ENCAMPS

Edge-unterstützende Nomadische CAMPus-Netzwerke für Spot-Farming

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Version:	1.0
Erstelldatum:	25.03.25
Projektpartner:	Hochschule Osnabrück (Förderkennzeichen (FKZ): 19OI23008A), ADVES GmbH & Co. KG (FKZ: 19OI23008B), Universität Osnabrück (FKZ: 19OI23008C), MECSware GmbH (FKZ: 19OI23008D), Hof Fleming (assoziierter Partner)

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

INNOVATIVE NETZTECHNOLOGIEN

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS **2**
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS **3**
TEIL I **5**
TEIL II **8**
AP1 - USE CASES UND ANFORDERUNGSANALYSE 9
AP2 – ARCHITEKTUR NOMADISCHER AGRARNETZE 11
AP3 - NOMADISCHE NETWORK AUTOMATION (KONFIGURATION UND MONITORING) 14
AP4 - INTERNET-ANBINDUNG DER NOMADISCHEN NETZE 15
AP5 - DYNAMISCHE EDGE/CLOUD MIGRATION 20
AP6 - AD-HOC RTK LOKALISIERUNG 21
AP7 – AD-HOC FREQUENZBEANTRAGUNG 22
AP8 – DEMONSTRATION UND EVALUATION 24
TEIL III **28**
WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE ERGEBNISSE 29
PUBLIKATIONEN 29
1.1.1 Liste der Paper *29*
1.1.2 Liste der Demos *30*
1.1.3 Unveröffentlicht / Im Review-Prozess *30*
1.1.4 Invited Talks *30*
VERWERTUNG 31
HOCHSCHULE OSNABRÜCK 31
ADVES 31
MECSWARE 32
UNIVERSITÄT OSNABRÜCK 32
HOF FLEMING 32
ZEITPLAN 33
LITERATURVERZEICHNIS **1**
ANHANG: PUBLIKATIONEN **1**

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BBR	Bottleneck Bandwidth and Round-trip propagation time
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BNetzA	Bundesnetzagentur
CBRS	Citizen Broadband Radio Service
CU	Centralized Unit
DU	Data Unit
DWD	Deutscher Wetterdienst
EFRE	Europäischer Fonds für regionale Entwicklung
ENCAMPS	Edge-unterstützende Nomadische CAMPus-Netzwerke für Spot-Farming
FKZ	Förderkennzeichen
FTP	File Transfer Protocol
GIS	Geoinformationssystem
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
KI	Künstliche Intelligenz
KPI	Key Performance Indicator
LEO	Low Earth Orbit
LiFePo4	Lithium-Eisenphosphat
MEC	Mobile Edge Computing
NTRIP	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
OAI	OpenAirInterface
O-RAN	Open Radio Access Network
PLMN	Public Land Mobile Network
PV	Photovoltaik
PoE	Power over Ethernet
RAN	Radio Access Network
ROS	Robot Operating System
RSRP	Reference Signal Received Power
RSRQ	Referenced Signal Received Quality

RTCM	Radio Technical Commission of Maritime Services
RTK	Real Time Kinematic
RTT	Round-Trip-Time
RU	Radio Unit
SAS	Spectrum Access System
SINR	Signal-To Interference-Plus-Noise-Ratio
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
USB	Universal Serial Bus
WLAN	Wireless Local Area Network

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

INNOVATIVE NETZTECHNOLOGIEN

TEIL I

Kurzbericht

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

INNOVATIVE NETZTECHNOLOGIEN

Um Landwirtschaft in Zukunft nachhaltiger und effizienter zu gestalten, ist der Einsatz digitaler Technologien erforderlich. Unter Verwendung von Sensorsystemen, Agrarrobotern und Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), ggf. mit Künstlicher Intelligenz (KI) ausgestattet, können beispielsweise neuartige Konzepte für den Anbau von Pflanzen entwickelt werden. Ein solcher Ansatz ist beispielsweise das „Spot-Farming“. Bei diesem und weiteren Pflanzenbaukonzepten werden Böden im Vergleich zu konventionellen Verfahren kleinteiliger und zielgerichteter bewirtschaftet. Zum Einsatz kommen dabei verstärkt Sensoren, Drohnen und hochautomatisierte Landmaschinen. Die notwendige Voraussetzung, um solche Pflanzenbaukonzepte praktisch umsetzen zu können, ist eine drahtlose Netzwerkverbindung zum Austausch von Daten mit ausreichend geringen Verzögerungszeiten, u. a. bei der Steuerung von UAVs, und hohen Übertragungsraten, z. B. bei der Übermittlung von multispektralen Sensordaten. Der 5G-Mobilfunkstandard erfüllt die Anforderungen. Allerdings ist eine Verbindung zu einem Mobilfunknetz der Betreiber mit entsprechender Qualität in ländlichen Räumen in Deutschland häufig nicht verfügbar. Eine Möglichkeit, 5G unabhängig und flexibel anzuwenden, bietet der Einsatz eigener 5G-Netze, sogenannter Campusnetze. Damit diese für landwirtschaftliche Anwendungen, wie Spot-Farming, attraktiv werden, ist ein einfacher, möglichst automatisierter, Aufbau sowie Betrieb des Netzwerks nötig. Das vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) geförderte Projekt ENCAMPS adressiert die o. g. Herausforderungen, indem es landwirtschaftliche Betriebe durch entsprechende Entwicklungen dazu befähigt, ihr eigenes nomadisches, also örtlich ungebundenes Ad-hoc-5G-Campusnetz aufzubauen, um damit Spot-Farming zu betreiben.

Zum Erreichen der Projektziele haben sich die ADVES GmbH & Co. KG als Anbieter von Hard- und Softwaresystemen im Agrarbereich, die MECSware GmbH, Entwickler von einfach zu bedienenden Campusnetzen, die Arbeitsgruppe Verteilte Systeme vom Institut für Informatik der Universität Osnabrück, das Labor für Hochfrequenztechnik und Mobilkommunikation der Hochschule Osnabrück sowie der landwirtschaftliche Betrieb Dr. Kathrin Müller (Hof Fleming) zu einem Konsortium zusammengeschlossen.

Zu Beginn des Projekts wurden zunächst relevante Anwendungsfälle für den Einsatz des nomadischen 5G-Campusnetzes in der Landwirtschaft definiert. Diese umfassen zum einen einfache Fälle, bei denen Daten von einer Landmaschine an die 5G-Basisstation übermittelt und von dort über das Internet weitergeleitet werden. Zum anderen werden komplexere Anwendungen betrachtet. Hier wird neben der Internetanbindung auch ein Datenaustausch zwischen mehreren Landmaschinen, bzw. einem Agrarroboter, und einem UAV innerhalb des 5G-Campusnetzes benötigt. Unter Berücksichtigung der bestimmten Anwendungsfälle wurden die technischen Anforderungen an das Campusnetz erarbeitet.

Die Gesamtarchitektur des zu entwickelnden Systems wurde basierend auf den formulierten Anwendungsfällen und Anforderungen entworfen. Die Entscheidung fiel auf die Realisierung einer nomadischen 5G-Basisstation, die mit einem Traktor als Frontgewicht transportierbar ist und über einen ausfahrbaren Antennenmast verfügt. Die Station wird mittels Batterien, ergänzt durch Solarmodule, autark mit Energie versorgt.

Das 5G-Netz wurde so konfiguriert, dass die Datenübertragung optimal auf die landwirtschaftlichen Anwendungsfälle abgestimmt ist. Es lässt sich automatisiert in Betrieb nehmen, ohne weitere Einstellungen vornehmen zu müssen. Weiterhin wurden Messungen durchgeführt, die als Grundlage für das 5G-Monitoring verwendet werden können.

Um eine resiliente Anbindung der 5G-Basisstation an das Internet bereitzustellen, wurde das Satellitennetzwerk Starlink verwendet. Dafür wurden umfassende Untersuchungen zur Performanz vom Starlink-System durchgeführt. Betrachtet wurden Szenarien, bei denen die Starlink-Schüssel stationär oder mobil eingesetzt wurde. Zudem wurde untersucht, ob sich die Performanz durch die Bündelung mehrerer Schüsseln verbessern lässt sowie, welchen Einfluss Verschattung und Wetter auf das System haben. Hierzu wurden im Rahmen des Projekts zahlreiche wissenschaftliche Publikationen veröffentlicht. Umgesetzt wurde die Starlink-Anbindung zum Campusnetz über eine stationäre Schüssel, die neben der Basisstation positioniert wird. Zudem wurde eine Migration der Berechnungen in Edge oder Cloud basierend auf Docker-Containern erarbeitet.

Real Time Kinematic (RTK) ist eine Technologie, zur hochgenauen Lokalisierung, die in der Landwirtschaft, insbesondere beim Spot-Farming, relevant ist. Diese wurde mit Hilfe der Neural-Box, einem Edge-Computing-Device der Firma ADVES, in die Basisstation, auf einen Traktor, sowie in ein UAV integriert.

Für den Betrieb eines eigenen 5G-Campusnetzes ist es Voraussetzung, dass die Lizenzen für die Nutzung der entsprechenden Frequenzbereiche bei der Bundesnetzagentur beantragt und bewilligt wurden. Zur Vereinfachung des Antragsprozesses, für den u. a. technisches Wissen im Bereich 5G notwendig ist, wurde, in Rücksprache mit der Bundesnetzagentur, ein Client-Server-System in Form einer Webseite entwickelt. Es wurde so umgesetzt, dass es speziell auf die Anwendung in der Landwirtschaft ausgerichtet ist.

Final wurden die einzelnen Komponenten zu einem Gesamtsystem zusammengefügt: ein nomadisches Ad-hoc-5G-Campusnetz, transportierbar als Fronteinheit eines Traktors, mit Internetanbindung über Starlink und RTK-Lokalisierung. Das System wurde auf dem Hof Fleming in Betrieb genommen und ebenso wie einzelne Teilkomponenten (beispielsweise die Starlink-Komponenten) auf dem Feld erprobt.

TEIL II

Eingehende Darstellung

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitspakete betrachtet und die in denen ausgeführte Arbeiten näher erläutert. Im Fokus stehen dabei jene Arbeiten, die das Projekt signifikant beeinflusst haben.

AP1 - Use Cases und Anforderungsanalyse

Im Arbeitspaket (AP) 1 sollten die für das Vorhaben relevanten Anwendungsfälle definiert und die Anforderungen an das nomadische 5G-System von Lohnunternehmen und landwirtschaftlichen Betrieben ermittelt werden.

Die für die Landwirtschaft interessanten Anwendungsfälle sind vielfältig. Neben einer direkten Maschinenanbindung über das Starlink-Satellitennetzwerk wurden im Vorhaben die reine Datenaufnahme im Feld, kooperative Prozesse im Ackerbau und im Grünland sowie die Ein- und Anbindung hochautomatisierter/autonomer Landmaschinen betrachtet. In *Tabelle 1* sind die Anwendungsfälle sowie Beispiele aufgeführt.

