

5G Campus Netz - Use Case Wetterstation

Lukas Kahl, Jens Hummel

RheinMain University of Applied Sciences, Wiesbaden, Germany



Figure 1: Wetterstation am Campus "Unter den Eichen"

Abstract

Die vorliegende Forschungsarbeit entwickelt ein ganzheitliches Konzept für den Aufbau eines privaten 5G-Standalone (SA) Campus-Netzwerks am Standort „Unter den Eichen“ der Hochschule RheinMain. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Bedeutung von Industrie 4.0 und der Notwendigkeit souveräner Kommunikationsinfrastrukturen wird eine Architektur basierend auf dem Open-Source-Kernnetz Open5GS und software-definierten Funkssystemen (SDR) von CableFree evaluiert. Ein zentraler Forschungsaspekt ist die Migration der bestehenden, energieautarken Wetterstation von einer konventionellen WLAN-Infrastruktur auf den modernen 5G RedCap (Reduced Capability) Standard gemäß 3GPP Release 17.

Die Arbeit analysiert detailliert die energetischen Herausforderungen des Solar- und Batteriebetriebs im Winter und prüft verschiedene Hardware-Integrationsstrategien für die Anbindung der meteorologischen Sensorik (Lambrecht Ser[LOG]) und des Energiemanagementsystems (Victron Cerbo GX). Hierzu wird ein Vergleich zwischen der Nutzung von 5G M.2-Modulen (Quectel RG255C) und industrieller IoT-Router aufgestellt, in welchem gezeigt wird, wie die M.2-Module starke Defizite im Hostless-Betrieb haben, wohingegen die industriellen Router durch spezifische Sleep-Modes und Schnittstellenkompatibilität die energetische Autarkie der Station gewährleisten. Erweitert werden Anwendungsszenarien wie der Einsatz von Drohnen zur Gebäudeinspektion und die Integration von Quantum Key Distribution (QKD) zur Absicherung der Kommunikation vorgeschlagen, um diverse Nutzungsszenarien des Campus-Netzes aufzuzeigen.

1. Einleitung und Motivation

1.1. Technologischer Wandel und Campus-Netze

Die digitale Transformation von Bildungs- und Forschungseinrichtungen erfordert zunehmend leistungsfähige, flexible und sichere Kommunikationsinfrastrukturen. Während klassische WLAN-Technologien (Wi-Fi 6/6E/7) für die allgemeine Konnektivität von Studierenden und Mitarbeitenden unverzichtbar bleiben, stoßen sie bei spezialisierten Anwendungen im Bereich des Internet of Things (IoT), der kritischen Infrastruktursteuerung und der Echtzeit-Kommunikation an ihre Grenzen. Deterministische Latenzzeiten, garantierte Bandbreiten (Quality of Service) und eine weitreichende Abdeckung im Außenbereich sind Anforderungen, die durch private 5G-Campusnetze (Non-Public Networks, NPN) adressiert werden.

In Deutschland hat die Bundesnetzagentur (BNetzA) mit der Bereitstellung des Frequenzbereichs von 3.700 MHz bis 3.800 MHz für lokale Anwendungen eine regulatorische Grundlage geschaffen, die es Institutionen wie der Hochschule RheinMain ermöglicht, eigene, von öffentlichen Mobilfunknetzen unabhängige 5G-Infrastrukturen zu betreiben. [Bun] Dies bietet nicht nur Datensouveränität, sondern auch eine ideale Testumgebung für Lehre und Forschung.

1.2. Problemstellung: Die energieautarke Wetterstation

Ein konkreter Anwendungsfall, der die Notwendigkeit einer technologischen Evolution verdeutlicht, ist die Wetterstation am Campus „Unter den Eichen“. Diese Station erfasst meteorologische Parameter wie Temperatur, Niederschlag, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung, die für verschiedene Forschungsprojekte essenziell sind. [AS24] Die Station wird energieautark über eine Photovoltaikanlage (500 Wp) und zwei Lithium-Eisenphosphat-Akkus (2x 768Wh = 1536Wh) versorgt.

Die aktuelle Datenübertragung erfolgt über eine WLAN-Richtfunkstrecke. Diese Konstellation weist jedoch signifikante Nachteile auf:

1. **Energetische Ineffizienz:** Der derzeit eingesetzte WLAN-Router verbraucht permanent Energie, was insbesondere in den lichtarmen Wintermonaten (November bis Januar) zu einer kritischen Entladung des Akkus führt. In der Vergangenheit führte dies bereits zu Systemausfällen und Datenlücken. [AS24]
2. **Reichweite und Stabilität:** WLAN im 2,4 GHz oder 5 GHz Band ist anfällig für Interferenzen und bietet bei Hindernissen (Vegetation, Gebäude) eine begrenzte Reichweite, was die Standortwahl der Sensorik einschränkt.
3. **Fehlende Fernwartung:** Bei einem Ausfall der Verbindung ist eine Diagnose aus der Ferne oft nicht möglich, da keine Out-of-Band-Management-Verbindung besteht.

1.3. Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel dieser Ausarbeitung ist die Entwicklung eines umfassenden Konzepts für das 5G-Campusnetz, das diese Probleme löst. Es soll gezeigt werden, wie durch den Einsatz der neuen 5G RedCap-Technologie (Reduced Capability) der Energieverbrauch der Kommunikationstechnik so weit gesenkt werden kann,

dass ein ganzjähriger, unterbrechungsfreier Betrieb der Wetterstation gewährleistet ist. Gleichzeitig soll das Netz leistungsfähig genug sein, um bandbreitenintensive Anwendungen wie Drohnen-Videostreams und sicherheitskritische Technologien wie QKD zu unterstützen.

Neben der technischen Realisierung zielt das Konzept darauf ab, eine innovative Forschungsplattform zu etablieren. Diese ermöglicht es Studierenden, sich experimentell mit modernen Mobilfunkstandards auseinanderzusetzen und eigene Lösungsansätze in einem realen Anwendungsszenario zu evaluieren.

2. Analyse vergleichbarer 5G-Campus-Netzwerke im akademischen Umfeld

Die Etablierung privater 5G-Infrastrukturen an deutschen Hochschulen hat in den letzten Jahren an Dynamik gewonnen. Eine Analyse bestehender Referenzprojekte hilft, den aktuellen Stand der Forschung einzuordnen und das Alleinstellungsmerkmal des hier geplanten Netzwerks herauszuarbeiten. Die Recherche zeigt, dass sich die meisten Projekte auf Heavy-Industry- oder Indoor-Szenarien konzentrieren, was eine Lücke für energieeffiziente Outdoor-Sensorik offenlässt.

2.1. Hochschule Osnabrück: 5G in der Agrarwirtschaft

Ein prominentes Beispiel für Outdoor-Campusnetze findet sich an der Hochschule Osnabrück. Der Fokus liegt hier explizit auf der Landwirtschaft der Zukunft (Smart Farming). Das Netzwerk dient primär der Vernetzung von autonom agierenden Agrarrobotern, Feldmaschinen und Drohnen. [Hoc23]

Abgrenzung: Während dort der Fokus auf hohen Bandbreiten für Videostreams und geringen Latenzen für die Maschinensteuerung liegt, sind Energiefragen bei den meist diesel- oder akkubetriebenen Großmaschinen zweitrangig. Unser Projekt hingegen adressiert mit der Wetterstation genau das Gegenteil: Stationäre IoT-Geräte mit minimalem Energiebudget (RedCap).

