbinder.

Die zentralen Komponenten des Aufbaus stellen die mmWellen-Antennen dar. Diese müssen mittig an allen vier Außenkanten des Daches positioniert werden. Dies ermöglicht eine optimale Sichtverbindung zum korrespondierenden Kommunikationspartner unabhängig von der Orientierung der Fahrzeuge zueinander.



Abbildung 58: Infineon Switch Module mit Befestigungsleisten

Die Antennen müssen aufrecht und entsprechend der Richtcharakteristik orientiert werden. Die relative Position der Antennen zueinander darf sich im Betrieb nicht verändern, um die Sende- und Empfangseigenschaften nicht zu beeinflussen. Die elektrischen Anschlüsse befinden sich an der Unterseite der Antenne.

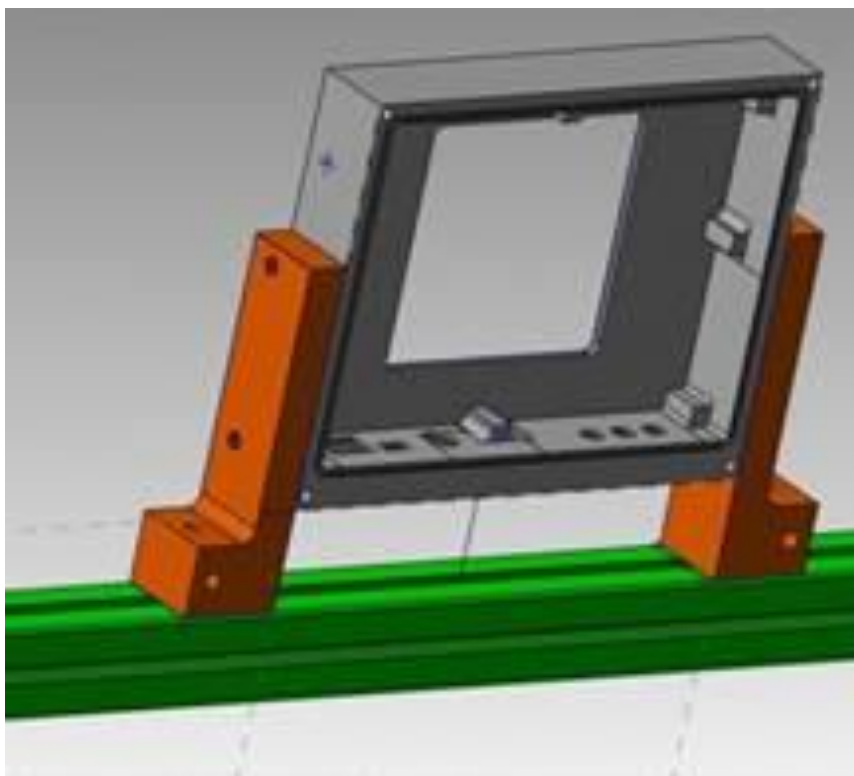


Abbildung 59: Infineon mmWelle-Antennenhalterung

Die Signale der Antennen werden in einer zentralen Einheit zusammengeführt (siehe Abbildung 58: Infineon Switch Module). Diese Komponente soll mittig angeordnet sein. Für die zahlreichen Steckverbinder ist ein ausreichender Freiraum vorzusehen.

Die Datenverarbeitung erfolgt im Modem (siehe Abbildung 60: HHI-Modem). Diese Komponente ist ein Laborgerät im 19 Zoll Rackformat und belegt 4 HE (Höheneinheiten). Diese Gehäuseform wird normalerweise an den seitlichen Laschen verschraubt. In diesem Fall wird das Gehäuse zusätzlich auf eine Gummimatte gelegt und durch einen Bügel gegen diese verspannt. Diese Modifikation ermöglicht die Aufnahme der geforderten dynamischen Kräfte. Alle Anschlüsse befinden sich auf der Vorderseite.

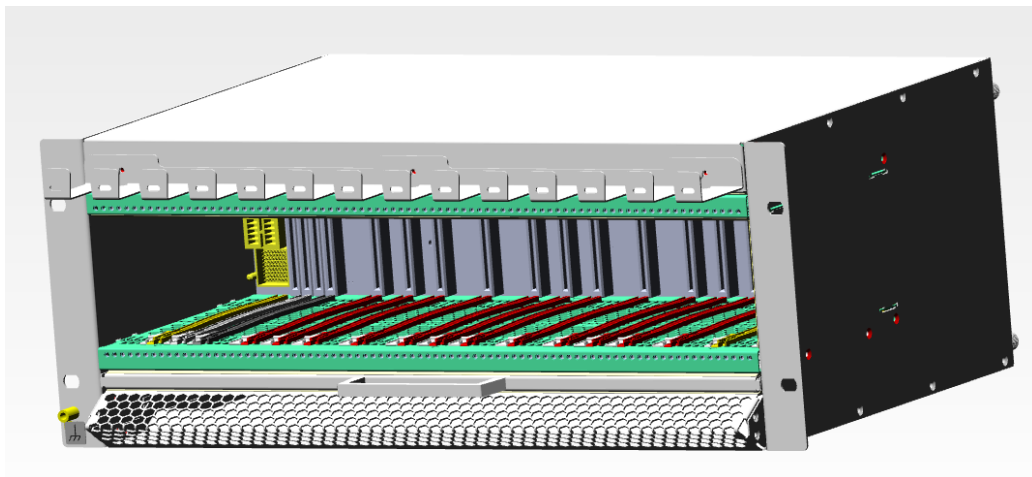


Abbildung 60: HHI-Modem

Als zentrale Steuereinheit wird die HPCx Box der Firma STW eingesetzt (siehe Abbildung 61: STW HPCx Box). Diese wird mit dem HHI Modem und dem Radio Board verbunden.