Tabelle 1: Use Cases für 5G Campusnetze mit Satellitenanbindung in der Landwirtschaft

Anwendungsfall	Beschreibung	Beispiele

Direkte Maschinenanbindung	Direkter Datenaustausch von der Landmaschine über eine Satelliten-Verbindung bei keiner bis schlechter öffentlicher Netzabdeckung	• Austausch von Prozessdaten
		• Over-the-Air-Update
		  ○ Firmware
		  ○ KI-Modelle
		• Service-Unterstützung

Datenaufnahme	Datenaustausch im 5G-Campusnetz von der (Land-)Maschine zur nomadischen Basisstation, Weiterverarbeitung und Übertragung mittels Satelliten-Anbindung	• Aufnahme von Realdaten für KI-Modell-Entwicklung • Biodiversitätsmonitoring
Kooperative Prozesse im Ackerbau	Datenaustausch im 5G-Campusnetz zwischen mehreren Landmaschinen, einer Drohne und der nomadischen Basisstation; Weiterverarbeitung der Daten und Übertragung mittels Satelliten-Anbindung	• Trennung von Datenaufnahme, Verarbeitung und abgeleiteter Handlung wie beispielsweise für ein optimiertes Düngemanagement • Datenaustausch in Ernteketten (Häcksler, Mähdrescher etc.)
Kooperative Prozesse im Grünland	Datenaustausch im 5G-Campusnetz zwischen mehreren Landmaschinen, einer Drohne und der nomadischen Basisstation; Weiterverarbeitung der Daten und Übertragung mittels Satelliten-Anbindung	• Kitzrettung • (Gift-)Pflanzenerkennung • Biodiversitätsmonitoring
Hochautomatisierte/autonome Landmaschinen	Direkter Datenaustausch von der Landmaschine über eine Satelliten-Verbindung	• Allgemeine Umfeldüberwachung (Sicherheit) • Kitzrettung • (Gift-)Pflanzenerkennung • Biodiversitätsmonitoring

Die beschriebenen landwirtschaftlichen Anwendungsfälle sind für ein besseres Gesamtverständnis in *Abbildung 1* visualisiert.

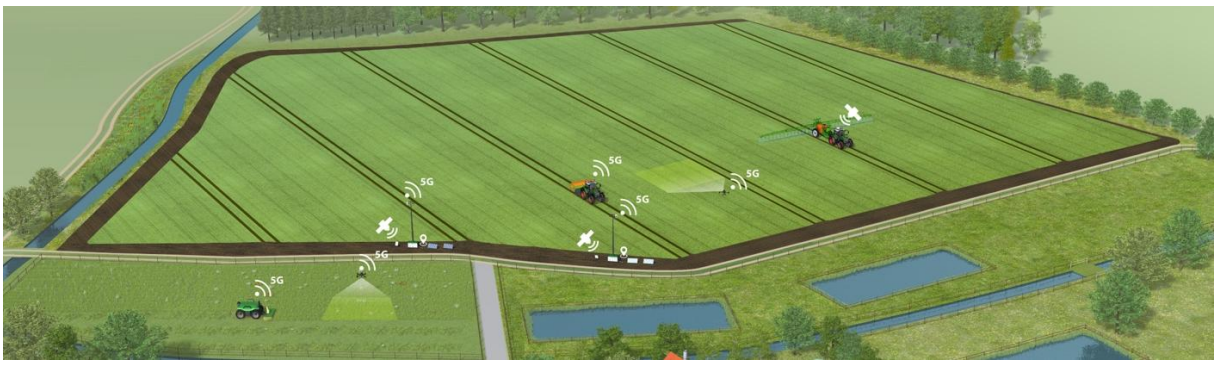

Abbildung 1: Anwendungsfälle

Mit Blick auf die landwirtschaftlichen Anwendungsfälle wurden exemplarisch Daten (Kamera) im Feld aufgenommen, über das Campusnetzwerk übertragen, verarbeitet (Edge) oder via Satellitennetzwerk übertragen und dann verarbeitet (Cloud). Verarbeitete Daten konnten auch wieder zurück an die Maschine oder weitere bzw. andere Maschinen übertragen werden. Entsprechend ergibt sich eine geschlossene Prozesskette, bei der Drohnen und konventionelle, wechselnde Landmaschinen zum Einsatz kommen.

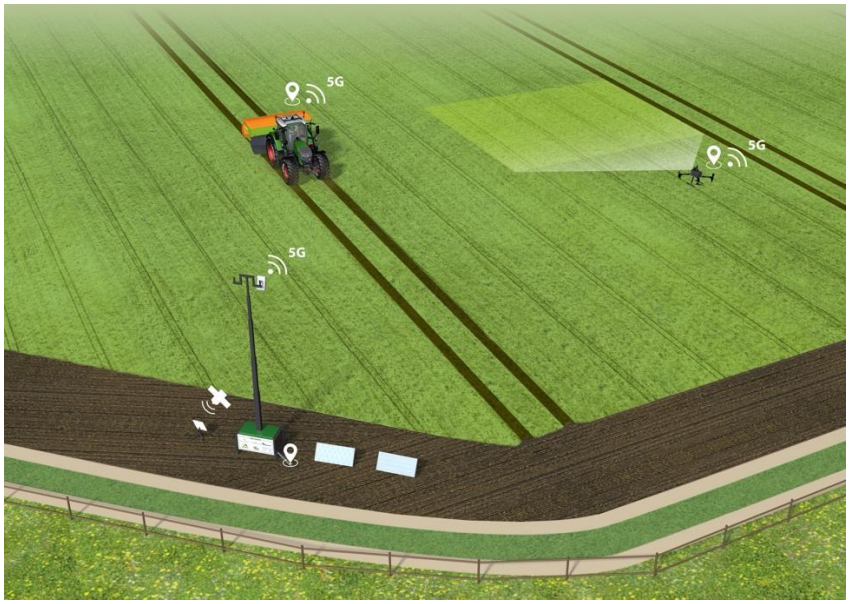

Abbildung 2: Kooperative Prozesse im Ackerbau

Im Anwendungsfall, wie er in *Abbildung 2* dargestellt ist, wird das besonders deutlich. Daten eines Sensorsystems, welches an einer Drohne montiert ist, werden im 5G-Campusnetz an die mobile 5G-Basisststation übertragen, verarbeitet und dann an den Traktor übertragen. Parallel können Rohdaten ebenso wie verarbeiteten Daten via Satellitennetzwerk an den beteiligten Partner übertragen werden.
Weiterhin wurden zwei Anwendungsfälle identifiziert, welche die Leistungsgrenzen des Systems auslasten. Basierend darauf wurden genauere Anforderungen an die Parameter des Netzwerks, insbesondere an Durchsatz und Verzögerung, definiert. Das erste betrachtet Szenario besteht aus einem Regelkreis aus Drohne, 5G-Bassisstation, Starlink-Satellit und Cloud. Dieses

Szenario könnte beispielsweise bei der Erkennung ausgewählter Unkräuter und deren Bekämpfung zu Einsatz kommen. Wichtig ist hier neben einem konstanten Durchsatz für Multimedia-Übertragungen eine hinreichend geringe Verzögerung. In Szenario 2 werden gebündelte Daten über Starlink übertragen, wie es z. B. bei der Dokumentation verrichteter Arbeiten der Fall sein könnte. Hier wird der Starlink-Uplink mit einem maximalen Durchsatz ausgelastet.

Ergebnis des AP sind Beschreibungen für Anwendungsfälle sowie Anforderungen an die Technik und die Prozesse im Hinblick auf hybride nomadische 5G-Satelliten-Agrarkommunikationsnetze.

Bei der Definition der Anwendungsfälle und der Erstellung der Anforderungsliste wurde mit allen Partnern des Vorhabens intensiv zusammengearbeitet. Während der gesamten Projektlaufzeit wurden in den Treffen, Arbeitsmeetings und Versuchen agil an dem Lastenheft gearbeitet.

AP2 – Architektur nomadischer Agrarnetze

Ziel von AP2 war es, den Aufbau der mobilen ENCAMPS-Station, die mithilfe eines Traktors schnell an Feldrandzonen positioniert und in Betrieb genommen werden kann, zu konzeptionieren und aufzubauen. Die Station besteht aus einer stabilen Standeinheit mit teleskopierbarem Mastaufbau für die Aufnahme der MECSware-5G-Basisstation, einem Batterie- und Ladesystem mit PV (Photovoltaik)-Unterstützung zur Energie-Versorgung aller Komponenten der Station, der IT-Infrastruktur mit Edge-Computing-Einheit mit integriertem RTK-Modul für die Aussendung von Korrekturdaten über 5G mit justierbarer RTK-Antenne.

Abbildung 3: Mobile 5G-Station mit Starlink-Antenne (li.) und PV-Modulen (re.)

Als Basis für die Standeinheit wurde eine sogenannte Cargo-Box verwendet, die, aus Metall aufgebaut, genügend Eigengewicht für einen sicheren Stand bietet. Die Cargo-Box hat auf der Rückseite eine standardisierte Dreipunkt-Aufnahme, die von Traktoren in der Front- oder Heck-Hydraulik aufgenommen und zum Transport angehoben werden kann.

Im Rahmen des Vorhabens wurde diese Cargo-Box vom Hof Fleming umgebaut und an die vorhabenspezifischen Bedürfnisse angepasst. Zunächst wurde eine stabile Rahmenkonstruktion konstruiert, gebaut und montiert. Des Weiteren wurden per Kurbeln ausfahrbare, nivellierbare Stützfüße konstruiert und an den vier Ecken der Box bzw. des Rahmens angebracht. Darüber kann der Mast auch auf unebenen Standflächen lotrecht ausgefahren werden. In die Rahmenkonstruktion mittig eingearbeitet ist der teleskopierbare Mast, der sich mithilfe einer Seilwinde bis auf eine Höhe von 6,4 m ausfahren lässt, um auch bei vorbeifahrenden Landmaschinen Abschattungen der 5G-Basisstation zu vermeiden. Auf der Mastspitze befindet sich eine universelle Antennenhalterung, an der die MECSware-5G-Basisstation schwenkbar befestigt ist. In der ursprünglichen Cargo-Box ist das Batterie- und Ladesystem, die lokale IT-Infrastruktur mit der Edge-Computing-Einheit und die Systemverkabelung untergebracht. Über verschiedene, nach außen geführte Steckverbinder lassen sich PV-Module, Ladekabel und Antennenkabel kontaktieren. Für den Transport der PV-Module sind in die Rahmenkonstruktion frontseitig zwei senkrechte Führungsschienen eingearbeitet, in die die Module eingesteckt werden können. Für den Betrieb werden die PV-Module mithilfe rückseitig angebrachter ausklappbarer Stützen in optimale Position zur Sonne neben der aufgestellten Station ausgerichtet. Die Starlink-Antenne lässt sich sowohl auf dem Deckel der Fronteinheit als auch am Antennenmast befestigen und transportieren. Der Betrieb am Mast ist ebenso möglich, wie der Betrieb neben der Station. So kann die Starlink-Antenne immer mit freier Sicht zum Himmel positioniert werden. Seitlich der Fronteinheit, zwischen einem vorderen und einem rückwärtigen Stützfuß, ist ein drehbarer, teleskopierbarer Arm mit der Halterung für die RTK-Antenne der Basisstation angebracht. Nach Abstellen der Station neben einem Referenzpunkt für die umliegenden Ackerflächen wird die Antenne exakt lotrecht über den Referenzpunkt ausgerichtet, um die Korrekturdaten für die zentimetergenaue Ortsbestimmung auf den Ackerflächen zu ermöglichen.

Das Batterie- und Ladesystem besteht aus vier Lithium-Eisenphosphat(LiFePo4)-Batterien mit jeweils einer Spannung von 12 V und einer Kapazität von 230 Ah. Zusammengeschaltet zu einem 24 V-System ergibt sich eine verfügbare Gesamtkapazität von ca. 11 kWh.

Abbildung 4: Offene Fronteinheit mit LiFePo4-Batterien und integrierten Komponenten

Zur verfügbaren Betriebsdauer im Feld wurden verschiedene Einsatzszenarien betrachtet und die jeweilige Betriebsdauer dazu berechnet. Bei einem durchschnittlichen Energiebedarf mit aktivem RTK-System und Starlink-Empfänger ist ein autonomer Betrieb von ca. 60-70 h ohne PV-Unterstützung gesichert, bei entsprechender Sonnenscheindauer und -intensität auch Dauerbetrieb.