2.2. Universität Koblenz (Projekt Nola): Weinbau 4.0

Das Projekt „Nola“ der Universität Koblenz erforscht 5G-Anwendungen im Steillagen-Weinbau. Ähnlich wie bei unserem Ansatz spielt hier die Topografie und die Outdoor-Tauglichkeit eine große Rolle. Ein technischer Schwerpunkt liegt auf der Nutzung von Brennstoffzellen zur Energieversorgung der Infrastrukturkomponenten im Weinberg. [Uni24]

Abgrenzung: Es bestehen Parallelen im Bereich der Energieautarkie. Allerdings fokussiert sich unser Ansatz spezifisch auf die neue 5G-RedCap-Technologie (Reduced Capability) der Release 17, um die Endgeräte günstiger und energiesparender zu machen, statt primär die Energieerzeugung (Brennstoffzelle) zu skalieren.

2.3. Technische Hochschule Rosenheim: Industrie 4.0

In Rosenheim wurde ein Campusnetz mit starkem Fokus auf industrielle Fertigungsumgebungen installiert. Hauptanwendungsfälle sind die Echtzeit-Vernetzung von Produktionsanlagen und der Einsatz von KI in der Lehre innerhalb von Fabrikhallen. [Tec23]

Abgrenzung: Dies ist ein klassisches Indoor-Szenario mit kontrollierten Umweltbedingungen. Unser Projekt hebt sich durch die Herausforderungen des Wetterschutzes, der Solarversorgung und der großen Distanzen im Außenbereich deutlich davon ab.

3. Theoretische Fundierung und Netzarchitektur

3.1. 5G Standalone (SA) Architektur

Das geplante Netzwerk basiert auf der 5G Standalone (SA) Architektur. Im Gegensatz zu Non-Standalone (NSA) Netzen, die auf einem existierenden 4G/LTE-Kernnetz (EPC) und LTE-Ankerfrequenzen aufsetzen, besteht ein SA-Netz aus einer vollständigen 5G-Infrastruktur. Dies umfasst sowohl das 5G Radio Access Network (NG-RAN) als auch das 5G Core Network (5GC).

Die Entscheidung für ein Standalone-Netz ist für den Campus-Kontext aus mehreren Gründen zwingend notwendig:

- **Vereinfachte Architektur:** Der Verzicht auf die LTE-Ebene reduziert die Hardware-Komplexität und die Abhängigkeit von Legacy-Technologien.
- **Natives 5G-Feature-Set:** Nur Standalone-Netze ermöglichen die Nutzung von Network Slicing (virtuelle Netzsegmentierung) und URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communication), was für die Steuerung von Drohnen und Robotik unerlässlich ist. [Aca]
- **Energieeffizienz der Endgeräte:** Im SA-Modus müssen Endgeräte nicht gleichzeitig nach LTE- und 5G-Signalen suchen oder Dual-Connectivity aufrechterhalten, was den Energiebedarf senkt - ein Schlüsselfaktor für die Wetterstation.

3.2. Das Kernnetz

3.2.1. Open5GS vs. free5GC

Für die Realisierung von privaten 5G-Netzen auf Basis von Open-Source-Software haben sich in der Forschungsgemeinschaft vor allem zwei Projekte etabliert: **free5GC** und **Open5GS**. Beide implementieren den 5G-Core (5GC) gemäß den 3GPP-Standards, unterscheiden sich jedoch grundlegend in ihrer Architektur, Programmiersprache und dem Unterstützungsgrad aktueller 3GPP-Releases.

free5GC ist in der Programmiersprache *Go* (Golang) verfasst und fokussiert sich primär auf die Umsetzung der 3GPP Releases 15 und 16. Es ist aufgrund der Lesbarkeit des Codes besonders in der akademischen Forschung zur Entwicklung neuer Netzwerkfunktionen beliebt. [fre]

Open5GS hingegen basiert auf *C* und *C++*. Es zeichnet sich durch eine hohe Performance und eine schnelle Adaption neuer Standards aus. [ope]

Die Entscheidung in diesem Projekt fiel zugunsten von **Open5GS**. Der ausschlaggebende Faktor ist die technische Notwendigkeit der Unterstützung von 3GPP Release 17:

- **Unterstützung von 5G RedCap (Release 17):** Das zentrale Ziel dieser Arbeit - die Energieeffizienzsteigerung der Wetterstation - basiert auf der 5G RedCap-Technologie (Reduced Capability), die erst mit 3GPP Release 17 standardisiert wurde.

Open5GS bietet die notwendige Kompatibilität, um RedCap-Endgeräte (UEs) im Core-Netz korrekt zu verwalten und deren spezifische Signalisierung zu verarbeiten. free5GC unterstützt diesen Standard aktuell nicht in dem erforderlichen Umfang.

- **Stabilität und Reife:** Neben der Feature-Unterstützung gilt Open5GS als besonders robust ("production-ready"). Da die Wetterstation einen unterbrechungsfreien Betrieb erfordert, bietet die C-basierte Implementierung Vorteile gegenüber der für experimentelle Zwecke optimierten free5GC-Architektur.
- **Ressourceneffizienz:** Die Implementierung in C/C++ führt zu einem geringeren CPU- und Speicher-Footprint. Dies korrespondiert mit dem übergeordneten Ziel der Energieeffizienz, da auch die serverseitige Infrastruktur (Core Network) energiesparend betrieben werden soll.

Somit ist Open5GS die einzige valide Option, um die Anforderungen an RedCap-Funktionalität mit der notwendigen Betriebsstabilität zu vereinen.

3.2.2. Komponenten und Funktionen

Open5GS wird als virtualisierte Anwendung auf Standard-Server-Hardware (COTS) im Rechenzentrum der Hochschule betrieben. Die Architektur folgt dem Service-Based Architecture (SBA) Ansatz, bei dem Netzwerkfunktionen (NFs) über HTTP/2-basierte Schnittstellen kommunizieren. Die zentralen Komponenten sind [AS24]:

1. **Access and Mobility Management Function (AMF):** Die AMF ist das Herzstück der Control Plane. Sie terminiert die N2-Schnittstelle zur Basisstation und die N1-Schnittstelle (NAS) zu den Endgeräten. Sie ist verantwortlich für die Registrierung, Authentifizierung und das Reachability Management der UEs (User Equipment).
2. **Session Management Function (SMF):** Die SMF steuert den Aufbau, die Modifikation und den Abbau von PDU-Sessions (Packet Data Units). Sie weist den Endgeräten IP-Adressen zu und wählt die passende User Plane Function (UPF) aus.
3. **User Plane Function (UPF):** Die UPF bildet die Datenebene. Sie leitet die Nutzerdaten zwischen dem RAN und dem externen Datennetzwerk (Internet/Intranet) weiter. Durch die Entkopplung von Control und User Plane (CUPS) kann die UPF flexibel platziert werden - beispielsweise als "Edge UPF" direkt am Campus-Standort, um die Latenzzeiten für Echtzeitanwendungen zu minimieren.
4. **UDM (Unified Data Management) & AUSF (Authentication Server Function):** Diese Datenbanken speichern die Teilnehmerprofile, Schlüsselmaterial und Sicherheitskontexte. Im Campus-Netz ermöglichen sie die Verwendung eigener SIM-Karten (physisch oder eSIM), wodurch die Hochschule volle Kontrolle über die zugelassenen Geräte hat.