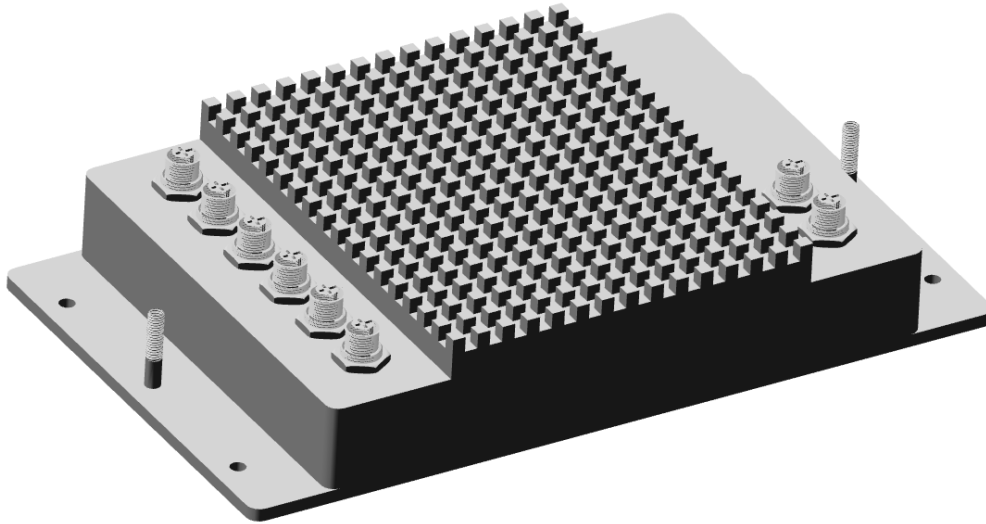


Abbildung 61: STW HPCx Box

Eine Kommunikation der Fahrzeuge untereinander kann über verschiedene Schnittstellen (LoRa (Long Range Wide Area Network), WLAN, 4G) des Radio Boards (siehe Abbildung 62: STW Radio Board) erfolgen. Diese Komponente verfügt über externe Antennen mit magnetischen Füßen. Die Länge der Anschlusskabel beträgt 1,5 m.

"External antenna"-variant

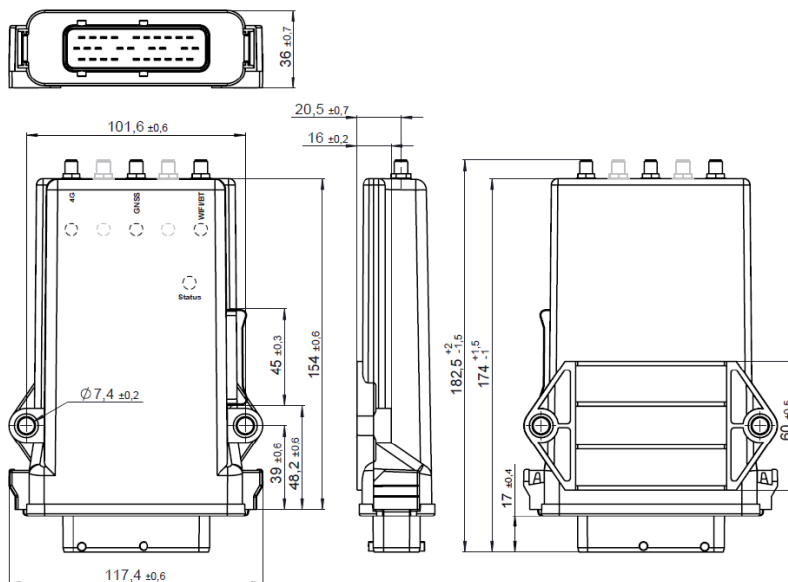


Abbildung 62: STW Radio Board

Die Position der Versuchsfahrzeuge wird über zwei John Deere Starfire 6000 GPS-Empfänger mit einem integrierten Radio RTK 869MHz Empfänger realisiert. Diese werden mit ausreichendem Abstand auf dem Dachträger befestigt. Aus der relativen Position der Empfänger kann die Orientierung des Fahrzeugs (und damit der zu testenden mmWellen-Antennen) auch im Stand berechnet werden (dies wäre bei der Verwendung nur eines GPS-Empfängers nur während der Fahrt zuverlässig möglich).

Für die Versorgung des HHI Modems wird ein Wechselrichter Mascot 600W verwendet (siehe Abbildung 63: Mascot Wechselrichter). Dieser erzeugt aus der Traktorbordnetzspannung von 12 V DC eine Wechselspannung von 230V AC. Diese Komponente wurde vorab getestet, da insbesondere während des Einschaltens von 230V-Netzteilen eine Lastspitze erzeugt wird, welche nicht von allen Wandlern gedeckt werden kann. Diese Komponenten wurden als kompatibel identifiziert.