Zusätzlich laden lässt sich das Batteriesystem über die ISOBUS-Steckdose des Traktors oder über einen 230 V-Anschluss. Das 230 V-Netzteil oder die ISOBUS-Steckdose, angeschlossen über einen 12 V/24 V-Ladewandler, liefern jeweils 50 A bei 12 V, was je einer ungefähren Ladeleistung von 0,6 kW entspricht.

Die IT-Infrastruktur der mobilen 5G-Station setzt sich zusammen aus der ADVES-Edge-Computing-Einheit Neural-Box® mit integriertem RTK-Modul zur Aussendung von GNSS(Global Navigation Satellite System)-Korrekturdaten (vgl. AP6), einem mobiltauglichen Ethernet-Switch, der alle Komponenten datentechnisch verbindet, dem MECSware-Core und den PoE(Power over Ethernet)-Injektoren für die MECSware-5G-Basisstation und den Starlink-Empfänger. Für Remote-Diagnose und Software-Updates Over-The-Air ist in der Neural-Box® auch ein 4G-Mobilfunk-Modem integriert, dass Verbindung zu der ADVES-eigenen Cloud-Service-Plattform EDAS hat. Darüber lassen sich auch die Betriebsdaten der ENCAMPS-Station aufzeichnen.

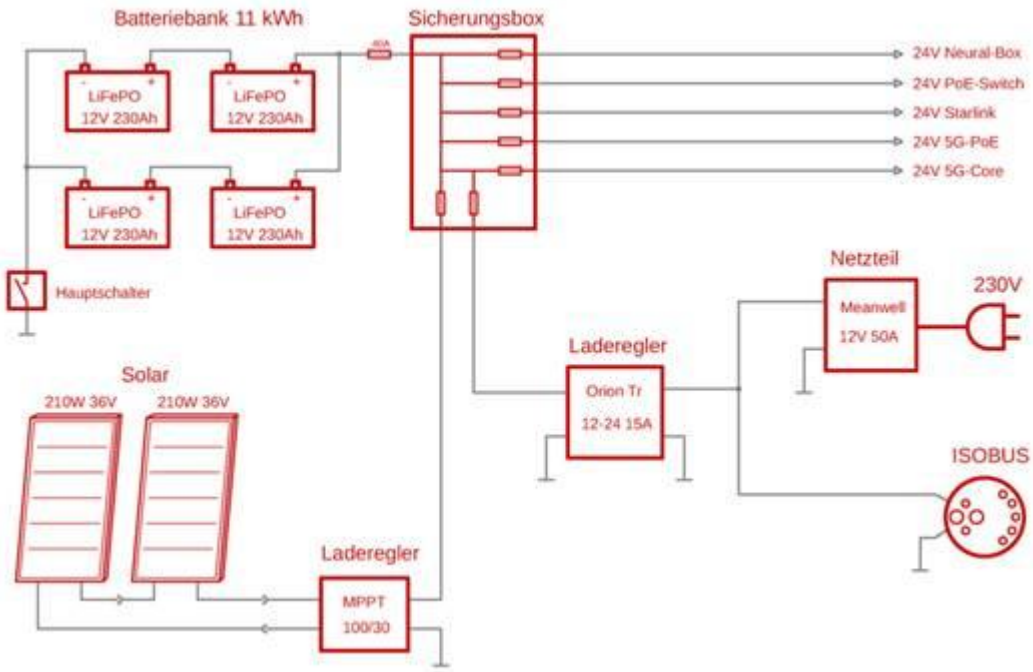

Abbildung 5: Schaltplan für Batterie- und Ladesystem

Das Ergebnis ist eine flexibel einsetzbare 5G-Basisstation für nomadische Agrarnetze mit integrierter Referenzstation zur Aussendung von RTK-Korrekturdaten, die sich einfach mithilfe eines Traktors zum Einsatzort bringen lässt und sofort einsatzbereit ist.

Die Konstruktion, der Bau der mechanischen Komponenten und der Anbau dieser wurde durch den Hof Fleming durchgeführt. Der Aufbau des Batterie- und Ladesystems wurde in gemeinsa-

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

mer Abstimmung zwischen ADVES und Hof Fleming realisiert. Während der gesamten Projektlaufzeit fanden regelmäßig Treffen, Arbeitsmeetings und Versuche auf dem Hof Fleming statt. Im Rahmen der Tests wurde dabei die Technik geprüft und bei Versuchsreihen schwerpunktmäßig der praktische Einsatz dieser Technik im Feld bewertet.

AP3 - Nomadische Network Automation (Konfiguration und Monitoring)

Im Arbeitspaket 3 wurde zum einen die MECSware-5G-Basisstation, angepasst für die Anwendung in der Landwirtschaft, konfiguriert (siehe *Abbildung 6*). Bei Stromzufuhr startet die Station automatisch mit den entsprechenden Einstellungen. Dabei wurde insbesondere das Zeitduplex-Muster so eingestellt, dass das Verhältnis zwischen den Datenraten, die im Uplink bzw. im Downlink übertragen werden, möglichst zugunsten des Uplinks ausfällt. So wurden Datenraten von 80 Mbit/s im Uplink und 170 Mbit/s im Downlink erreicht.

Darüber hinaus wurde ein weiteres 5G-Campusnetz basierend auf ORAN (Open Radio Access Network) im Agro-Technicum, einem Laborbereich der Hochschule Osnabrück mit Feld, installiert (ausführlicher in AP8 beschrieben). Im Rahmen des Projekts wurden darüber hinaus erste Maßnahmen unternommen, um eine Automatisierung des Netzwerks zu ermöglichen. Vorteil eines Open-RAN-5G-Netzwerk sind die hohe Flexibilität bei der Konfiguration und die Unabhängigkeit vom Hersteller. Da ORAN allerdings auf diversen Open Source Lösungen basiert, ist die Automatisierung hier deutlich aufwändiger umzusetzen als bei Lösungen eines einzigen Herstellers, wie MECSware. Im speziellen wurden Skripte entwickelt, die vor allem Ausfälle und Abstürze verhindern, bzw. behandeln und so ein stabil laufendes Netz realisieren sollen. Hierbei konnte die Netzstabilität deutlich gesteigert werden. Darüber hinaus wird eine Management-Software entwickelt, welche eine nutzerfreundliche Konfiguration ermöglichen soll.

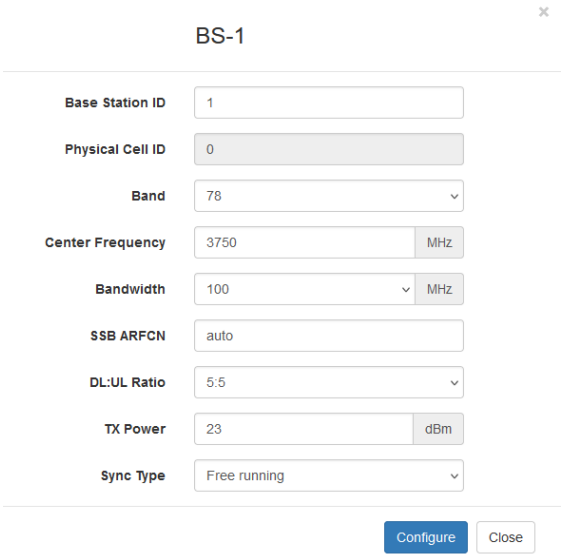

Abbildung 6: Konfiguration der MECSware-5G-Basisstation

Zudem wurden verschiedene Messungen durchgeführt. Auf dessen Grundlage können 5G-Monitoring-Funktionen realisiert werden. So wurden Durchsätze- und Latenzen der MECSware-Basisstation und des 5G-Campusnetzes am Agro-Technicum gemessen. Weiterhin wurden Reference Signal Received Power (RSRP), Reference Signal Received Quality (RSRQ) und Signal-To-Interference-Plus-Noise-Ratio (SINR) ermittelt und mittels Grafana auf Karten dargestellt. In

Abbildung 7 ist beispielhaft eine RSRP-Messung für das O-RAN-Netzwerk am Agro-Technicum zu sehen. Umgesetzt wurden die Messungen neben dem O-RAN-Netzwerk auch mit der MECS-ware-Station. Die RSPR-Messungen zeigen unter anderem, dass mit beiden Systemen das gesamte Feld am Agro-Technicum mit Reichweiten von bis zu 70 m bei Sichtverbindung problemlos abgedeckt werden kann.

Abbildung 7: Monitoring des RSRP

AP4 - Internet-Anbindung der nomadischen Netze

Ziel von Arbeitspaket 4 war die Entwicklung eines *Speed Proxy*, der eine möglichst gute und robuste Internet-Anbindung der ENCAMPS-Basisstation für die im angeschlossenen 5G-Campusnetz anfallenden Daten bereitstellt. Aus den Anwendungsszenarien in AP1 ergeben sich folgende Anforderungen und zugehörige Key Performance Indikatoren (KPI):

1. Echtzeitfähigkeit (KPI: niedrige Round-Trip-Time (RTT), Szenario 1)
2. Unterstützung der Datenrate von Drohnenkamera (KPI: Durchsatz konstant ausreichend für Multimedia-Stream, Mindestanforderung Szenario 1)
3. Demonstration der Systemgrenzen (KPI: Durchsatz von Bulk-Data auf Starlink-Uplink, Szenario 2)

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

INNOVATIVE NETZTECHNOLOGIEN

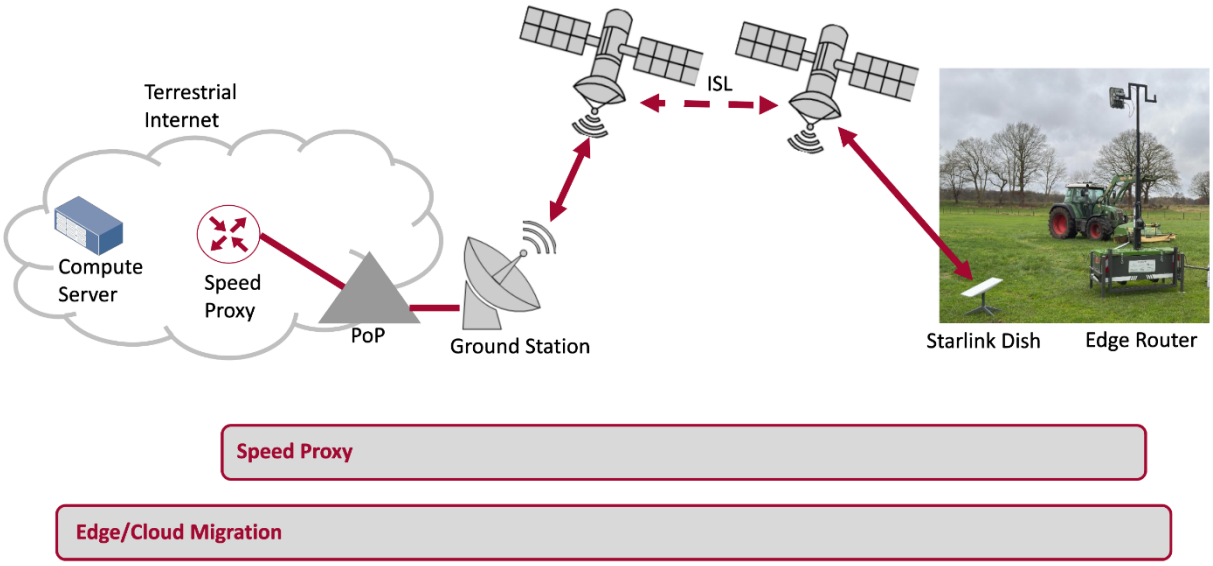

Abbildung 8: Exemplarischer Systemaufbau der Internetanbindung des nomadischen Campusnetzes in ENCAMPS

Abbildung 8 visualisiert den Netzaufbau der Anbindung eines nomadischen Campusnetzes an das Internet. Auf Seite des Campusnetzes sorgt ein Edge Router für die Einbindung einer bzw. mehrerer Starlink-Dishes in das Campusnetz. Dieser Edge Router wird im Demonstrator, wie in AP8 beschrieben, in einem mobilen Frontgewicht platziert, wo auch die 5G-Basisstation und Stromversorgung verortet sind. Der Edge Router kann dann die anfallenden Daten an einen Speed Proxy im terrestrischen Internet tunneln, um eine möglichst robuste Verbindung über das Satellitennetzwerk zu gewährleisten. Aufbauend auf dieser Verbindung mit Hilfe des Speed Proxys kann dann die Edge/Cloud Migration entstehen (siehe AP5).