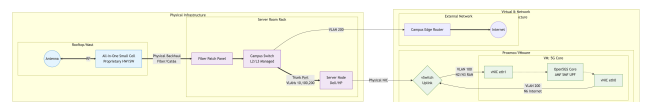


Figure 2: Netzwerkdigramm zur Integration der Small-Cell in die bestehende Hochschulinfrastruktur

3.2.3. Integration in die IT-Landschaft

Die Integration von Open5GS in die bestehende Hochschul-IT erfolgt über VLANs, um eine logische Trennung der Verkehrsströme zu gewährleisten. Figure 2 zeigt dabei die Anbindung an die bestehende Infrastruktur:

- **VLAN 10 (Management):** Zugriff auf die Dashboards und CLI der Open5GS-Komponenten.
- **VLAN 100 (RAN-Backhaul):** Transportnetz für die N1/N2/N3-Schnittstellen zwischen gNodeB und Core.
- **VLAN 200 (WAN-Uplink):** Verbindung der UPF zum Internet-Gateway der Hochschule.

**VLAN-IDs sind beispielhaft und können in der tatsächlichen Umsetzung abweichen.*

3.3. Regulatorische Rahmenbedingungen und Hardware-Entscheidung

Die Architektur des geplanten Campusnetzes verfolgt eine klare Zielsetzung: Die Maximierung von Transparenz, Modularität und Forschungsfreiheit durch den konsequenten Einsatz von Open-Source-Software. Im Gegensatz zu klassischen "Blackbox"-Lösungen kommerzieller Netzwerkausrüster, bei denen Kernnetz-Funktionen und Schnittstellen oft proprietär verschlossen sind, setzt dieses Projekt auf einen offenen Ansatz. Herzstück dieser Strategie ist die Nutzung von *Open5GS* für den 5G Core (5GC). Dieser Ansatz ermöglicht es, den gesamten Signalisierungsverkehr bis auf die Bitebene zu analysieren, eigene Netzwerk-Slices für spezifische IoT-Anwendungen zu definieren und den Quellcode bei Bedarf an forschungsspezifische Anforderungen anzupassen.

3.3.1. Die Herausforderung der Funkschnittstelle (RAN)

Während im Kernnetz eine vollständige Open-Source-Umsetzung realisierbar ist, stößt dieses Paradigma an der Luftschnittstelle (Radio Access Network, RAN) auf harte physische und rechtliche Grenzen. Zwar existieren mit *srsRAN* oder *OAI* (OpenAirInterface) leistungsfähige Open-Source-Lösungen für Software Defined Radios (SDR), doch fehlt der für diese Software gängigen Hardware (z.B. USRPs) in der Regel die notwendige CE-Zertifizierung und die Konformitätsbescheinigung für den Sendebetrieb außerhalb abgeschirmter Laborräume.

Da das geplante Netz jedoch den Außenbereich des Campus „Unter den Eichen“ real abdecken soll, ist der Einsatz einer zertifizierten Sendestufe unumgänglich, um die strengen Auflagen der Bundesnetzagentur für Campusnetze (3,7-3,8 GHz) zu erfüllen. Die Architektur-Entscheidung fiel daher auf einen hybriden Ansatz: Die Intelligenz und Steuerung verbleiben im offenen *Open5GS*-Core, während für die Sendeeinheit im Folgenden mehr proprietäre Produkte herangezogen werden. Diese Hardware fungiert als zertifizierter, standardkonformer 3GPP-Zugangspunkt. Sie bricht zwar mit dem reinen Open-Source-Gedanken auf Hardware-Ebene, ist jedoch der notwendige Schritt, um die Open-Source-Architektur rechtssicher aus dem Labor in die reale Welt zu transferieren. Trotzdem wird bei der Auswahl darauf geachtet, dass Hersteller möglichst offene Schnittstellen liefern und Kompatibilität zu Systemen Dritter aufweisen.

3.4. Das Funkzugangsnetz

3.4.1. Architekturvergleich: All-in-One Small Cell vs. Split-Architektur

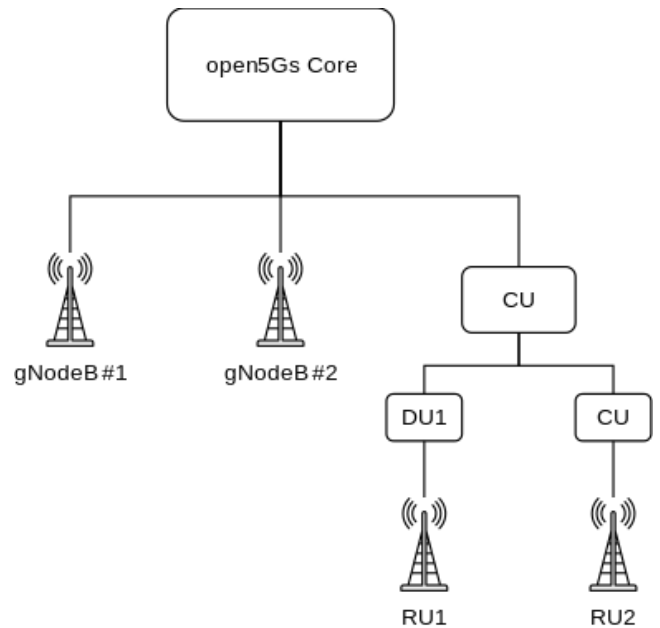


Figure 3: Aufbauvergleich von disaggregierter OpenRAN Architektur und Monolithische Small Cell

Bei der Planung des Funkzugangsnetzes (RAN) ist die Wahl der Architekturtopologie eine fundamentale Entscheidung. Im Zuge der Systemauslegung wurden zwei prinzipielle Konzepte gegenübergestellt, die sich hinsichtlich Komplexität und Hardware-Anforderungen unterscheiden, jedoch beide das gesetzte Kernnetz **Open5GS** als zentrale Steuerungsinstanz nutzen (siehe Vergleichsschema Option 1 vs. Option 2, sowie Figure 3).

3.4.1.1. Option 1: Disaggregierte OpenRAN-Architektur (Split RAN) Dieser Ansatz folgt dem Prinzip der Funktionsaufteilung. Open5GS kommuniziert hierbei über die Standard-Schnittstellen (N2/N3) mit einer **Central Unit (CU)**, welche wiederum die Daten an verteilte Einheiten weiterleitet:

- **Central Unit (CU):** Verarbeitet nicht-echtzeitkritische Protokolle (RRC, PDCP).
- **Distributed Unit (DU):** Verarbeitet echtzeitkritische Baseband-Funktionen (RLC, MAC, High-PHY).
- **Radio Unit (RU):** Die eigentliche Antenne mit RF-Front-End (Low-PHY).
- **Herausforderung:** Während diese Architektur maximale Flexibilität bietet, erhöht sie die Komplexität der Fehlerursachenanalyse drastisch. Open5GS sieht nur die CU; Probleme in der Synchronisation zwischen CU, DU und RU bleiben für das Core-Netz oft intransparent. Zudem ist die Performance stark „abhängig von der Virtualisierung“, da die CU/DU-Software-Container präzise auf der Server-Hardware abgestimmt sein müssen.