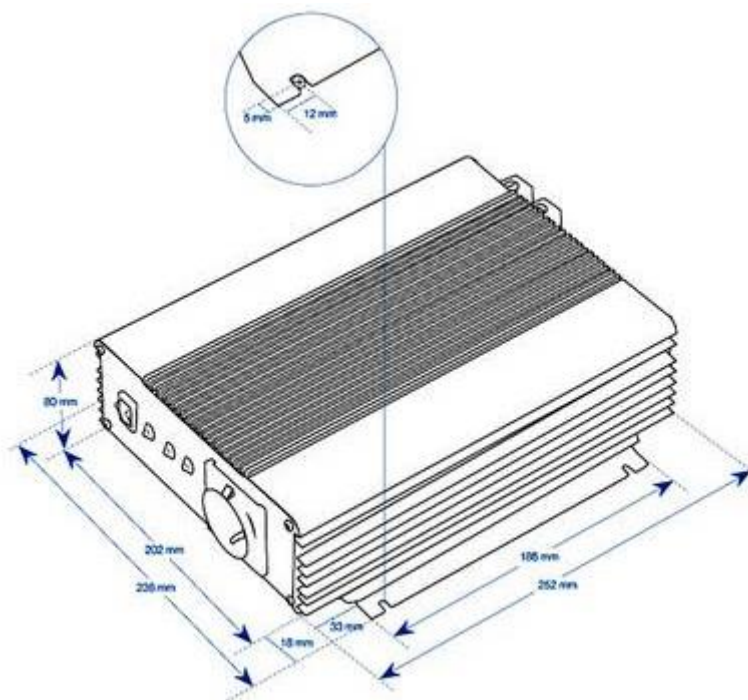


Abbildung 63: Mascot Wechselrichter

Die finale Konstruktion des Dachträgers wurde als Schweißbaugruppe ausgeführt. Ein stabiler Rahmen aus Vierkantprofilen wird mittels einstellbarer gummierter Füße auf das Traktordach gelegt und mittels zweier Schrauben an der Kabine befestigt. Die mmWellen-Antennen befinden sich jeweils mittig an den Seiten und verfügen über eine freie Sichtverbindung. Die Datenverarbeitungskomponenten befinden sich in der Mitte des Aufbaus. Die Steckverbinder

sind gut zugänglich. Die GPS-Empfänger haben einen großen Abstand, der sich positiv auf die Genauigkeit der Orientierungsberechnung auswirkt. Die vorliegende Konstruktion ist leicht, transportabel und zugleich steif ausgeführt. Die Kranösen an den Seiten ermöglichen eine einfache Montage mittels eines geeigneten Hebezeugs auf dem Fahrzeugdach.

Die folgenden Darstellungen zeigen den Dachträger in drei Ansichten:

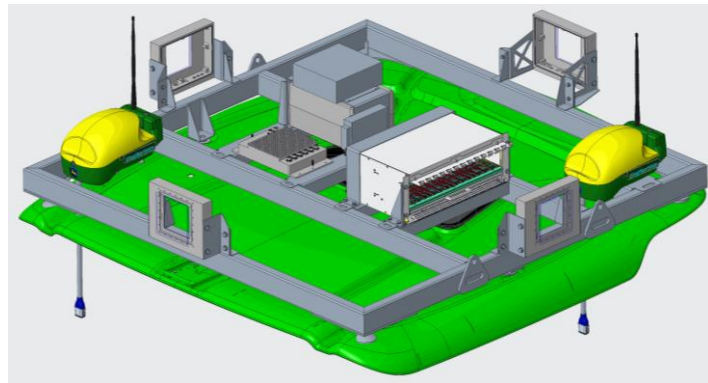


Abbildung 64: Dachträger, Ansicht von vorne rechts

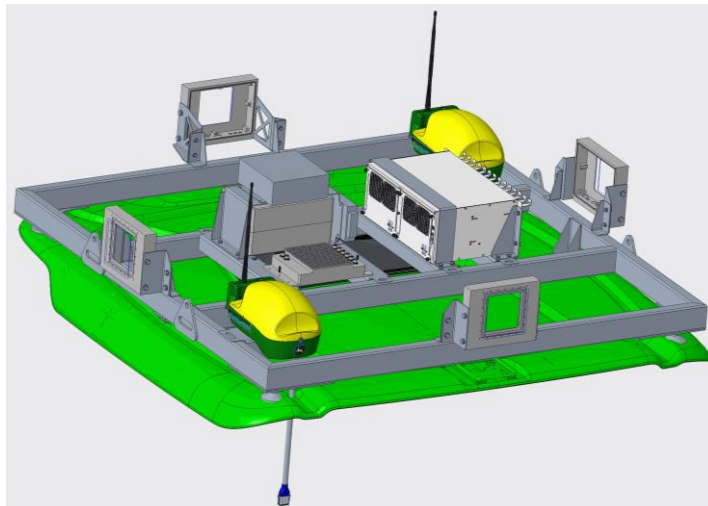


Abbildung 65: Dachträger, Ansicht von vorne links

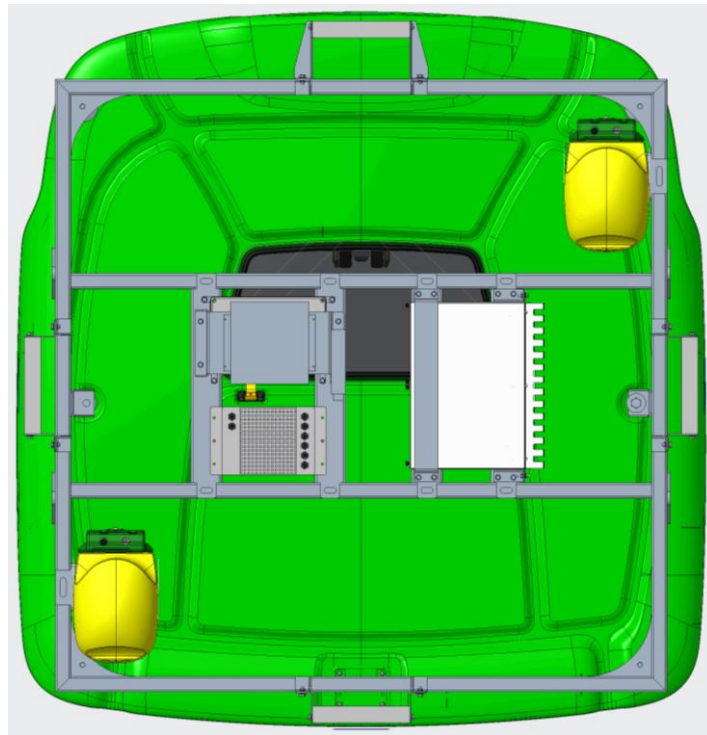


Abbildung 66: Dachträger, Ansicht von oben

Im Projekt wurde der Infrastrukturbedarf und die Positionierung von Sendeeinrichtungen evaluiert und notwendige Infrastruktur zum Aufbau privater LTE (pLTE) bzw. zukünftiger 5G Netzwerke für zwei Versuchsstandorte, darunter die Lehr- und Versuchsanstalt Hofgut Neumühle beschafft. Testlizenzen wurden für das Frequenzband 3.600-3.700 MHz und für den Bereich 3.720-3.740 MHz bis Juni 2019 beantragt und von der BNetzA zugeteilt. Auf Grund vorhandener Infrastruktur, wie Gebäude und Stromversorgung, konnten schnelle Erfolge im Aufbau eines Stand-Alone-Netzwerkes erreicht werden und eine Betriebsbereitschaft hergestellt werden. Neben der EdgeCloud-Infrastruktur wurden auch Mobiltelefone und Fahrzeugmodems in das pLTE Netzwerk integriert.

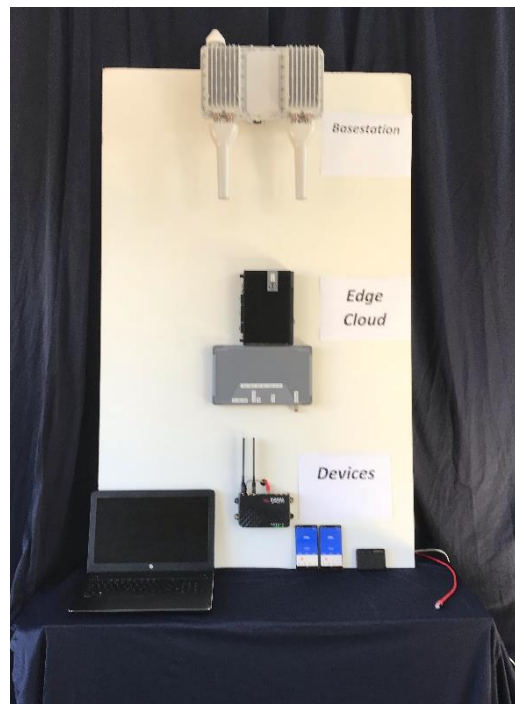


Abbildung 67: Komponenten der AMMCOA-EdgeCloud

Die gesamte Anlage besteht aus einem Stand-Alone-EdgeCloud-Server, an den bis zu zwei Basisstationen angeschlossen werden können. Die beiden in Abbildung 67 Antennen sind Omnidirektoren (Rundstrahlantennen). Zusätzlich wurden Sektorantennen beschafft und im Vergleich zu den Omnidirektoren getestet. Es ergaben sich die erwarteten Leistungseigenschaften bzw. -Unterschiede: So konnte die Rundstrahlantenne nur sehr geringe Reichweiten bis 1km abdecken auch geringste Hindernisse wie Büsche bzw. Baumreihen oder Häuser verhinderten eine Signalausbreitung. Wie Tabelle 12 zeigt, konnte mit den Sektorantennen hingegen unter Line-of-Sight-Bedingungen Reichweiten bis 8km erzielt werden. Gute Zellenperformance wurde innerhalb eines Radius bis 4km beobachtet. Dabei waren Latenzzeiten von unter 15 ms Roundtrip (Device – Basestation – EdgeCloud – Basestation – Device) erreichbar. Im Download wurden bis zu 36 Mbit/s und im Upload zu 8Mbit/s möglich. Wobei die softwareseitige Einstellung die Uploadkapazitäten noch erhöhen kann. Ein Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems durch die begrenzt verfügbaren bzw. nicht vollständig ausgereiften Fahrzeugmodems bzw. mobilen Endgeräte kann nicht ausgeschlossen werden.