Vor der Zusammenschaltung mehrerer Links sollten diese zunächst charakterisiert werden, um den potenziellen Nutzen einer Multipfad-Lösung abschätzen zu können. Aufgrund der schlechten praktischen Erfahrung im Bereich PLMN auf der Testfläche des landwirtschaftlichen Betriebs wurde von der weiteren Nutzung dieser Technologie abgesehen. Diese Einschätzung konnte durch RTT-Messungen über einen Zeitraum von rund vier Wochen im 5G-Netz bestätigt werden: Während über die Starlink-Verbindung RTTs von rund 25 ms im Median erreicht werden, liegt die Latenz über das öffentliche 5G-Netz der Telekom auf der landwirtschaftlichen Testfläche doppelt so hoch bei rund 50 ms im Median.

Die Link-Eigenschaften des LEO(Low Earth Orbit)-Satellitennetzwerks Starlink wurden im Rahmen von ENCAMPS in verschiedenen Szenarien evaluiert.
In [LLM+24] wurde die Performanz von Starlink über einen Zeitraum von sechs Monaten an zwei Standorten in Osnabrück und Enschede analysiert. Im Median konnten an beiden Standorten UDP (User Datagram Protocol) Downlink Durchsätze von über 200 Mbit/s, UDP Uplink Durchsätze von ca. 15 Mbit/s, RTTs von ca. 60 ms, und Paketverlustraten von 1 % gemessen werden. Diese hohe Performanz wird allerdings von Faktoren wie dem Wetter und der Uhrzeitbedingten Gesamtlast im Starlink Netzwerk beeinträchtigt. So wurde festgestellt, dass starker Regen (>5 mm Niederschlag pro Stunde) den UDP Downlink Durchsatz um bis zu 30 %-40 % mindert. Demgegenüber bleibt der UDP Uplink Durchsatz unbeeinflusst. Des Weiteren führt die hohe Last im Starlinknetzwerk während der Stoßzeiten zwischen 16:00 und 21:00 Uhr zu bis zu 30 % niedrigeren Download Durchsätzen. Auch hier hat sich der Upload Durchsatz als

robuster herausgestellt. Demgegenüber wurde kein Einfluss des Wetters oder der Tageszeit auf die RTT und den Paketverlust gefunden.
Eine nähere Betrachtung des Einflusses von Wolken auf die Starlink-Performanz wurde in [LLW+24] durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass Wolken über einen Beobachtungszeitraum von 6 Monaten lediglich Auswirkungen auf den Downlink haben. Uplink und RTT wurden hingegen nicht merklich beeinflusst.
In [LLB+24] wurde die Starlink Performanz in mobilen Szenarien untersucht. Hierfür wurde die Starlink Flat High Performance Schüssel auf ein Auto der Stadtwerke Osnabrück montiert und ein Prototyp für ein automatisiertes Messsystem gebaut. Dieses System erkennt über die Zündung automatisch, wenn das Auto ein- und ausgeschaltet wird und führt während der Fahrt Messungen der Starlink Performanz durch. Die Performanz der Starlink-Anbindung im mobilen Betrieb ist im Kontext von ENCAMPS von Interesse, da Szenarien denkbar sind, in denen die Satellitenschüsseln auf Landmaschinen montiert sind oder wie im Demonstrator in einem Anbaugerät mitgeführt werden. Ein weiteres Ziel in [LLB+24] war eine autonome Stromversorgung des gesamten Systems zur Senkung des Wartungsaufwandes. Diese Erkenntnisse hierzu waren auch im Projektkontext für den Demonstrator relevant. In [LLB+24] konnte gezeigt werden, dass große Hindernisse, beispielsweise Bäume, an der Straßenseite den erreichbaren Download und Upload Durchsatz stark negativ beeinflussen können. Außerdem wurde festgestellt, dass die Stromversorgung innerhalb eines Autos nicht ausreicht, um die Starlink-Schüssel autonom zu versorgen. Zusätzlich wurde eine externe, unterstützende Stromquelle benötigt (in unserem Fall eine Powerstation).
Der Einfluss der dynamischen Umgebung, insbesondere der Signalabschirmung, wurde in [LLA+24] im Rahmen einer dedizierten Testfahrt auf der Autobahn weiter untersucht. Hierbei wurden hochpräzise RTT, Paketverlust und Durchsatzmessungen durchgeführt, um den Einfluss von Signalabschirmungen durch Bebauungen zu untersuchen. Es wurde festgestellt, dass kurze Totalabschirmungen, ausgelöst z.B. durch Brücken, zu Burst Paketverlusten, RTT-Spikes, und Einbrüchen im Download und Upload Durchsatz führen. Die Auswirkungen davon sind gravierend, weil die Performanz von TCP(Transmission Control Protocol)-basierten Anwendungen, wie z.B. FTP (File Transfer Protocol) oder HTTP (Hypertext Transfer Protocol), nicht nur stark negativ beeinträchtigen, sondern in den meisten Fällen zu kompletten Abbrüchen der Anwendungen führen.
Unsere Ergebnisse und praktischen Erfahrungen aus [LLB+24] und [LLA+24] haben wir genutzt, um in [LTZ+24] eine autonomes Starlink System auf einem Traktor auf dem Hof Fleming zu entwerfen, um eine mögliche Alternative zur stationären Anbindung des 5G Campus Netzes zu erforschen. Im Vergleich zu einem Auto liefert ein Traktor eine deutlich stärkere Stromversorgung, die einen dauerhaften autonomen Betrieb der Flat High Performance Schüssel ermöglicht. Die Messergebnisse während der Fahrt wurden genutzt, um die Performanz von TCP-basierten Anwendungen in einer Emulation zu untersuchen. Hierbei wurde festgestellt, dass die Instabilitäten, verursacht von Verdeckungen, z.B. Bäumen, oder vom Starlink-System selbst durch periodische Satelliten-Handover und Rekonfigurationen von Frequenzen und anderen Ressourcen, einen starken Einfluss auf die Performanz haben. Klassische Congestion Control Algorithm wie Cubic sind besonders anfällig, während BBRv3 besser performt.

Die Bündelung mehrerer Starlink-Links soll helfen, die oben definierten Anforderungen zu erfüllen. Dass dieses Potenzial existiert, konnte im Rahmen von ENCAMPS in [LZT+24] gezeigt werden. Dabei wurden bis zu vier Starlink-Dishes gleichzeitig in einer Zelle verwendet, um das

Potenzial der Bündelung durch einen Multi-Path-Edge-Router simulativ zu evaluieren. Die Abschätzung der Performance basiert auf parallel durchgeführten Messungen. Dabei wird deutlich, dass die Wahl des Transportprotokolls entscheidend ist: Während mit UDP jeder Link einen ähnlichen Durchsatz erreichen kann, sodass potenziell das Vierfache an Datenrate zur Verfügung stünde, würden diese Links zusammengefasst, ist dies bei TCP nicht der Fall. Dort ist der Durchsatz beim Einsatz von vier Starlink-Dishes signifikant geringer, sodass auch der potenzielle Benefit einer Linkbündelung hinter dem einer UDP-basierten Lösung zurückbleibt. Daher wird keine Ausweitung der Betrachtung auf Multipfad-TCP durchgeführt.
In Bezug auf die Latenz konnte in [LZT+24] gezeigt werden, dass die RTT bei vier gleichzeitig betriebenen Starlink-Dishes relativ ähnlich ist. Im Vergleich zu früheren Messungen in [LLM+24] und [LLW+24] wurden hier sogar Median RTTs von 20-25 ms gemessen. Diese Verbesserungen sind auf den ständigen Ausbau des Starlink-Backbonenetzes zurückzuführen.
Anschließend an die Ergebnisse von [LZT+24] wurde in [TDW+25] die UDP-basierte Link-Bündelung näher betrachtet. Es wurden drei Open-Source-Ansätze in Hinblick auf ihre Performanz bei Anwendung auf Starlink-Verbindungen untersucht. Zunächst wurden die Link-Bündelungsansätze emulativ mit Daten aus dem WetLinks-Datensatz ([LLM+24]) evaluiert. Hierbei zeigt sich, dass die Performanz in Hinblick auf den Upload zwar verbessert wird, jedoch nicht wie erwartet verdoppelt. Auch Download und RTT weisen nur geringe Verbesserungen auf. Zur Validierung dieser Ergebnisse wurde der Link-Bonding-Ansatz, der in der Emulation am besten performte, unter realen Bedingungen getestet. Hier zeigt sich, dass unter Wahl einer geeigneten Sendeleistung doch erheblich höhere Upload-Raten erzielt werden können.

Da die bisher betrachtete Link-Bündelung zunächst nur eine *Encapsulation* von beliebigen Transportprotokollen in UDP anbietet, ist eine genauere Betrachtung weiterer Protokolle notwendig, um abschätzen zu können, wie sich verschiedene Anwendungen verhalten werden. Exemplarisch soll hier TCP untersucht werden, da es nach wie vor das populärste Transportprotokoll ist [Am19] und von vielen Legacy-Anwendungen eingesetzt wird. Während UDP mit einer festen Senderate agiert, wird diese bei TCP durch den *Congestion Controller* festgelegt, welcher auf Link-Eigenschaften wie Paketverlustrate und RTT reagiert, sodass selbst bei Nutzung von Link-Bündelung noch ein Einfluss der Link-Eigenschaften auf die Performanz des Congestion Controllers zu erwarten ist.

Deshalb wurden ausgewählte Congestion Control Algorithmen in einer *mininet*-Emulation miteinander verglichen. Es wird nur ein Link betrachtet, dessen Charakteristiken alle 10 Sekunden analog zu den im WetLinks-Datensatz gemessenen Eigenschaften angepasst werden. Dieser Zeitraum wurde gewählt, um eine ausreichende Anzahl von Änderungen innerhalb der Übertragung einer 364,9 MB großen Punktwolke zu gewährleisten – bei einer exakten Wiedergabe des aufgezeichneten Datensatzes hätten sich die Eigenschaften nur ca. alle drei Minuten geändert, da in diesem Abstand die Messpunkte aufgenommen wurden.
Als Algorithmen wurden *Cubic*, *BBR (Bottleneck Bandwidth and Round-trip propagation time)* und *Hybla* ausgewählt. Am weitesten verbreitet ist Cubic, da dieser Congestion Controller der Standard in Linux- und Windows-Systemen ist [MSJ+19]. Er nutzt eine kubische Funktion bei der Bestimmung der Senderate und reduziert diese auf 70 %, sobald ein Paketverlust auftritt. BBR wurde 2016 von Google vorgestellt und wird seitdem vermehrt eingesetzt [MSJ+19]. Im Gegensatz zum paketverlustbasierten Ansatz von Cubic nutzt BBR ein Modell, um die maxima-

len Datenrate am Bottleneck und die minimalen RTT einzuschätzen und orientiert seine Senderate daran. Paketverluste werden zwar auch durch erneute Übertragung der entsprechenden Pakete behoben, haben jedoch einen geringeren Einfluss auf den Algorithmus als bei Cubic. Hybla wurde Anfang der 2000er entwickelt, um die Datenübertragung in Satellitensystemen zu verbessern.