3.4.1.2. Option 2: Monolithische Small Cell (All-in-One) Im Gegensatz dazu integriert der „All-in-One“-Ansatz (gNodeB) alle logischen RAN-Funktionen (CU/DU/RU) in einem einzigen physischen Gehäuse.

- **Integration mit Open5GS:** Open5GS verbindet sich direkt mit der Small Cell. Es entfallen die komplexen internen Schnittstellen (F1, eCPRI), die bei Option 2 konfiguriert werden müssten.
- **Performance:** Da spezialisierte SoCs (System on Chip) statt generalisierter Server-CPU's für die Signalverarbeitung genutzt werden, ist die Performance hinsichtlich Latenz und Energieeffizienz **optimiert**.
- **Handover:** Trotz der kompakten Bauweise ist die Skalierbarkeit gegeben. Mehrere Small Cells, die am selben Open5GS-Core hängen, können über die **Xn-Schnittstelle** direkt miteinander kommunizieren, um nahtlose Übergaben (Handover) zu gewährleisten.

3.4.1.3. Entscheidung für die Small-Cell-Architektur Für das Campusnetz fiel die Entscheidung eindeutig auf **Option 2 (Small Cell)**. Obwohl Open5GS technisch beide Varianten unterstützt, war der Faktor **Komplexität** ausschlaggebend: Eine monolithische Lösung reduziert die Fehlerquellen zwischen Core und Antenne auf ein Minimum. Dies ermöglicht es Studierenden, sich auf die Interaktion zwischen Open5GS und den Endgeräten (z.B. RedCap-Signalisierung) zu konzentrieren, anstatt Zeit mit dem Debugging der Virtualisierungsschicht einer Split-Architektur zu verlieren.

Zudem lassen sich die beiden Netzkonzepte auch hybrid verwenden. Sollte eine weitere Skalierung in der Zukunft also eine Split-Architektur vorsehen, so kann die gNodeB weiter Teil des Netzes bleiben.

3.4.2. Vergleich der Hardware-Anbieter: CableFree, Airspan und Firecell

Für die physische Realisierung des Funkzugangnetzes (RAN) wurde eine Marktanalyse durchgeführt, bei der drei relevante Anbieter für private 5G-Netze evaluiert wurden: **Airspan Networks**, **Firecell** und **CableFree (Wireless Excellence)**.

3.4.2.1. Airspan Networks Airspan Networks ist ein weltweit führender Anbieter von OpenRAN-Lösungen und stark im Tier-1-Provider-Markt vertreten. Ihre Lösungen zeichnen sich durch massive Skalierbarkeit und eine strikte Trennung von Central Unit (CU), Distributed Unit (DU) und Radio Unit (RU) aus.

- **Vorteil:** Extrem hohe Leistungsdichte und Standardkonformität für riesige Netze.
- **Nachteil im Projektkontext:** Die hohe Komplexität der Split-Architektur erfordert oft proprietäre Hardware-Beschleuniger (Accelerators) oder spezialisierte Server-Hardware. Zudem sind die Lizenzmodelle und Support-Strukturen primär auf große Mobilfunkbetreiber ausgelegt, was für ein singuläres Campusnetz eine hohe finanzielle und administrative Hürde darstellt.

3.4.2.2. Firecell Der Anbieter Firecell (basierend auf OpenAirInterface-Technologie) positioniert sich stark im Bereich "Lab Kits" für Forschung und Lehre.

- **Bewertung:** Obwohl der Fokus auf Forschung prinzipiell attraktiv ist, wurde Firecell aus zwei entscheidenden Gründen ausgeschlossen:

1. **Hardware-Bindung (Lock-in):** Firecell vertreibt seine Lösungen primär als integrierte "Turnkey"-Pakete, die den Kauf spezifischer Server-Hardware zwingend voraussetzen. Dies steht im Widerspruch zur Strategie dieses Projekts, die vorhandene, leistungsfähige Server-Infrastruktur der Hochschule (Virtualisierungsumgebung) für den Betrieb des Core-Netzes zu nutzen. Eine flexible Software-Installation auf eigenen Servern wird nicht unterstützt.
2. **Marktverfügbarkeit:** Zum Zeitpunkt der Evaluierung waren die Lösungen laut Hersteller-Webseite für den deutschen Markt nicht transparent verfügbar oder spezifiziert, was Planungsunsicherheiten hinsichtlich der Unterstützung der deutschen Campus-Frequenzen (3,7-3,8 GHz) aufwirft.

3.4.2.3. CableFree CableFree ist ein britischer Hersteller, der sich auf drahtlose Hochleistungsnetzwerke spezialisiert hat und eine starke Präsenz im Bereich der "Private 5G Networks" für Industrie und Forschung zeigt.

- **Ansatz:** CableFree bietet integrierte "Small Cell"-Lösungen an, bei denen CU, DU und RU oft in einer kompakten Outdoor-Einheit zusammengefasst oder vereinfacht verbunden sind.
- **Fokus:** Die Systeme sind bekannt für ihre Offenheit gegenüber Third-Party-Cores und flexiblere Konfigurationsmöglichkeiten.

3.4.2.4. Entscheidung für CableFree Die Wahl fiel auf CableFree, da dieser Anbieter als einziger die technische Freiheit mit der notwendigen Wirtschaftlichkeit verbindet:

1. **Unabhängigkeit von Server-Hardware:** Im Gegensatz zu Firecell erlaubt CableFree die reine Beschaffung der Radio-Einheiten (gNodeBs). Dies ermöglicht es der Hochschule, das Core-Netz (Open5GS) auf der eigenen, bereits vorhandenen Virtualisierungsinfrastruktur zu betreiben, was Kosten spart und die IT-Integration vereinfacht.
2. **Interoperabilität:** Die Basisstationen sind nachweislich kompatibel mit Open-Source-Cores wie Open5GS, was für das Zusammenspiel mit RedCap (Release 17) essenziell ist.
3. **Kostenstruktur:** Es fallen keine verdeckten Kosten für unnötige Server-Hardware an. Zudem ist das Lizenzmodell transparenter als bei Carrier-Grade-Anbietern wie Airspan.
4. **Kompakter Formfaktor:** Die Nutzung von "All-Outdoor"- oder integrierten Small-Cells reduziert den Platz- und Energiebedarf am Standort der Wetterstation, da keine komplexe Split-Architektur mit separaten DU-Servern vor Ort aufgebaut werden muss.

Damit stellt CableFree die effizienteste Lösung dar, um ein modernes 5G-RAN aufzubauen, ohne die Flexibilität der hochschuleigenen IT-Landschaft einzuschränken.

3.4.3. Hardware-Spezifikationen

Eingesetzt wird die **Emerald 5G Small Cell** in der Outdoor-Variante. Small Cells sind kompakte Basisstationen mit geringerer Sendeleistung als Makro-Zellen, ideal für begrenzte Campus-Areale.