Tabelle 12: Durchsatzmessung EdgeCloud mit Basestation und zwei 4-Port-Sektorantennen (17,5 dB, Beamwidth 67°, 2,5° Tilt; 3.600-3.640 MHz)

Entfernung [km]	0.1	0,7	2.6	3	3.4	8
Throughput [Mbit/s]	8	-	-	-	-	-
Throughput UL [Mbit/s]	-	2	8	8	8	0.5
ThroughputDL/Mbps	-	18	33	36	31	n. b.

Im Rahmen des ersten Hardwareaufbaus wurden neben den ersten Funktionstests auch Usecase Anwendungen durchgeführt. Insbesondere HD-Videostreaming (Device to Device) und MachineSync-Funktionen, also eine Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation in Verbindung mit bestehender serienmäßiger On-Board-Kommunikationshardware der Traktoren wurde erfolgreich durchgeführt. Fahrzeug-Gateways und nicht-pLTE-Mobiltelefone wurden mittels WiFi- Thethering mit dem pLTE Modem verbunden und konnten so in die EdgeCloud integriert werden. In weiteren Schritten wurde die Hardware am zweiten Standort, dem Hofgut Neumühle aufgebaut. Dazu wurden weitergehende Infrastrukturarbeiten getätigt (Dachmasten, Erdarbeiten für Glasfaserverlegung, etc.). Ziel der Erweiterung war es, eine gesamte Farm mit ihren komplexen geografischen Anforderungen und vielfältigen Arbeitsabläufen mit einem Funksignal zu versorgen. Die im Projekt errichtete Infrastrukturen zum Betreiben privater LTE (pLTE) bzw. zukünftiger 5G Netzwerke wurden im Betrieb getestet bzw. in einer weitergehenden Konzeptstudie untersucht. Die Arbeiten an den stationären Anlagen waren von zahlreichen technischen Unzulänglichkeiten, wie Kabelbrüchen, Hardwarefehlern oder auch Backhaul-Problemen gehemmt und konnten aber im Rahmen der verlängerten Projektlaufzeit erfolgreich abgeschlossen werden. Vielmehr zeigten die im praktischen Einsatz erfahrenen Handhabungsschwierigkeiten die Herausforderungen, die durch einen Rollenwechsel vom Anwender (Landwirt) zum Netzwerkbetreiber entstehen. Es ist zu erwarten, dass eine Technologieakzeptanz und somit eine erfolgreiche Produkt- und Technologieeinführung eng mit der Überwindung dieser Herausforderungen verbunden sein wird. Neben den permanenten, stationären Systemen sollte zur Überwindung fehlender Infrastruktur (Masten, Backhaulverbindung) und kürzerer Reichweiten der stationären Antennenanlagen im zukünftigen 5G Spektrum um 3,7 GHz die Möglichkeit einer mobilen Feldrandstation untersucht werden. Hierzu wurde auf eine mobile Trägereinheit die EdgeCloud

und die Sende-/Empfangseinheiten bzw. Antennenkomponenten installiert. Prinzipiell können auf der mobilen Einheit auch andere funkbasierte Übertragungssysteme oder Referenzstationen zur Bereitstellung eines Differential-GPS Signals installiert und mit der LTE und EdgeCloud-Technologie kombiniert werden. Der Prototyp, der die in AMMCOA beschafften pLTE Komponenten beinhaltet, wurde als Konzept einem breiten Publikum auf der Agritechnica 2019, der weltweit größten Messe für Agrartechnik vorgestellt.

Abbildung 68 und Abbildung 69 zeigen den mobilen Feldrandknoten, der auf seiner Rückseite eine Aufnahme zum Transport in standardisierten Front- oder Heckkraftheber nach ISO 730 eines Traktors aufweist. Ebenfalls kann er mittels Anhänger bzw. Gabelstapler versetzt werden.



Abbildung 68: Mobile LTE/5G-Basisstation mit integrierter Edge-Cloud auf der Agritechnica 2019 („Mobile Communication Center – MCC“)



Abbildung 69: Mobile LTE-Basisstation mit integrierter Edge-Cloud im Feldeinsatz

Durch die Möglichkeit, im Frontkraftheber eines Traktors transportiert werden zu können, müssen aus zulassungstechnischen Gründen sowohl Kamerasysteme zur seitlichen Hinderniserfassung als auch die Wiederholung möglicherweise verdeckter Fahrzeugbeleuchtung in den Feldknoten integriert werden. Daneben verfügt er über eine autarke Energieversorgung, und eine Internet-Backhaulverbindung über Satellitenfunk. Alternativ können sowohl Elektrizität als auch Internetverbindung über kabelbasierte Netzanschlüsse bezogen werden.