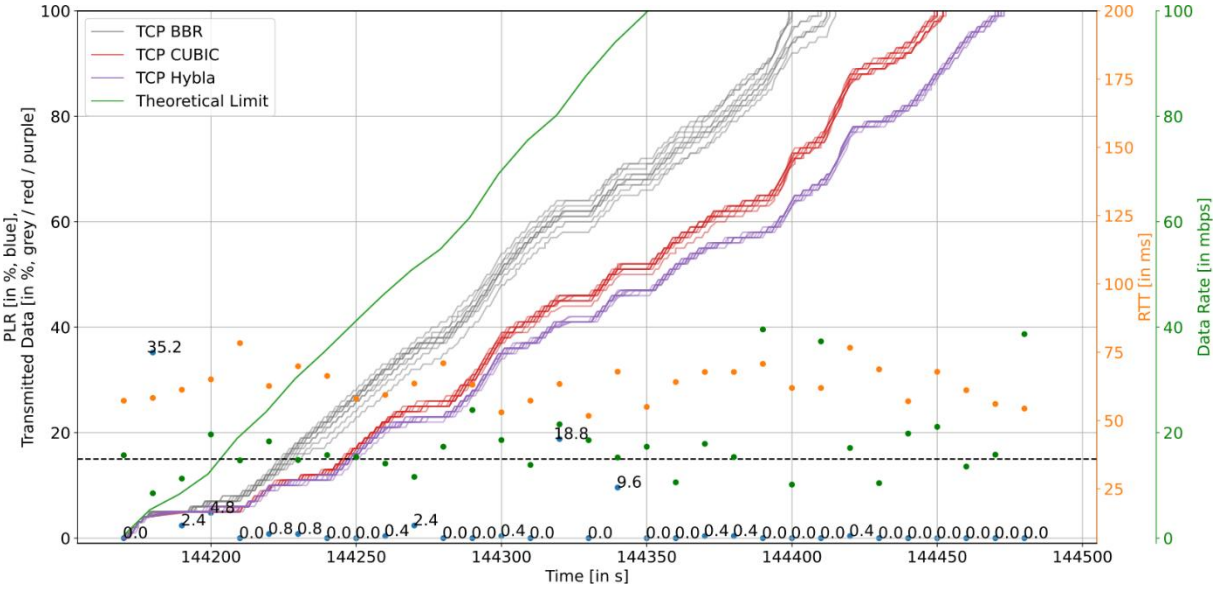

Abbildung 9: Emulativer Vergleich verschiedener TCP Congestion Control Algorithmen in einem Ausschnitt des WetLinks-Datensatzes

Damals zeichneten sich diese Links durch eine niedrige Datenrate sowie eine hohe RTT aus – beides ist bei Starlink jedoch nicht mehr der Fall und wird hier daher lediglich zur Veranschaulichung der Unterschiede verwendet.

Es wurden zahlreiche Startzeitpunkte innerhalb des WetLinks-Datensatzes [LLM+24] evaluiert. Diese wurden sowohl zufällig gezogen als auch bewusst nach einem hohen Paketverlust ausgewählt. Exemplarisch sei hier *Abbildung 9* näher erörtert. Auf der x-Achse ist die emulierte Zeit in Sekunden aufgetragen (entsprechend dem Zeitpunkt im Datensatz), während die geteilte y-Achse die Link-Eigenschaften Paketverlustrate (in Blau), RTT (in Gelb) und Upload-Datenrate (in Grün) als Punkte zeigt. Die grauen, roten, lilafarbenen und die grüne Linie zeigen, wie viel Prozent der Punktwolken-Datei zur gegebenen Zeit bereits erfolgreich übertragen wurden. Dabei stellt die grüne Linie ein oberes Limit dar, welches demonstriert, wie viele Daten hätten übertragen werden können, wenn der Link verlustfrei wäre und die gesamte Datenrate zur Übertragung verwendet werden könnte (d.h. ohne Protokoll-Overhead). Die Performanz von TCP BBR (in Grau), TCP Cubic (in Rot) und TCP Hybla (in Lila, jeweils 5 Wiederholungen) weicht unterschiedlich stark von dieser Ideallinie ab, sodass der signifikante Einfluss des Congestion Control Algorithmus' direkt sichtbar wird. Zu Beginn können alle Algorithmen den Link fast vollständig auslasten. Dann steigt die Paketverlustrate auf 35,2 % an, was zu einem Plateau, d.h. einem kurzzeitigen Stopp aller Datenübertragungen führt. Danach wird der Unterschied zwischen den paketverlustbasierten Controllern Cubic und Hybla und dem modellbasierten BBR deutlich: BBR scheint konstant zu senden und folgt somit der Steigung des theoretischen Optimums, nur gelegentlich aufgehalten von sehr hohen Paketverlustraten von 18,8 % und 9,6 %. Im Gegensatz dazu haben Cubic und Hybla ihre Senderate bereits nach dem ersten Paketverlust reduziert und tun dies wiederholt (auch bei kleinen Paketverlustraten von 0,8%, 0,4 % und 2,4 %), sodass

hier vermehrt Plateaus zu beobachten sind. Diese Sensitivität gegenüber den häufigen Paketverlusten eines Starlink-Links führen zu einer um mindestens 50 Sekunden erhöhten Übertragungszeit der Beispieldatei von ca. 350 MB.

Mit Blick auf Anforderung 3 ist es daher empfehlenswert, sofern möglich, als Congestion Control-Algorithmus der innerhalb des ENCAMPS-Kontexts eingesetzten TCP-Anwendungen BBR auszuwählen. Für alle Evaluationen wurde BBRv3 ausgewählt, welcher zukünftig der neue Standard in allen Linux-Distributionen werden soll. Die hier aufgeführten Ergebnisse sind sehr wahrscheinlich auch auf andere BBR-Versionen übertragbar, da sie ebenfalls modellbasiert arbeiten, sodass der Unterschied zur Funktionsweise der paketverlustbasierten Congestion Controller ausreichend groß ist.

AP5 - Dynamische Edge/Cloud Migration

Wenn auf Knoten in einem Netzwerk zu erfüllende Aufgaben entstehen, werden sie im Netz auf Rechenangebote verteilt (Scheduling). Beim reinen Cloud-Computing befinden sich dabei alle Rechenangebote, genannt Services, in der Cloud. Für Robustheit und dynamische Ressourcennutzung können diese Services migriert werden. Design-Kriterien zur Container-Migration sind dafür in [SS+21] zu finden. Zu den benötigten Daten zum Bewältigen einer Aufgabe gehören also neben den eigentlichen Aufgabendaten auch eventuelle Nutzdaten, die Programmdaten des Services und die lokalen Konfigurationseinstellungen. Beim Mobile Edge Computing (MEC) ist Container-Migration besonders fundamental, da hier die Dynamik größer ist. [WXZ+18] bietet eine Einführung in Migrationsstrategien für das MEC.
Für die heterogenen Geräte in der Edge ist Flexibilität der Services von enormem Vorteil, besonders durchgesetzt haben sich dabei Docker-Container. Sie bieten sich auch als gute Grundlage im Spot-Farming-Szenario an. Docker bietet schon einige Features für die Container-Migration. Neben einer vorhandenen Implementation für statische Migration ist vor allem die Trennung von Nutzdaten, Konfigurationsdaten und Container-Abbild für eine Live-Migration hilfreich. Generische Live-Migration – auch von Docker-Containern – ist schon gut erforscht. Ein Beispiel mit Einordnung findet sich in [XWX+20]. Für weitere Forschung zu Container-Migrationsstrategien im Kontext des Spot-Farming-Prototyps wird Anwendungswissen benötigt. Da sich die spezifischen Anwendungsszenarien und die korrespondierenden Anforderungen gerade erst entwickeln, ist dieses leider noch nicht ausreichend vorhanden. Daher wurde zur Erprobung der zu entwickelnden Scheduling-Strategien ein Test-Service entwickelt, der mit Containermigration im Netz ausgebracht werden kann. Zur Validierung wurde der Anwendungsfall von Live-Feed-Überwachung, z.B. beim Drohnenvideostreaming, betrachtet. Der Test-Service kann dynamisch mehrfach im Netzwerk eingesetzt werden, um Scheduling-Strategien zu vergleichen.
Eine Übersicht von Ansätzen beim Container-Scheduling ist in [AAA+22] dargelegt. Auch hier benötigt weitergehende Forschung grundsätzlich mehr Anwendungswissen. Da bei der Migration Daten übertragen werden, ist Wissen über die vorhandenen Netzwerkverbindungen hilfreich. Vor allem die korrekte Vorhersage von Linkverbindungen kann enorme Vorteile bringen. Im Anwendungsfall des Spot-Farmings bietet Starlink eine neue Möglichkeit, Daten aus dem lokalen Netzwerkraum hochzuladen. Dies ist für Schedulingstrategien von hoher Relevanz.
Als Grundlage für die Entwicklung von Schedulingstrategien wurden Modelle zur Vorhersage der Starlink Performanz entwickelt. Diese basieren auf der Erkenntnis aus [LLM+24], dass das Wetter, insbesondere Regen und Bewölkung, einen starken Einfluss auf die Starlink Performanz, vor allem auf den Download Durchsatz, hat. In [BBL+24] wurde auf Basis der WetLinks-

Daten [LLM+24] ein Random Forest Modell trainiert, das den Download-Durchsatz auf Basis der aktuellen Wetterbedingungen vorhersagt. Weil Wetter ein wichtiger, aber nicht der einzige Einflussfaktor auf die Starlink-Performanz ist, erreicht das Modell keine perfekten Vorhersagen. Es reicht aber aus um generelle Trends der Performanz, insbesondere starke Einbrüche, vorherzusagen.
Dieses Modell wurde daraufhin weiterentwickelt [LLO+24], indem auch Wettervorhersagen und die Wetterbedingungen der nahen Vergangenheit (ca. 10 Minuten) mit verwendet werden. Dadurch konnte die Genauigkeit weiter gesteigert werden. Neben der Entwicklung von Schedulingstrategien ermöglicht dieses Modell auch die Entwicklung von wetterspezifischen Anwendungen weit über dem Projektkontext hinaus.

AP6 - Ad-hoc RTK-Lokalisierung

In der landwirtschaftlichen Praxis werden für die präzise Bearbeitung von Feldern mit Genauigkeiten von bis zu 2 cm, wie im Spot-Farming Voraussetzung, Referenzstationen eingesetzt, die am Feldrand über einen fest vermessenen Referenzpunkt aufgestellt werden und GNSS-Korrekturdaten direkt an das Traktor-Geräte-Gespann senden. In diesem Projekt wird diese Funktionalität mit in die ENCAMPS-Station integriert, somit wird aus der nomadischen 5G-Basisstation auch gleichzeitig eine Referenzstation für das Precision- / Spot-Farming, die die Korrekturdaten über das aufgespannte 5G-Campusnetz aussendet.

Für die Neural-Box® in der Station wurde in ENCAMPS von ADVES ein passendes Einsteck-Modul mit RTK-Empfänger entwickelt, dass die GNSS-Positionssignale empfängt und die Korrektursignale relativ zum Referenzpunkt berechnet und über die MECSware-5G-Basisstation aussendet. Es basiert auf dem u-blox F9P GNSS-Chip und kommuniziert über einen Dual-UART(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)-zu-USB(Universal Serial Bus)-Konverter.