- **SDR-Technologie:** Die Basisstation basiert auf Software-Defined Radio (SDR). Dies bedeutet, dass Signalverarbeitung und Protokollstacks weitgehend in Software realisiert sind, was Updates auf neue 3GPP-Releases (z.B. Release 18 eRedCap) ohne Hardwaretausch ermöglicht. [Cab]
- **MIMO-Konfiguration:** Standardmäßig wird ein 2x2 MIMO-Setup (Multiple Input Multiple Output) verwendet. Optional ist 4x4 MIMO möglich, um den Datendurchsatz durch räumliches Multiplexing zu verdoppeln. Für die Wetterstation ist 2x2 MIMO ausreichend, für Videostreams von Drohnen bietet 4x4 MIMO jedoch signifikante Vorteile in der Uplink-Kapazität. [Cab]
- **Schnittstellen:** Die Verbindung zum Core erfolgt über Gigabit-Ethernet (RJ45) oder SFP (Glasfaser). Wichtig ist die Unterstützung von PTP (Precision Time Protocol) oder GPS-Synchronisation, da 5G im TDD-Verfahren (Time Division Duplex) auf eine mikrosekundengenaue Zeitsynchronisation aller Zellen angewiesen ist, um Interferenzen zwischen Uplink- und Downlink-Zeitschlitz zu vermeiden.

3.5. Frequenzregulierung und Planung

Das Netz operiert im Frequenzbereich **3.700 MHz bis 3.800 MHz** (n78). Die Bundesnetzagentur stellt diesen Bereich exklusiv für lokale Campusnetze zur Verfügung.

- **Bandbreite:** Es können bis zu 100 MHz Bandbreite beantragt werden. Eine breitere Kanalbandbreite erhöht den maximalen Datendurchsatz direkt.
- **Kostenstruktur:** Die Gebühren sind investitionsfreundlich gestaltet

$$\text{Gebühr} = 1000 + B \cdot t \cdot 5 \cdot (6a_1 + a_2),$$

was den Betrieb auch für Hochschulprojekte wirtschaftlich macht. [Bun]

Dabei gilt:

- B — Anzahl der beantragten Basisstationen
 - t — Laufzeit der Frequenzzuteilung in Jahren
 - a_1 — Anzahl der genutzten Frequenzblöcke im Bereich unter 10 MHz
 - a_2 — Anzahl der genutzten Frequenzblöcke im Bereich über 10 MHz
- **Physikalische Eigenschaften:** Das 3,7 GHz Band bietet einen guten Kompromiss zwischen Reichweite und Kapazität. Die Gebäudedurchdringung ist jedoch schlechter als bei LTE-Bändern (z.B. 800 MHz), weshalb die Standortwahl der Antennen (Outdoor vs. Indoor-Versorgung) kritisch ist. [Anv]

3.6. Standortkonzept: Mobile-First-Ansatz

Aufgrund der komplexen Anforderungen an bauliche Veränderungen auf dem Campus (Statik, Blitzschutz, Gebäudedurchdringungen) verfolgt dieses Projekt eine zweistufige Implementierungsstrategie. Priorität hat eine flexible, mobile Lösung, die ohne bauliche Eingriffe sofort einsetzbar ist. Eine stationäre Dachinstallation wird als optionale Ausbaustufe für den späteren Dauerbetrieb konzipiert.

3.6.1. Phase 1: Die mobile Basiseinheit („5G on Wheels“)

Als erster Schritt zur physischen Realisierung des Netzes wird das Konzept „5G on Wheels“ umgesetzt. Ziel ist nicht der permanente Betrieb, sondern die Schaffung einer flexiblen Testumgebung, um an verschiedenen Orten des Campus Funkausleuchtungen (Site Surveys) durchzuführen und temporäre Events anzubinden.

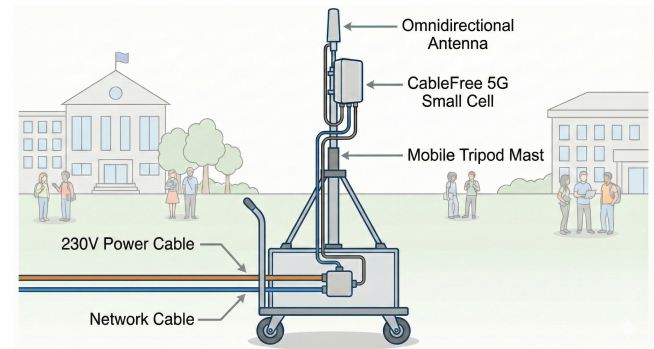


Figure 4: Konzept aufbau "5G on Wheels"

Quelle: KI Generiert mit Nano Banana Pro

- **Physischer Aufbau:** Die physische Basis der Einheit bildet ein robustes, höhenverstellbares Kurbelstativ (Industrie-Standard für Beleuchtung oder Vermessung), das eine variable Antennenhöhe von 2 bis 4 Metern ermöglicht. Dies ist entscheidend, um verschiedene Abstrahlcharakteristiken und die Auswirkung von Hindernissen (Foliage Loss durch Bäume) realitätsnah zu simulieren. An der Spitze des Stativs wird die 360° Rundstrahlantenne befestigt. Darunter folgt die CableFree 5G Small Cell, welche mittels einer universellen Rohrschelle montiert werden kann. Unten am Mast kann nun noch die Monate des 48V Netztes erfolgen, welches die SmallCell mit Strom versorgt. Figure 4 stellt diesen Aufbau basierend auf einem KI-Generiertem dar.
- **Flexibilität und Lehre:** Diese Einheit kann bedarfsgerecht positioniert werden:
 - Für die Wetterstation: Positionierung in einem wettergeschützten Bereich oder Fensterplatz mit Sichtverbindung zur Station für Dauertests.
 - Für die Lehre: Transport in Hörsäle oder Labore für Praktika und Messkampagnen durch Studierende.
- **Infrastruktur-Anbindung:** Die Einheit ist als "Plug-and-Play"-Lösung konzipiert. Sie benötigt lediglich einen 230V-Stromanschluss und einen Zugang zum Campus-Ethernet (LWL oder Kupfer). Über ein dediziertes VLAN verbindet sich die mobile Einheit automatisch mit dem zentralen Open5GS-Core im Rechenzentrum, unabhängig davon, an welcher Netzwerkdose auf dem Campus sie angeschlossen wird.

3.6.2. Phase 2: Stationäre Installation (Gebäude B)

Als langfristige Perspektive für einen wartungsfreien Ganzjahresbetrieb der Wetterstation ist eine Festinstallation auf dem Dach des **Gebäudes B** vorgesehen (siehe Figure 5). Diese Phase wird initiiert, sobald die baulichen Genehmigungen vorliegen.



Figure 5: Positionierung der Antenne auf dem Campus "Unter den Eichen"

Quelle: Google Earth

- **Vorteil:** Die erhöhte Position an der Gebäudeecke gewährleistet eine direkte Sichtverbindung (Line-of-Sight) und minimiert Abschattungen durch Vegetation (z.B. hohe Bäume) dauerhaft. Dies ist für die stabile Signalübertragung im 3,7-GHz-Frequenzbereich entscheidend.
- **Umsetzung:** Die Hardware aus der mobilen Einheit kann bei Bedarf entnommen und in die stationäre Halterung überführt werden, was die Investitionssicherheit gewährleistet.