2.2 Nutzen und Verwertbarkeit

Infrastrukturlose Kommunikations- und Lokalisierungsfähigkeiten in (mobilen) Geräte- oder Maschinenschwärmen sind Schlüsseltechnologien für die Digitalisierung der Industrie. Durch den Auf- und Ausbau von Know-How bei den Partnern in diesem Bereich wurde die Basis für einen weiteren Technologietransfer in andere wirtschaftliche Anwendungsbereiche im Rahmen von zukünftigen Anwendungen und Förderprojekten geschaffen. Durch die Entwicklung von Millimeterwellen-Frontendkomponenten wurden z.B. die Fähigkeiten von Infineon mit Blick auf zukünftige drahtlose Kommunikationstechnologien gestärkt. Ferner wurden Untersuchungen zur signalsynchronen Steuerung des Beamformings in enger Zusammenarbeit mit dem Partner HHI durchgeführt. Davon ausgehend erfolgten die Entwicklung und der Aufbau eines entsprechenden Demonstrators. Insbesondere die praktischen Untersuchungen zur Lokalisierung mittels Time-of-Flight und Angle-of-Arrival unter Nutzung von mmW-Signalen über größere Distanzen durch den Projektpartner HHI lieferten wichtige Erkenntnisse für die Leistungsfähigkeit möglicher Systemrealisierungen und ermöglichten die Erweiterung des System-Know-Hows für zukünftige Applikationen.

Aufgrund der zunehmenden Verfügbarkeit der für Millimeterwellensysteme erforderlichen Technologiebausteine für Volumenanwendungen ist die Anschlussfähigkeit an die in diesem Bereich erzielten Ergebnisse besonders hoch. Dies zeigte sich am Interesse verschiedener Unternehmen aus anderen Anwendungsbereichen. Darüber hinaus bleibt infrastrukturunabhängige Lokalisierung in Fahrzeugschwärmen weiterhin hoch relevant mit vielfältigen Einsatzszenarien. Neben einer weiteren Verbesserung der Komponenten und Verfahren zur Bestimmung der Beobachtungsgrößen Signallaufzeit und Einfallswinkel, besteht in der Entwicklung von Systemkonzepten für autonome Schwarmlokalisierung das Potenzial für weitere Anschlussaktivitäten, insbesondere im automotiven Bereich.

Die enge Kooperation der Infineon Technologies AG mit dem HHI im Bereich Millimeterwellen-Systeme wird in dem 2021 beginnenden, im ECSEL Programm geförderten, Projekt AI4CSM fortgesetzt. In dessen Rahmen soll auf den Ergebnissen aus AMMCOA aufbauend an einer Anwendung der Technologie für die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation von herkömmlichen Straßenfahrzeugen geforscht werden.

Im Rahmen des Forschungsprojektes AMMCOA konnte die Robot Makers GmbH tiefgreifende Erkenntnisse im Hinblick auf die Koordination kooperierender autonomer Maschinen gewinnen. Diese Erkenntnisse sowie die Ergebnisse aus den Tests im Anwendungsszenario werden in die Arbeit der internen Produktentwicklung bei der Robot Makers GmbH einfließen.

Ziel ist die weitere Verbesserung der vorhandenen Steuerungs- und Regelungs-komponenten, so dass diese in einem breiten Anwendungsgebiet eingesetzt werden können. Auf die Weise soll die Marktführerschaft im Bereich der Automatisierung im Weinbau gesichert, aber auch neue Marktsegmente erschlossen werden. Dazu werden in einem ersten Schritt, nach Beendigung des Projekts, die gewonnenen Erkenntnisse reflektiert und bewertet. Dann wird anhand von Wünschen und Bedürfnissen der Kunden der Robot Makers GmbH ein passendes Produktsetting aufgestellt und innerhalb eines internen Entwicklungsprojektes umgesetzt. Dadurch werden die gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen möglichst effektiv einer wirtschaftlichen Anschlussverwendung zugeführt, die den Kunden der Robot Makers GmbH einen Mehrwert bietet.

Neben dem Bereich der Land- und Baumaschinen gibt es natürlich auch andere Anwendungsbereiche, bei denen die Koordination eines Fahrzeugverbands eine Rolle spielt. So gab es bereits interessante Anfragen aus dem Bereich der Bühnentechnik, wo die neu entwickelte Technologie zum Einsatz kommen könnte.

Des Weiteren hat sich im Rahmen des Projekts gezeigt, dass die Produktpaletten der Partner Robot Makers und STW sich sehr gut ergänzen. Außerdem hat sich gezeigt, dass sich die Steuergeräte von STW sehr gut für die Automation bzw. Teilautomation mobiler Arbeitsmaschinen eignen. Aus diesem Grund wollen beide Partner auch über das Projektende hinaus weiter zusammenarbeiten.

Für BOMAG kann die Ausarbeitung des Anwendungsfalls als Grundlage für weiterführende Arbeiten zum Thema autonomer Straßenbau dienen. Zum Beispiel könnten Anforderungen, wie die von der Straßenneigung und Wiederlagern (z.B. angrenzenden Bordsteinen) abhängige optimale Reihenfolge, in welcher die parallelen Bahnen verdichtet werden, in die Autonomieplanung integriert werden. Außerdem könnten durch das Straßenprofil eingebrachte Nebenbedingungen (z.B. durch ein Dachprofil, dessen Gipfel nicht überrollt werden sollte) berücksichtigt werden. Des Weiteren könnten neben der Anzahl an Überfahrten Messwerte als Grundlage für die Verdichtungsvorgaben herangezogen werden, was zu Neuplanungen während der Arbeit aufgrund unterschiedlicher erreichter Messwerte führen kann.