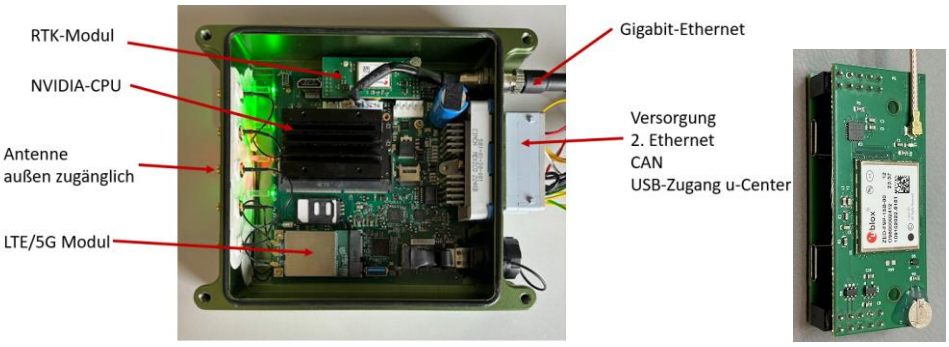

Abbildung 10: Integration des ENCAMPS-RTK-Moduls (re.) in die Neural-Box®

Die Entwicklung und Implementierung des Verfahrens zur Übertragung der Korrekturdaten über das nomadische 5G-Campusnetz an die mobilen Einheiten (Traktor-Geräte-Gespann und Drohne) im Feld wurde seitens der Hochschule OS übernommen. Aus den empfangenen Positionsdaten werden in der Neural-Box® RTCM3 Korrekturdaten erzeugt, die mithilfe des Networked Transport of RTCM (Radio Technical Comission for Maritime Services) via Internet-Procoll (NTRIP) übertragen werden. Damit wird eine nahtlose Kommunikation und schnelle Übertragung der Korrekturdaten mit einem geringen Overhead gewährleistet. Die erste Inbetriebnahme, Tests und Untersuchungen zur Genauigkeit fanden im Labor der Hochschule statt, ADVES stellte hierfür Neural-Boxen® und RTK-Entwicklungs-Kits zur Verfügung.

Für die Versuche auf den Feldern des Hofs Fleming wurden Traktor und Drohne des Hofs Fleming jeweils mit einer Neural-Box® mit integriertem RTK-Empfänger und 5G-Modem ausgestattet. Hochschule, Hof Fleming und ADVES haben gemeinsam die praktischen Feldtests mit Drohne und Traktor-Gerätegespann erfolgreich durchgeführt.

Abbildung 11: Neural-Box® mit RTK- und 5G-Empfänger auf einer der im Vorhaben eingesetzten Drohnen

Ergebnis ist ein in die ENCAMPS-Station integriertes RTK-System, das als Ersatz für kostenintensive externe Korrektursysteme und -dienste dient. Es liefert zentimetergenaue Positionsdaten für die im Spot-Farming notwendige präzise Positionierung. Alle geplanten Entwicklungs- und Erprobungsschritte wurden erfolgreich abgeschlossen, wodurch ein praxistaugliches Referenz-System für den Einsatz in der landwirtschaftlichen Praxis geschaffen wurde.

AP7 – Ad-hoc Frequenzbeantragung

In diesem Arbeitspaket wurde ein System entwickelt, mit dem die Beantragung von Lizenzen für die Frequenznutzung mit 5G-Campusnetzen bei der Bundesnetzagentur vereinfacht wird. Im Fokus steht dabei der Anwendungsfall der Landwirtschaft. Umgesetzt wurde das Beantragungssystem mittels einer Client-Server-Architektur in Form einer Webseite.

Ziel des ENCAMPS-Projekts war die technische Unterstützung landwirtschaftlicher Betriebe beim Aufbau eigener Ad-hoc-5G-Campusnetze durch Automatisierungen, um Spot-Farming zu ermöglichen. Vor diesem Hintergrund wurde bei der Realisierung des Beantragungssystems Wert daraufgelegt, dass es möglichst anwendungsorientiert gestalten ist. Folglich sollte es an die aktuellen Gegebenheiten bei der Bundesnetzagentur angepasst werden, da dort eine grundlegende Änderung des Beantragungsprozesses in naher Zukunft nicht vorgesehen ist. Deshalb wurden zunächst die gegebenen Möglichkeiten zur Beantragung entsprechender Lizenzen verglichen: lokale Zuteilung und Kurzzeitzuteilung. Aufgrund der besseren Eignung für die Anwendung im landwirtschaftlichen Bereich, u. a. angesichts höherer Flexibilität bei der Laufzeit, fiel die Entscheidung dafür, sich am Antrag für lokale Zuteilungen zu orientieren.

Während der Durchführung des Vorhabens wurden dem Zuwendungsempfänger Fortschritte auf dem Gebiet bei anderen Stellen bekannt. Neben dem in den USA kommerziell praktizierten Spectrum Access System (SAS) wurden in Deutschland im Rahmen anderer Projekte weitere Tools zur Ad-hoc-Frequenzbeantragung entwickelt, siehe *Tabelle 2.*

Tabelle 2: Tools zur Frequenzbeantragung

	TU Dortmund Campusnetzplaner	ENCAMPS	5G-ADirI	Spectrum Access System (SAS)
Sponsor	MWIK NRW	BMDV	BMDV	FCC (USA)
Regulatorische Basis	BNetzA VV Lokales Breitband	BNetzA VV Lokales Breitband	zukünftig	Citizen Broadband Radio Service (CBRS)
Prozessabbild	nur Antrag, manuell	Antrag und Zuteilung, manuell	Antrag und Zuteilung, manuell	Antrag und Zuteilung, vollautomatisch
Technische Basis	BNetzA Antragsformular (Excel)	BNetzA Antragsformular (Excel)	Industrie 4.0 Verwaltungsschale (Digitaler Zwilling)	Wireless Innovation Forum Standards
Verfügbarkeit	öffentlich, kostenlos	intern	intern	kommerziell
Integrationsaufwand	niedrig	niedrig	hoch	hoch

Zur Realisierung des Beantragungssystems wurde ein Proof of Concept System in Form einer einfachen Webanwendung entwickelt. Hierfür wurde im Rahmen des Projekts eine Masterarbeit und eine studentische Arbeit betreut. Die resultierende Anwendung ist auf dem React-Framework aufgebaut und ist durch ihre einfache Bedienbarkeit und das responsive Verhalten von diversen Endgeräten aus bedienbar. Es wurde ein minimalistischer Ansatz für das Frontend gewählt, damit dieses möglichst benutzerfreundlich ist. Der Software liegt eine modulare Client-Server-Architektur zugrunde, welche eine klare Trennung der Nutzenden (landwirtschaftliche Betriebe und Bundesnetzagentur) ermöglicht. So ist das Frontend in ein Modul für den landwirtschaftlichen Betrieb sowie ein Modul zur Bearbeitung durch die Bundesnetzagentur unterteilt.

Das Modul für den landwirtschaftlichen Betrieb dient zur Vereinfachung der erforderlichen Unterlagen des Antrags für lokale Zuteilungen. Dabei wird der Antrag über das Frontend erstellt. Somit ist es nicht mehr notwendig, dass die Nutzenden die Excel-Formulare der Bundesnetzagentur ausfüllen. Anschließend kann die Antragstellung auf zwei verschiedene Weisen erfolgen. Zum einen ist es möglich, den Antrag als Excel-Datei zu exportieren und manuell einzureichen, zum anderen soll die Antragstellung automatisiert erfolgen können. Statische Werte, wie die Koordinaten der Felder müssen zuvor einmalig eingegeben werden, wie in *Abbildung 12* am Beispiel einer Basisstation gezeigt. Gebietskoordinaten lassen sich neben der manuellen Eingabe auch durch Hochladen einer in der Landwirtschaft gebräuchlichen GIS(Geoinformationssystem)-Datei einlesen und werden automatisch auf einer entsprechenden Karte angezeigt. Zudem wird ein einfaches Frequenznutzungskonzept erstellt. Beim Absenden wird der Antrag im Interface der Sachbearbeiter zur Bearbeitung dargestellt. Dort bietet sich nach dem Login die Möglichkeit, die gestellten Anträge in übersichtlicher Darstellung anzusehen und zu bestätigen bzw. abzulehnen.

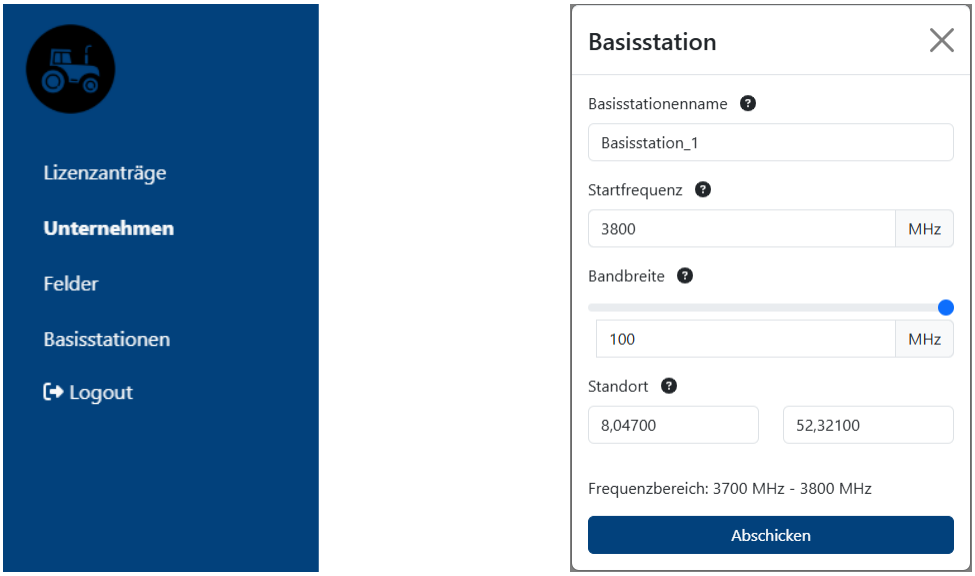

Abbildung 12: Seitenleiste bzw. Eingabe der Basisstation im Beantragungssystem

Im Verlauf des Projekts hat MECSware das vorhandene RESTful Application Programming Interface (MECS API) erweitert. Alle Parameter der Frequenzzuteilung könnten vom Beantragungssystems über das MECS API – auch dynamisch – konfiguriert werden. Damit wären manuelle Fehler in der Übertragung der Daten ausgeschlossen.

Eine Integration des Beantragungssystems mit der MECS API, wie diese im Fall der Verwendung des in den USA angewandten Spectrum Access Systems (SAS) notwendig gewesen wäre, war jedoch nicht erforderlich. Durch die deutlich geringere Systemkomplexität ergab sich bei MECSware ein gegenüber der Planung reduzierter Personalaufwand.

Um nomadische oder Ad-hoc-5G-Netze – auch für andere Einsatzfälle – kommerziell einsetzen zu können, wird es notwendig sein, die verschiedenen Verfahren in Zusammenarbeit mit der BNetzA (Bundesnetzagentur) zu analysieren. Ziel muss ein durchgehend digitalisierter Beantragungs- und Zuteilungsprozess sein.