3.7. Antennencharakteristik

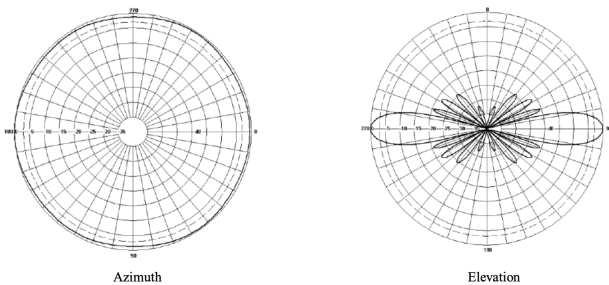


Figure 6: Antennencharakteristik Visualisierung

Für die mobile Primärlösung (und die spätere Festinstallation) wird eine **Rundstrahlantenne (Omnidirektional)** eingesetzt.

- **Universelle Abdeckung:** Die 360°-Charakteristik ist für den mobilen Einsatz ideal, da keine zeitaufwendige Ausrichtung (Sectorization) bei jedem Standortwechsel notwendig ist.
- **Gain:** Eine Antenne mit mittlerem Gewinn (z.B. 6-8 dBi) wird empfohlen.
 - Im *Innenbereich/Hörsaal* verhindert dies eine zu starke Fokussierung und sorgt für eine gleichmäßige Signalverteilung im Raum.

- Im *Außenbetrieb* wird der "Donut-Effekt" (Überspringen naher Bereiche) vermieden, sodass auch Endgeräte in unmittelbarer Nähe des mobilen Racks zuverlässig versorgt werden.

4. Kostenabschätzung

Die Realisierung eines privaten 5G-Campusnetzes wird oft mit hohen sechsstelligen Investitionssummen assoziiert. Durch die gewählte Architektur (Open-Source Core + Commercial Off-The-Shelf Radio) kann dieses Projekt jedoch äußerst kosteneffizient umgesetzt werden. Die folgende Aufstellung detailliert die notwendigen Investitionen für die Hardware-Beschaffung der Funkkomponenten.

Eine Anfrage zu den Kosten eines 5G-Netzwerks entsprechend der in Table 1 aufgeführten Komponenten hat bei einem Anbieter (CableFree GmbH) einen Preis von ca. 11 Tsd. € ergeben. Dieser Betrag setzt sich aus folgenden Hauptpositionen zusammen:

Aktive Funktechnik (ca. 66% der Kosten): Mit stellt die Small Cell den größten Einzelposten dar. Der Preis rechtfertigt sich durch die volle 5G-Standalone-Fähigkeit, 2x2 MIMO-Unterstützung und vor allem die Outdoor-Tauglichkeit, die teure Klimagehäuse überflüssig macht.

Antennentechnik (ca. 6% der Kosten): Die Tri-Sector-Antenne ist spezifisch für den Frequenzbereich 3.3-4.2 GHz ausgelegt. Im Gegensatz zu einfachen Stabantennen ermöglicht diese Canister-Antenne eine präzisere Sektorisierung oder eine echte 360°-Abdeckung (Omni) mit höherem Gewinn, was die Reichweite auf dem Campus signifikant erhöht.

Dienstleistung & Support (ca. 25% der Kosten): Ein wesentlicher Teil des Budgets fließt in Commissioning Services und Support. Dies ist eine strategische Investition: Da die Integration einer kommerziellen Small Cell in einen Open-Source-Core (Open5GS) nicht dem Standard-Use-Case des Herstellers entspricht, ist die initiale Vorkonfiguration durch den Hersteller sowie ein Abruf-Kontingent für Remote-Support essenziell, um Kompatibilitätsprobleme frühzeitig zu lösen.

Die genaue Kostenaufstellung des Angebotes von CableFree kann Table 1 entnommen werden.

Einsparpotenzial durch Open Source Es ist hervorzuheben, dass durch die Nutzung von Open5GS keinerlei Lizenzkosten für das Kernnetz anfallen. Bei kommerziellen Komplettlösungen würden hier jährlich wiederkehrende Software-Lizenzen im vier- bis fünfstelligen Bereich anfallen. Somit stellt diese Investition eine einmalige Ausgabe dar, während die operativen Kosten minimal gehalten werden.

5. Erweiterte Anwendungsszenarien (Use Cases)

Das Campus-Netz ist als Multi-Service-Plattform konzipiert. Neben der Wetterstation sollen anspruchsvolle Anwendungen demonstriert werden.

5.1. Drohnenbasierte Inspektion und Überwachung

5G revolutioniert den Einsatz von Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) durch zwei Schlüsselfunktionen:

Beschreibung	Menge
Small Cell (Single sector 2x2, 1W TX, 3.xGHz)	1
SFP Modul Pack (2x SFP, 1Gbps, 10km)	1
LWL-Kabel (RRH Fibre, 2 Core, SM, 50m)	1
Tri-Sector Canister Antenne (3.x GHz, Dual ports)	1
Antennen-Zubehör (Jumperkabel, 2m)	1
Stromkabel (2 Core, 100m Rolle)	1
AC-DC Netzteil (48V DC, 300W)	1
GPS Antenne & Jumperkabel (10m)	1 Set
<i>Services & Support</i>	
Inbetriebnahme-Service (Konfiguration & Aktivierung)	1
Remote Support (Basis-Paket, 10 Std./Jahr)	1
Bankgebühren für Auslandszahlung	1

Table 1: Beispielhafte Zusammenstellung der Komponenten für ein 5G-Netzwerk

- BVLOS (Beyond Visual Line of Sight):** Die zuverlässige Abdeckung und das Handover zwischen Zellen ermöglichen Flüge außerhalb der Sichtweite des Piloten.
- Uplink-Durchsatz:** Moderne Inspektionsdrohnen (z.B. DJI Matrice Serie) übertragen 4K-Videostreams oder LiDAR-Daten in Echtzeit. LTE-Netze sind im Uplink oft limitiert, während 5G im TDD-Modus durch Anpassung des Frame-Patterns (mehr Uplink-Slots) optimiert werden kann.

Szenario: Automatisierte Inspektion der Solarpaneele der Wetterstation oder der Dachflächen auf Hitzeschäden (Thermografie). Die Daten werden in Echtzeit an eine Edge-Computing-Einheit zur KI-Analyse (Risserkennung) gesendet. [AS24]

5.2. Quantum Key Distribution (QKD)

Zur Härtung der Netzwerksicherheit gegen zukünftige Bedrohungen durch Quantencomputer wird die Integration von QKD vorgeschlagen.