Die entstandenen Anforderungen an eine Vernetzungskomponente können bei der Auslegung neuer Vernetzungstechnologien, die auf Asphaltbaustellen zum Einsatz kommen und die Autonomie sowie den gesamten Bauprozess unterstützen sollen, genutzt werden

Marktpotenzial

In der Landwirtschaft wird durch die Vernetzung der Maschinen ein zusätzliches Wertschöpfungspotenzial von 3 Mrd. Euro erwartet. Der Einsatz mobiler Geräte wird eine einfache, flexible und echtzeitnahe Produktionsplanung und -steuerung ermöglichen. Beispielsweise kann Wertschöpfungspotenzial durch präventive Fehlervermeidung ohne Stillstand während der Erntezeit ausgeschöpft werden. Durch innovative Landtechnik und eine vollständige Vernetzung der Maschinen mithilfe der 5G Technologie können landwirtschaftliche Prozesse effizienter gestaltet werden, Maschinen optimaler ausgelastet und ein sicherer Betrieb gewährleistet werden. Durch die Errichtung eines lokalen und mobilen Kommunikationsnetzes werden Potenziale im Bereich der Prozessverbesserung freigesetzt und ausgeschöpft, die die Potentiale einer reinen Maschinenoptimierung bei weitem übersteigen. Die Herausforderung ist hierbei eine zuverlässige, genaue und sichere Abstimmung und Synchronisierung der Maschinen untereinander und die Entwicklung einer autonom operierenden Vernetzungslösung mit einem oder mehreren Funkzugangspunkten (Access Points, als Teil von On-Board Units), die bezüglich Funkfeldabdeckung, Echtzeitunterstützung, Zuverlässigkeit und Sicherheit den Anwendungsanforderungen entsprechen.

In der Baumaschinenbranche zeichnet sich bedingt durch den demographischen Wandel und dem Zwang zu kontinuierlicher Effizienzsteigerung ein steigender Bedarf an modernen Assistenzsystemen in Baumaschinen ab. Im Zeichen von Industrie 4.0 müssen Wege gefunden werden, die auch bei ortsveränderlichen und je nach Aufgabenstellung täglich rekonfigurierten Produktionsanlagen (=Baumaschinen im Verbund) den Zugang zum Internet und lokale Vernetzung zum Zwecke der optimierten Produktionsabläufe ermöglichen. Heutige Netzinfrastrukturen werden durch unzureichende Bandbreiten sowie Latenzzeiten und ein nicht ausreichendes Sicherheitsniveau bereits den heutigen Anforderungen nicht gerecht. Zur Umsetzung weiterreichender Assistenzsysteme mit dem Ziel autonom arbeitender Maschinen werden Systeme benötigt, die in Kollaboration mit Bedienern ausreichend robuste Funktionalität und höchstes Sicherheitsniveau, auch bei Störungen im Betriebsumfeld, im Sinne des Personen- und Arbeitsschutzes garantieren.

Die im AMMCOA Projekt erarbeiteten Konzepte und das Wissen, welches im Rahmen einer Beteiligung am Projekt gewonnen wird, werden breite Anwendungsmöglichkeiten erschließen. Vereint mit den bestehenden Erfahrungen aus anderen Anwendungsgebieten (z.B. Öffentliche

Sicherheit), werden für die Partner Wettbewerbsvorteile im Markt der Technologieanbieter für Kommunikationstechnologien erwartet. Insbesondere im Bereich des Internet der Dinge (IoT) und der Automatisierung im Bereich Industrie und Transport werden Lösungen und Konzepte mit weltweitem Einsatzpotential erwartet. Das AMMCOA Anwendungspotential von verteilter Netzwerkarchitektur im Bereich der Industriellen Kommunikation ist bisher weitgehend ungenutzt, da Beschränkungen durch Funklizenzen und bisher fehlende Unterstützung von verschiedensten Netzwerkprofilen Hindernisse darstellen.

2.3 Fortschritte bei anderen Stellen

Im Projektzeitraum wurden keine Ergebnisse von dritter Seite bekannt, die als Einzelkomponenten oder Gesamtsystem mit den im AMMCOA Projekt erzielten Ergebnissen vergleichbare Eigenschaften aufwiesen.

2.4 Veröffentlichungen

Das Gesamtprojekt wurde am 04. Mai 2017 auf der "Jahrestagung 5G - Industrielle Kommunikation der Zukunft" einem breiten Fachpublikum vorgestellt und positiv aufgenommen. Die Präsentation auf der Jahrestagung führte zu verschiedenen weiterführenden Kontakten, die das große Interesse am Forschungsthema widerspiegeln.

Als weiteres Highlight wurden die erarbeiteten Zwischenergebnisse des Gesamtprojekts auf dem vom 11. – 13.09.2018 in Berlin durchgeführten 5G Symposium präsentiert.