AP8 – Demonstration und Evaluation

Für Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurde neben dem nomadischen Ad-hoc-5G-Campusnetz, das auf dem Hof Fleming realisiert wurde, im Rahmen des Projekts ein 5G-Campusnetz auf dem landwirtschaftlichen Experimentierfeld des Agro-Technicums der Hochschule Osnabrück aufgebaut und in Betrieb genommen. Hier wurde die O-RAN Architektur verwendet. Ein solches 5G-Netzwerk besteht neben dem Kernnetz aus einem Radio Access Network (RAN), welches aus drei Komponenten zusammengesetzt ist, der Data Unit (DU), der Centralized Unit (CU) sowie der Radio Unit (RU). In diesem Falle wurde das Kernnetz auf einem Server des Rechenzentrums der Universität Osnabrück installiert. Das RAN wurde an einem bereits vorhanden Laternenmast im Zentrum des Experimentierfelds angebracht. Zur Zeitsynchronisation zwischen RU und RAN musste eine Netzwerkswitch eingebaut werden, hier die Fibrolan µFalcon-RX. Zwischen der RU und Switch wurde ein Glasfaserkabel verlegt. Die verwendete 5G-Software ist die Open-Source-Software von OpenAirInterface (OAI).

An das Netzwerk wurde ein Agrarroboter, der mit einem 5G-Modem versehen ist, angebunden (siehe *Abbildung 13*). Er wurde mit dem Robot Operating System (ROS) so eingerichtet, dass er

sich von einem 5G-Raspberry Pi aus steuern lässt. Darüber hinaus können Kameradaten in Echtzeit übertragen werden. Dies wurde analog auch für das MECSware-System realisiert.

Abbildung 13: Roboter mit 5G-Anbindung am Agro-Technicum der Hochschule Osnabrück

Der Hof Fleming verfügt seit mehreren Jahren über eine 5G-Campusnetzlizenz auf dem gesamten Hofgelände und zahlreichen landwirtschaftlichen Nutzflächen. Entsprechend musste für den Betrieb im Vorhaben keine Nutzungslizenzen die entsprechenden Frequenzbereiche bei der Bundesnetzagentur beantragt werden.
Die mobile 5G-Basiststation (siehe AP2) wurde auf Hof Fleming aufgebaut. Der Speed Proxy (siehe AP4) wurde in die mobilen 5G-Basisstation integriert. Als Plattform wurde hierfür ein generischer Raspberry Pi 3B+ in Verbindung mit einer externen 4-fach USB-Netzwerkkarte gewählt. Die Stromversorgung erfolgt über das Batteriesystem der mobilen 5G-Basisstation. An die Netzwerkkarte können beliebige Technologien für den Internetzugang (Starlink-Dishes, 5G-Module, etc.) angeschlossen werden. Wie in AP4 beschrieben, haben wir uns aufgrund unzuverlässiger Performanz von PLMNs im ländlichen Raum auf die Starlink-Anbindung fokussiert. Der Raspberry Pi routet den Netzwerk-Traffic aus dem 5G-Campusnetz über die angebundenen Netzwerkschnittstellen in das Internet. Dabei können die in AP4 evaluierten Methoden zur Link-Bündelung angewendet werden, um eine hinreichend performante und robuste Cloud-Edge-Verbindung zu gewährleisten. Durch diese versatile Plattform, welche auf Basis des Linux-Kernels eine Vielzahl an Routingfunktionalitäten unterstützt, dient der Aufbau im demonstrierten Szenario als reines Gateway und Network-Address-Translator (NAT), erlaubt jedoch ohne weitere Hardware-Anpassungen auch weitergehende Bündelungs-, Ausfallsicherheits- oder Edge-unterstützende Netzwerkfunktionalität.
Parallel dazu wurde zur qualitativen Auswertung verschiedener Positionierungsoptionen der Internetanbindung, explizit der Satelliten-basierten Konnektivität, ein betriebseigener Traktor mit einer umfangreichen, mobilen Konnektivitätsplattform (*Abbildung 14*) ausgestattet. Diese ist im Projekt vor allem zur Durchführung von Leistungsbewertungen zum Einsatz gekommen, bietet jedoch die Basis zur Erprobung weiterer, heterogener Verbindungsszenarien. Hierbei wurde ebenfalls auf Basis eines Raspberry Pi-Einplatinencomputers gearbeitet, der aufgrund der gesteigerten Performance-Anforderungen in der 5. Hardware-Version verwendet wurde.

Neben der Stromversorgung aus dem Bordnetz und damit verbundenen vollständig autonomen Start- und Stopp-Funktionalität für Messungen mit ungeschultem Bedienpersonal wurden einfache Sensoren angebunden (GPS(Global Positioning System)- und Lagesensoren), welche zusammen mit einem hochwertigen WLAN(Wireless Local Area Network)- sowie 5G-Modem über eine Mehrfach-Dachantenne realitätsnahe Funkszenarien ermöglichen. Darüber hinaus wurde hier eine Variante der Starlink-Antenne für den mobilen Betrieb („Flat High Performance“-Antenne) angebunden, um Referenzmessungen durchzuführen und eine Verlagerung der Satellitenanbindung auf eine leistungsfähige mobile Plattform zu evaluieren (bspw. Mähdrescher mit geringeren Beschränkungen in Bezug auf Platz und Stromversorgung).
Aufgrund der besonderen Herausforderungen von Starlink, des proprietären Aufbaus und den projektspezifischen Erfordernissen musste auch auf dem Traktor eine abgesicherte projektspezifische Verkabelung installiert werden.

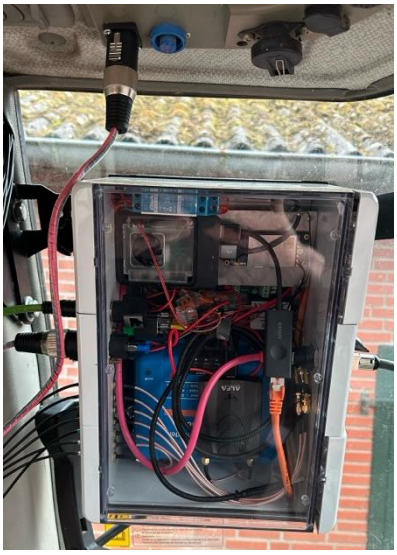

Abbildung 14: IT-Hardware auf dem Traktor

Das Gesamtsystem wurde durchgehend auf dem Hof Fleming eingesetzt. Permanent wurden Datenpakete über Starlink zwischen den Maschinen des Hofs Fleming und der Uni Osnabrück übertragen. Das hybride, nomadisches 5G-Campus-Agrarnetz kam bei sehr unterschiedlichen landwirtschaftlichen Arbeiten zum Einsatz (vgl. *Abbildung 15*). Dabei wurden teilweise an weiteren Maschinen Sensoren, wie beispielweise an einem Mähwerk, installiert.

Abbildung 15: Hybrides, nomadisches 5G-Satelliten-Agrarnetzwerk im Einsatz

In der Kombination mit weiteren Traktoren (vgl. *Abbildung 16*) konnte ein schneller Feldwechsel durchgeführt werden und so ein kaum bis gar nicht versorgtes Feld erschlossen werden.

Abbildung 16: Mobile Einheit mit Traktor für schnellen Feldwechsel

Das RTK-System und die 5G-Konfiguration des MECSware-Systems wurden in das nomadische Campusnetz integriert und erprobt. Im Rahmen der Evaluation des Projekts wurden zahlreiche wissenschaftliche Publikationen veröffentlicht.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

TEIL III

Erfolgskontrollbericht

Wissenschaftlich-Technische Ergebnisse

Ein Ergebnis des Projekts ist die Definition und Dokumentation der relevanten Anwendungsfälle von nomadischen 5G-Campusnetzen in der Landwirtschaft. Die dokumentierte Übersicht zu den vielfältigen Anwendungen sowie die daraus resultierenden Anforderungen an die Technik können als Grundlage für weitere Arbeiten zur Verwendung und der (Weiter-)Entwicklung von 5G-Campusnetzen für den landwirtschaftlichen Bereich dienen. Basierend auf diesen Anforderungen können zudem alternative Kommunikationstechnologien für die entsprechenden Use Cases erforscht werden.

Die entworfene Gesamtarchitektur des Systems als Frontgewicht eines Traktors mit ausfahrbarem Antennenmast sowie der autarken Energieversorgung mittels Batterien und ergänzender Solarmodule ist als Vorlage für die Realisierung weiterer transportierbarer Campusnetze geeignet. Hierzu gehört auch ein Konzept für die Umsetzung der Kommunikationspfade über das Starlink-Satellitennetzwerk und den 5G-Mobilfunk.

Umfassende Untersuchungen vom Starlink-System brachten zahlreiche Erkenntnisse über dessen Performanz in verschiedene Szenarien. So konnte das Verhalten der Leistungsfähigkeit von Starlink sowohl für den stationären als auch für den mobilen Einsatz der Satellitenschüsseln quantifiziert werden. Weiterhin wurde ermittelt, welcher Benefit sich durch die Bündelung mehrerer Schüsseln ergibt. Darüber hinaus gab es Erkenntnisse darüber, welchen Einfluss Verschattung und Wetter auf das System haben. Die gewonnenen Ergebnisse wurden wissenschaftlich publiziert. Zudem wurden Modelle zur Vorhersage der Starlink-Performanz entwickelt, auf dessen Grundlage Scheduling-Strategien für Edge/Cloud-Migration entwickelt werden können.

Ein weiteres Ergebnis ist ein Proof of Concept für ein System zur Vereinfachung der Beantragung der Lizenzen für Frequenzen von 5G-Campusnetzen bei der Bundesnetzagentur, speziell auf den Anwendungsfall der Landwirtschaft ausgerichtet. Dieses Proof of Concept bietet eine Basis für die Weiterentwicklung zu einer Automatisierung des Beantragungsprozesses auf der Seite des Landwirts.

Der umgesetzte Demonstrator kann für weitere Forschungsarbeiten zur Optimierung des Konzepts des nomadischen 5G-Campusnetzes in der Landwirtschaft verwendet werden.

Publikationen

Ergebnisse des Projektes wurden in folgenden Publikationen veröffentlicht bzw. für die Publikation vorbereitet und auf Fachtagungen präsentiert:

1.1.1 Liste der Paper

- [BBL+24] Alexander Boeckenholt, Simon Beginn, Dominic Laniewski, Eric Lanfer **"Towards a Weather-Based Prediction Model For Starlink Throughput"** Proc. of the 28. ITG-Fachtagung Mobilkommunikation, Osnabrück, May 15-16, 2024.
- [LLB+24] Dominic Laniewski, Eric Lanfer, Simon Beginn, Jan Dunker, Michael Dückers, Nils Aschenbruck **"Starlink on the Road: A First Look at Mobile Starlink Performance in Central Europe"** Proc. of the IFIP Network Traffic Measurement and Analysis Conference, TMA, Dresden, Germany, May 21-24, 2024.
- [LLM+24] Dominic Laniewski, Eric Lanfer, Bernd Meijerink, Roland van Rijswijk-Deij, Nils Aschenbruck **"WetLinks: a Large-Scale Longitudinal Starlink Dataset with Contiguous**

Weather Data" Proc. of the IFIP Network Traffic Measurement and Analysis Conference, TMA, Dresden, Germany, May 21-24, 2024.

- [LLW+24] Eric Lanfer, Dominic Laniewski, Malte Wehmeier, Nils Aschenbruck **"Observing the Skies – Ground-Based Cloud Detection for Evaluating the Impact of Clouds on LEO Communications"** Proc. of the 2nd ACM Workshop on LEO Networking and Communication in conjunction with the 30th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom) LEO-NET, Washington, D.C., USA, Nov. 18, 2024.
- [LLA+24] Dominic Laniewski, Eric Lanfer, Nils Aschenbruck **"Measuring Mobile Starlink Performance: A Comprehensive Look"** in IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 6, pp. 1266-1283, 2025.
- [RT+25] Ralf Tönjes **"5G Campusnetze für die Landwirtschaft"** in AGRARTECHNIK Magazin, Deutscher Landwirtschaftsverlag, Würzburg, Februar 2025.