- **Mechanismus:** QKD-Systeme tauschen Schlüssel über einen Quantenkanal (LWL oder Free-Space-Optik) aus. Jeder Abhörversuch stört den Quantenzustand und wird sofort detektiert (Heisenbergsche Unschärferelation). [BKM*23]
- **5G-Integration:** Die generierten Schlüssel werden verwendet, um die VPN-Tunnel (IPsec) im Backhaul (zwischen gNodeB und Core) oder die Ende-zu-Ende-Verschlüsselung sensibler Steuerdaten der Wetterstation zu erneuern (Key Rotation). Dies schafft ein "Quantum-Safe" Netzwerk. [BKM*23]

5.3. Mobile Medienproduktion

- **Anwendung:** Übertragung von Campus-Veranstaltungen ohne Kabelaufwand.
- **Vorteil:** Im Gegensatz zu WLAN (Best Effort) bietet 5G Network Slicing. Ein "Media Slice" kann garantierte Bandbreite für Kameras reservieren, sodass auch bei hoher Auslastung durch Studierende (Smartphones) der Videostream stabil bleibt. [AS24]

6. Die Wetterstation: Technisches Anbindungskonzept

Die Anbindung der Wetterstation stellt die größte technische Herausforderung dar, da hier industrielle Schnittstellen, Protokolle und extrem strikte Energiebudgets aufeinandertreffen.

6.1. Bestandsaufnahme der Hardware

Das System besteht aus zwei primären Datenquellen, die vernetzt werden müssen [AS24]:

Lambrecht Ser[LOG]:

- **Funktion:** Datenlogger für professionelle Umweltmesstechnik. Erfasst analoge und digitale Sensoren.
- **Schnittstellen:** 1x Ethernet (RJ45), 2x RS485 (Modbus RTU).
- **Protokolle:** FTP (Upload von CSV-Dateien), E-Mail (Alarmierung), Modbus-TCP (Abfrage durch SCADA), HTTP-Push. Er agiert als DHCP-Client im Netzwerk. [Pen25]

Victron Cerbo GX:

- **Funktion:** Steuerzentrale des Energiesystems. Liest Daten vom Solar-Laderegler (MPPT) und dem BMS der LiFePO4-Batterie (12.8V, 768Wh).
- **Schnittstellen:** 1x Ethernet (RJ45), WLAN (integriert), VE.Direct, VE.Bus.
- **Protokolle:** MQTT (Push zum Victron VRM Portal), Modbus-TCP, Remote Console (VNC über WebSocket). [Vic]

6.2. Anforderungsprofil an die 5G-Kommunikationseinheit

Damit beide Geräte zuverlässig Daten übertragen können, muss die 5G-Hardware folgende Bedingungen erfüllen:

- **Physisch:** Bereitstellung von mindestens einem, idealerweise zwei Ethernet-Ports (RJ45) oder Anbindung über einen vorgeschalteten Switch.
- **Netzwerk:** Das 5G-Gerät muss als **Router** (Gateway) fungieren. Es muss einen DHCP-Server bereitstellen, um Ser[LOG] und Cerbo GX IP-Adressen zuzuweisen, und NAT (Network Address Translation) durchführen, um den Zugriff auf das Internet/Campus-Netz zu ermöglichen.

- **Energie:** Der Stromverbrauch muss minimal sein (Ziel: < 2W im Durchschnitt), um die Winterautarkie nicht zu gefährden.
- **Technologie:** Unterstützung von **5G RedCap (Release 17)**. RedCap reduziert die Bandbreite auf 20 MHz und die Antennenanzahl (1 Rx oder 2 Rx), was Kosten und vor allem Energie spart, während 5G-Vorteile wie Slicing erhalten bleiben. [Zip]

7. Machbarkeitsstudie und Hardware-Auswahl

Es wurden zwei Lösungswege evaluiert: Eine Eigenbau-Lösung auf Basis von Modulen und eine industrielle Router-Lösung.

7.1. Evaluierung: Quectel RG255C M.2 Modul mit Waveshare Adapter

Eine im Projekt diskutierte Idee ist die Verwendung eines **Quectel RG255C-GL** (5G RedCap) Moduls auf einem **Waveshare 5G M.2 TO Gigabit ETH** Adapterboard. [RL]

7.1.1. Technische Analyse

- **Das Modul (RG255C):** Ein reines M.2-Modem. Es kommuniziert über USB oder PCIe mit einem Host. Es besitzt zwar einen internen TCP/IP-Stack, ist aber primär darauf ausgelegt, von einem Betriebssystem (Linux/Windows) gesteuert zu werden. [RL]
- **Der Adapter (Waveshare):** Dieser Adapter wandelt die M.2-Schnittstelle physikalisch um. Er enthält einen **Realtek RTL8125** Ethernet-Controller.

Kritischer Punkt: Der RTL8125 ist ein PCIe-zu-Ethernet-Controller (oder USB-zu-Ethernet, je nach Board-Layout). Damit dieser Chip funktioniert, benötigt er einen **Treiber**. Das Modem (RG255C) selbst verfügt in seiner Standard-Firmware *nicht* über Treiber für externe Peripherie wie den RTL8125 und kann nicht als "Root Complex" fungieren, um den Ethernet-Chip zu steuern. [Que22]

Host-Abhängigkeit: Die Waveshare-Dokumentation bestätigt, dass der Adapter dazu gedacht ist, an einen **Host** (PC, Raspberry Pi, Jetson Nano) angeschlossen zu werden. [RL] Der Host erkennt dann *zwei* Geräte: Das Modem (via USB) und den Ethernet-Adapter (via USB Bridge). Der Host muss dann per Software-Routing (IP Forwarding, iptables) die Verbindung zwischen dem Ethernet-Port und dem Modem herstellen.

7.1.2. Ergebnis der Machbarkeit

Diese Lösung ist für den **hostlosen Betrieb (Standalone)** am Ser[LOG] **nicht machbar**.

- **Grund:** Der Ser[LOG] ist ein geschlossenes System; man kann keine Treiber für den Waveshare-Adapter auf ihm installieren. Verbindet man den RJ45-Port des Waveshare-Adapters mit dem Ser[LOG], passiert nichts, da der Adapter ohne Host-Intelligence (Routing, DHCP-Server) tot ist.
- **Konsequenz:** Man müsste einen Einplatinencomputer (z.B. Raspberry Pi 4) als Router dazwischenschalten.

Energie-Nachteil: Ein Raspberry Pi 4 verbraucht im Leerlauf bereits ca. 3-5 Watt. Zusammen mit Modem und Adapter würde der Verbrauch auf > 6-8 Watt steigen, was für den Winterbetrieb der Wetterstation fatal wäre.

7.2. Die Alternative: Industrielle 5G RedCap Router

Die einzig technisch sinnvolle und energieeffiziente Lösung ist der Einsatz eines dedizierten industriellen Routers, der RedCap unterstützt und alle Routing-Funktionen "out of the box" mitbringt.