Alle weiteren Veröffentlichungen entnimmt man den jeweiligen Abschlussberichten der einzelnen Partner.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Projekt AMMCOA Abschlussbericht	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Berns, Karsten Decker, Peter Hirth, Jochen Lang, Stefan Meyne, Christian Tarasinski, Nicolai Wittig, Sven	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2020
	6. Veröffentlichungsdatum 31.08.2021
	7. Form der Publikation Broschüre
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) BOMAG GmbH, Hellerwald, 56154 Boppard Fraunhofer HHI, Einsteinufer 37, 10587 Berlin John Deere GmbH & Co. KG, Strassburger Allee 3, 67657 Kaiserslautern Infineon Technologies AG, Am Campeon 1-15, 85579 Neubiberg Robot Makers GmbH, Merkurstraße 45, 67663 Kaiserslautern TU Kaiserslautern, Paul-Ehrlich-Straße 11, 67663 Kaiserslautern Sensor-Technik Wiedemann, Am Bärenwald 6, 87600 Kaufbeuren	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -
	10. Förderkennzeichen 16KIS0702 x
	11. Seitenzahl 80
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 12
	14. Tabellen 12
	15. Abbildungen 69
16. Zusätzliche Angaben Vollständiger Titel des Verbundvorhabens AMMCOA: Autonomous Mobile Machine Communication for Off-Road Applications Hochzuverlässige und echtzeitfähige Vernetzung für Land- und Baumaschinen	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Im Rahmen des Projektes Autonomous Mobile Machine Communication for Off-Road Applications (AMMCOA) wurden Lösungen für die Realisierung autonomer und kooperierender Verbände von Land- und Baumaschinen erforscht. Konkret wurden die zwei Szenarien Straßenbau und Getreide-ernte betrachtet. In beiden Szenarien kommen verschiedene Typen von Maschinen bzw. Fahrzeugen zum Einsatz, die gleichzeitig und koordiniert Arbeitsschritte ausführen. Eine Automatisierung dieser Prozesse und in der Folge eine Verringerung der Anforderungen an menschliche Bediener, verspricht Effizienzsteigerungen und vereinfachte Abläufe. Voraussetzung für die Realisierung der Autonomie ist die Fähigkeit der Maschinen, untereinander zu kommunizieren und ihre Relativpositionen zueinander zu bestimmen. Sowohl an die Kommunikation als auch an die Lokalisierung werden dabei höchste Anforderungen hinsichtlich Geschwindigkeit, Latenz und Genauigkeit gestellt. Typische Einsatzumgebungen sind jedoch dadurch gekennzeichnet, dass keine oder nur unzureichende Kommunikationsinfrastruktur vorhanden ist. Weiterhin ist eine Verringerung der Abhängigkeit von satelliten- und infrastrukturgestützten Methoden für die Positionsbestimmung für einige Anwendungsfälle wünschenswert. Das Projekt AMMCOA hatte daher zum Ziel, auf Basis von 5G Technologien eine mobile und mitführbare drahtlose Vernetzungslösung zu entwickeln, welche die ad-hoc Errichtung von lokalen Inselfunknetzen erlaubt und dabei die gleichen Leistungsmerkmale wie klassisch fest installierte 5G Mobilfunkinfrastruktur, erweitert um eine Lokalisierungsfunktionalität, bietet.	
19. Schlagwörter 5G, mm-Welle, mobile Maschinenkommunikation, Off-Road-Applikationen, vernetzte Kommunikation, Autonomie, Lokalisierung	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Projekt AMMCOA Abschlussbericht	
4. author(s) (family name, first name(s)) Berns, Karsten Decker, Peter Hirth, Jochen Lang, Stefan Meyne, Christian Tarasinski, Nicolai Wittig, Sven	5. end of project 30.09.2020
	6. publication date 31.08.2021
	7. form of publication booklet
8. performing organization(s) (name, address) BOMAG GmbH, Hellerwald, 56154 Boppard Fraunhofer HHI, Einsteinufer 37, 10587 Berlin John Deere GmbH & Co. KG, Strassburger Allee 3, 67657 Kaiserslautern Infineon Technologies AG, Am Campeon 1-15, 85579 Neubiberg Robot Makers GmbH, Merkurstraße 45, 67663 Kaiserslautern TU Kaiserslautern, Paul-Ehrlich-Straße 11, 67663 Kaiserslautern Sensor-Technik Wiedemann, Am Bärenwald 6, 87600 Kaufbeuren	9. originator's report no.
	10. reference no. 16KIS0702 x
	11. no. of pages 80
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 12
	14. no. of tables 12
	15. no. of figures 69
16. supplementary notes Translation of title: Final report of the AMMCOA project	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract As part of the Autonomous Mobile Machine Communication for Off-Road Applications (AMMCOA) project, solutions for the implementation of autonomous and cooperating associations of agricultural and construction machinery were researched. Specifically, the two scenarios road construction and grain harvest were considered. In both scenarios, different types of machines or vehicles are used, which carry out work steps simultaneously and in a coordinated manner. Automation of these processes and, as a result, a reduction in the requirements placed on human operators, promises increased efficiency and simplified processes. The prerequisite for the realization of autonomy is the ability of the machines to communicate with one another and to determine their relative positions to one another. Both communication and localization are subject to the highest demands in terms of speed, latency and accuracy. Typical application environments, however, are characterized by the fact that there is no or only inadequate communication infrastructure. Furthermore, a reduction in the dependency on satellite and infrastructure-based methods for position determination is desirable for some applications. The aim of the AMMCOA project was therefore to develop a mobile and portable wireless networking solution based on 5G technologies, which allows the ad-hoc establishment of local island radio networks and offers the same performance features as traditionally permanently installed 5G mobile radio infrastructure, expanded to include localization functionality	
19. keywords 5G, mm-wave, mobile machine communication, Off-Road-Application, network communication, Autonomy, localization	
20. publisher	21. price