1.1.2 Liste der Demos

- [LLO+24] Eric Lanfer, Dominic Laniewski, Daniel Otten, Nils Aschenbruck **"Weather-Based Link Prediction for LEO-Satellite Networks using the WetLinks Dataset"** Demo at the 23rd IFIP/Networking Conference, Thessaloniki, Greece, June 3-6, 2024.
- [LTZ+24] Dominic Laniewski, Stefanie Thieme, Till Zimmermann, Eric Lanfer, Nikolas Wintering, Jannis Mast, Nils Aschenbruck **"Demo: The Impact of LEO Satellite Network Instabilities on the Performance of Networking Applications"** Demo at the 49th IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN), Caen, France, Oct. 8-10, 2024.

1.1.3 Unveröffentlicht / Im Review-Prozess

- [LZT+24] Dominic Laniewski, Till Zimmermann, Stefanie Thieme, Eric Lanfer, Nikolas Wintering, Nils Aschenbruck **"A First Look at Shared Starlink Performance within a Single Service Cell"**
- [TDW+25] Stefanie Thieme, Mario Dyczka, Nikolas Wintering, Nils Aschenbruck **"Evaluation von Link Bonding Ansätzen in LEO-Satellitennetzwerken"**
- [KTS+25] Felix Kahmann, Ralf Tönjes, Lennart Schonebeck, Timo Kranz, Till Zimmermann, Dominic Laniewski, Harald Andreesen, Andreas Möller **"Nomadic 5G Network with Satellite based Internet Connectivity for Agriculture"** Accepted for WFCS'25, Rostock, 10-13. June 2025.

1.1.4 Invited Talks

- Eric Lanfer, Dominic Laniewski, Nils Aschenbruck **"WetLinks and Starlink on the Road: Exploring The Stationary and Mobile Performance of Starlink"** Contribution at the Measurement Analysis and Tools (MAT) Working Group Session at RIPE 88, Krakow, Poland, May 20-24, 2024.
- Eric Lanfer, Dominic Laniewski, Nils Aschenbruck **"Measuring Low Earth Orbit (LEO) Satellite Networks: The Impact of Weather on the Link Quality"** Contribution at the 8th OpenSense Short Online Conference (SOC) funded by European Cooperation in Science and Technology (COST).

Verwertung

Hochschule Osnabrück

Die Hochschule Osnabrück konnte die Projektergebnisse für den Ausbau ihrer Drittmittelstärke nutzen und ein weiteres Forschungsprojekt beantragen, welches, aufbauend auf den Ergebnissen von ENCAMPS, an der Weiterentwicklung von (Beyond) 5G-Campusnetzen für Spot-Farming arbeitet: Cropboter-Net, gefördert vom Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und dem Land Niedersachen. Kooperationspartner sind hier u. a. die ADVES GmbH & Co. KG sowie der Hof Fleming. Schwerpunkte liegen auf einer Erhöhung der Resilienz durch Integration paralleler Kommunikationspfade, einem entsprechenden Netzwerkmanagement für dynamische Agrarprozesse und der Integration von IT-Sicherheitsmechanismen in das Campusnetz.

Auf der VDE-Fachtagung Mobilkommunikation im Mai 2024, organisiert vom Labor für Hochfrequenztechnik und Mobilkommunikation der Hochschule Osnabrück, wurde das Projekt mit einem Poster öffentlichkeitswirksam vorgestellt.

Im Kontext des ENCAMPS-Projekts wurde eine Masterarbeit an der Hochschule Osnabrück angefertigt. Darüber hinaus ist geplant, die Projektergebnisse in Zukunft in die Lehre und in den Praktikumsbetrieb der Hochschule einzubringen.

Es wurde ein gemeinsames Paper zusammen mit ADVES und der Universität Osnabrück zu den Ergebnissen des Projekts auf einer wissenschaftlichen Konferenz eingereicht und angenommen. Eine Veröffentlichung wird folgen.

Weiterhin wurde ein Artikel in der Zeitschrift AGRARTECHNIK zu 5G-Campusnetzen im landwirtschaftlichen Bereich veröffentlicht, der u. a. auf die Ergebnisse des ENCAMPS-Projekts eingeht.

Von Seiten der Hochschule Osnabrück wurden im Rahmen des Projekts keine Schutzrechte angemeldet.

ADVES

Zusammen mit dem Hof Fleming und den Forschungspartnern ist geplant die ENCAMPS-Station und die mobilen Einheiten weiter zu nutzen, um das Gesamtkonzept der nomadischen Station für das Spot-Farming und die Nutzung in dynamischen Agrarprozessen zu optimieren und weiterzuentwickeln und insbesondere auch weitere neuere Übertragungstechnologien zu erproben.

Das im Rahmen dieses Projektes entwickelte RTK-Modul und die Übertragungsverfahren der Korrekturdaten zur Integration in unsere Neural-Boxen® werden kurzfristig als Produkt weiterentwickelt und erweitern dann unser Produktportfolio um RTK-Lösungen für das Precision- und Spot-Farming.

Eine weitere mittelfristig angestrebte Verwertung ist die Entwicklung einer sehr kompakten, kostengünstigen RTK-Referenzstation, die über Mobilfunk 4G/5G die Korrekturdaten in die ADVES-eigene Cloud-Lösung EDAS überträgt und von den mobilen Einheiten mit Neural-Box® abgerufen werden können.

Die im Projekt gewonnenen Erfahrungen und das Know-how über die 5G-Campusnetz-Lösung und die Starlink-Anbindung können direkt im Vertrieb genutzt werden, um unsere OEM-Kunden in der Landtechnik kompetent beraten zu können und mit Ihnen gemeinsame Lösungen zu entwickeln.

Von ADVES wurden im Rahmen des Projekts keine Schutzrechte angemeldet.

MECSware

Die Ergebnisse des Projekts fließen in die Weiterentwicklung der MECSware campusXG® Systemlösung zur Anwendung in nomadischen bzw. ad-hoc 5G-Netzen ein. Die Landwirtschaft ist dabei nur eines von vielen Anwendungsgebieten. Mit der Integration der MECSware GmbH in die Riedel Group werden sich vielfältige Möglichkeiten im Bereich der Veranstaltungstechnik eröffnen.

MECSware wird sich für eine weitergehende Digitalisierung des Frequenzbeantragungs- und Zuteilungsprozesses in Zusammenarbeit mit der BNetzA einsetzen.

Von MECSware wurden im Rahmen des Projekts keine Schutzrechte angemeldet.

Universität Osnabrück

Wie der Publikationsliste zu entnehmen ist, konnten die Ergebnisse des Projekts in einer Vielzahl an Papern und Demos auf Fachkonferenzen präsentiert werden. Auch nach Projektende wird noch mit einzelnen Veröffentlichungen gerechnet.

Darüber hinaus wurde die Arbeitsgruppe Verteilte Systeme auf einschlägige Fachtagungen eingeladen, wie dem 88. RIPE Meeting, einer Konferenz für Internet Service Provider, Netzbetreiber und weiterer Akteure, die maßgeblichen Einfluss auf die Internet-Regulierung weltweit haben, oder der 8. OpenSense Short Online Conference, welche den Austausch zu neuen Möglichkeiten der Wettersensorik unterstützt. Dadurch konnte sich die AG Verteilte Systeme einen Expertenstatus, auch über die Wissenschaftscommunity hinaus, im Bereich der LEO-Satellitennetze und deren Beziehung zu Umwelteinflüssen erarbeiten.

Im Laufe des Projektes wurde zudem eine Messkampagne mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) gestartet und am Projekt LEOScope (vgl. https://leoscope.surrey.ac.uk/) mitgewirkt, welches ein Open-Source Mess-Testbed für LEO-Satellitennetze aufbaut. Beide Kooperationen werden über ENCAMPS hinaus fortgeführt.

Im Kontext von ENCAMPS konnte eine Bachelorarbeit erfolgreich abgeschlossen werden. Außerdem werden die Ergebnisse des Projekts voraussichtlich in zwei Doktorarbeiten der Arbeitsgruppe Verteilte Systeme einfließen.

Hof Fleming

Der landwirtschaftliche Betrieb Hof Fleming wird gemeinsam mit ADVES und den Forschungspartnern die ENCAMPS-Basisstation auch in Zukunft weiter nutzen. Ziel der Arbeiten auf dem Hof Fleming ist es, das Gesamtkonzept der nomadischen Station zur Nutzung in dynamischen Agrarprozessen weiter zu optimieren. Darüber hinaus sollen weitere Übertragungstechnologien in Kombination mit 5G oder/und Starlink erprobt werden.

Der Hof Fleming ist Erprobungsbetrieb des Landmaschinenherstellers Fendt und hatte in den letzten Wochen bereits Gespräche, wie das Erarbeitete in öffentlich geförderte FuE-Vorhaben des Herstellers einfließen kann. Dafür wird die mobile Fronteinheit derzeit noch einmal überarbeitet und unter anderem ein leistungsfähiges WLAN-Netz ergänzt.

Parallel bringt der Hof die ENCAMPS-Systemkomponenten in eigene laufende Vorhaben wie dem Projekt *EIP Agri-PV Field Garden* ein. Bei dem Projekt geht es um die Entwicklung eines Bewirtschaftungskonzepts für Agri-PV-Anlagen (https://www.agripv-fieldgarden.de/). Im Jahr 2025 sollen unter anderem Robotiksysteme und Sensoren getestet werden.

Das im Rahmen des Vorhabens ENCAMPS aufgebaute Wissen rund um 5G-Campusnetze und Starlink wird in weitere Vorhaben eingebracht. Landwirte und Landwirtinnen können sich darüber auf dem Hof informieren.

Der Hof Fleming hat im Rahmen des Vorhabens keine Schutzrechte angemeldet.

Zeitplan

Das Projekt wurde entsprechend der Planung erfolgreich bis zum 31.12.24 abgeschlossen.

Literaturverzeichnis

[AAA+22] I. Ahmad, M. G. AlFailakawi, A. AlMutawa, L. Alsalman, **"Container scheduling techniques: A Survey and assessment"** in Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, vol. 34, no. 7, 2022, pp. 3934-3947, doi: 10.1016/j.jksuci.2021.03.002.

[Am19] M. Amend, **"MP-DCCP for enabling transfer of UDP or IP traffic over multiple data paths in multi-connectivity networks"** Slides from the TSVWG Meeting at IETF 104, 2019, https://datatracker.ietf.org/doc/slides-104-tsvwg-sessb-43-markus-amend-multipath-dccp/

[MSJ+19] A. Mishra, X. Sun, A. Jain, S. Pande, R. Joshi, and B. Leong, **"The Great Internet TCP Congestion Control Census"** in Proceedings of the ACM on Measurement and Analysis of Computing Systems, vol. 3, no. 3, 2019, pp. 1-24, doi:.10.1145/3366693.

[SS+21] G. Singh, P. Singh, **"A Taxonomy and Survey on Container Migration Techniques in Cloud Computing"** in Sustainable Development Through Engineering Innovations. Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 113, 2021, pp. 419-429, doi: 10.1007/978-981-15-9554-7_36.

[WXZ+18] S. Wang, J. Xu, N. Zhang and Y. Liu, "**A Survey on Service Migration in Mobile Edge Computing"** in IEEE Access, vol. 6, 2018, pp. 23511-23528, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2828102.

[XWX+20] B. Xu et al., **"Sledge: Towards Efficient Live Migration of Docker Containers"** in IEEE 13th International Conference on Cloud Computing (CLOUD), 2020, pp. 321-328, doi: 10.1109/CLOUD49709.2020.00052.

Anhang: Veröffentlichte Publikationen