7.2.1. Hardware-Empfehlung: Teltonika RUT976 (oder RUT271)



Figure 7: Teltonika RUT976 5G Router
Quelle: senetic.de

Teltonika Networks bietet mit dem **RUT976** (Figure 7) einen der ersten verfügbaren Router an, der spezifisch für 5G RedCap entwickelt wurde. [Aca]

Spezifikationen und Eignung:

- **Mobilfunk:** 5G Sub-6 GHz RedCap (SA) mit Fallback auf 4G LTE Cat 4. Dies garantiert Zukunftssicherheit im Campus-Netz und Rückfalloptionen im öffentlichen Netz.
- **Schnittstellen:**
 - **4x Ethernet Ports (1x WAN, 3x LAN):** Dies ermöglicht den direkten Anschluss von Ser[LOG] und Cerbo GX *ohne* zusätzlichen Switch - ein massiver Vorteil für die Energiebilanz und Zuverlässigkeit.
 - **RS232/RS485:** Der Router könnte theoretisch sogar Daten direkt per Modbus vom Ser[LOG] abfragen und konvertieren (Modbus Gateway Funktion).
- **Stromversorgung:** Weiter Eingangsbereich (9-30 VDC). Der Router kann direkt an das 12V-Bordnetz der Wetterstation angeschlossen werden, ohne ineffiziente DC/DC-Wandler (z.B. auf 5V USB).
- **Leistungsaufnahme:**
 - **Idle: < 3 W** (oft real $\bar{2}$ W bei deaktiviertem WLAN). [Mou]

- **Max:** < 7 W (nur bei Volllast).
- Im Vergleich zur Raspberry Pi Lösung (6-8 W) bedeutet dies eine **Energieeinsparung von über 50-60%**.

7.2.2. Weitere Alternativen

- **Milesight UR75-5G (RedCap Version):** Ebenfalls leistungsstark, aber mit ca. 5-7 W Verbrauch tendenziell energiehungriger als die Teltonika-Geräte. [Mil]
- **Advantech ICR-2452:** Ein neuer RedCap-Router, der ebenfalls sehr robust ist und Linux-Programmierbarkeit bietet, preislich jedoch oft höher liegt. [Adv]

8. Energieeffizienz und Betriebsstrategie

Die Energiebilanz ist der kritische Faktor. Die Wetterstation hat eine Batteriekapazität von 1536 Wh. Im Winter (bei tagelanger Bewölkung) kann der Ertrag der 500Wp-Solarzellen auf < 250 Wh/Tag sinken.

8.1. Verbrauchsanalyse

- **Sensorik (Ser[LOG] + Sensoren):** ca. 176 Wh/Tag (ca. 7,3W Dauerlast) - dies ist ein fixer Wert, der kaum reduziert werden kann, da die Sensoren heizen/messen müssen. [AS24]
- **Kommunikation (Router):** Hier liegt das Optimierungspotenzial.

8.2. Die "Intervall-Strategie" mit Victron Cerbo GX

Um den Verbrauch der Kommunikation auf ein Minimum zu senken, wird der Router nicht im Dauerbetrieb (Always-On) laufen gelassen.

1. **Steuerung:** Der Victron Cerbo GX verfügt über programmierbare Relais-Ausgänge.
2. **Verkabelung:** Die Stromversorgung des Teltonika Routers wird über ein Relais des Cerbo GX geschleift.
3. **Logik:**
 - Der Ser[LOG] speichert Messdaten intern auf SD-Karte/RAM.
 - Der Cerbo GX aktiviert alle 30 Minuten das Relais -> Router fährt hoch (Bootzeit ca. 45-60s).
 - Nach Verbindungsaufbau (RedCap ist hier schneller als 4G) senden Ser[LOG] (FTP-Push) und Cerbo GX (MQTT-Batch) die gepufferten Daten.
 - Nach 5 Minuten schaltet das Relais den Router wieder hart ab.

Effekt: Die effektive Laufzeit beträgt nur 4-5 Stunden pro Tag statt 24h. Der durchschnittliche Verbrauch der Kommunikation sinkt drastisch, was die Autonomie der Station im Winter massiv erhöht.

9. Umsetzung: Physisches Anbindungskonzept

Das finale Design für die Integration in den Schaltschrank der Wetterstation sieht wie folgt aus:

9.1. Stromversorgung:

- Anschluss des **Teltonika RUT976** an den Lastausgang (Load Output) des Solar-Ladereglers (oder über BatteryProtect), abgesichert mit 1A.
- Zwischenschaltung des **Cerbo GX Relais 1** in die Plus-Leitung des Routers zur Intervall-Steuerung.

9.2. Netzwerkverkabelung (Topologie):

- **Port LAN 1 (Router):** Verbunden mit **Eth0 des Ser[LOG]**.
- **Port LAN 2 (Router):** Verbunden mit **Eth0 des Cerbo GX**.
- **Antennen:** Montage einer 2x2 MIMO 5G Außenantenne (z.B. Poynting PUCK-Serie) am Mast für optimalen Empfang der 3,7 GHz Frequenzen vom Gebäude B.

9.3. IP-Konfiguration:

- Router IP: 192.168.50.1 (Gateway).
- DHCP-Range: 192.168.50.100 - 150.
- Ser[LOG]: Statische Lease oder Fixed IP 192.168.50.10.
- Cerbo GX: Statische Lease oder Fixed IP 192.168.50.20.

9.4. Datenrouting:

- **Outgoing:** Port 80/443 (HTTP/S) für Ser[LOG] Push; Port 1883/8883 (MQTT/SSL) für Victron VRM.
- **Incoming (VPN):** Einrichtung eines WireGuard-Tunnels auf dem RUT976 zum Hochschul-VPN-Gateway. Dies ermöglicht Forschern den Zugriff auf die Web-Oberflächen von Ser[LOG] und Cerbo GX (<http://192.168.50.10/.20>) vom Schreibtisch aus, ohne dass die Wetterstation eine öffentliche IP benötigt (Schutz vor Cyberangriffen).

10. Fazit und Ausblick

Die vorliegende Ausarbeitung schlägt den Bogen von der theoretischen Notwendigkeit souveräner Kommunikationsinfrastrukturen hin zur praktischen Lösung realer ingenieurtechnischer Herausforderungen am Campus „Unter den Eichen“. Ausgangspunkt der Untersuchung war die Diskrepanz zwischen dem steigenden Bedarf an leistungsfähiger Vernetzung und den strikten energetischen Grenzen energieautarker IoT-Systeme, exemplifiziert am „Winter-Dilemma“ der hochschuleigenen Wetterstation.

Das entwickelte Konzept belegt, dass der Aufbau eines privaten 5G-Standalone-Netzwerks (SA) nicht nur machbar, sondern für die adressierten Probleme die überlegene Technologie darstellt. Die Entscheidung für die Open-Source-Kernnetzsoftware **Open5GS** in Kombination mit der hardwareunabhängigen Funktechnik von **CableFree** erwies sich als strategisch richtig: Sie ermöglichte den kosteneffizienten Zugriff auf **3GPP Release 17** und damit auf die entscheidende **RedCap-Technologie**.

Im Rahmen der Hardware-Evaluierung konnte gezeigt werden, dass theoretisch mögliche „Bastellösungen“ auf Basis von M.2-Modulen und Adapterboards für den hostlosen Feldeinsatz ungeeignet sind. Stattdessen wurde mit dem Einsatz industrieller RedCap-Router (Teltonika RUT976) und einer intelligenten, durch

Szenario	Hardware	Leistung	24h	Gesamt*	Bewertung Winter
Status Quo	Alter WLAN Router	~6 W	144 Wh	320 Wh	Kritisch (Akku leer nach ~2 Tagen ohne Sonne)
Bastellösung	RPi 4 + Modem	~7 W	168 Wh	344 Wh	Kritisch
RedCap Router	Teltonika RUT976	~2.5 W	60 Wh	236 Wh	Besser , aber riskant
Optimiert	RUT976 (Intervall)	~0.5 W (∅)	12 Wh	188 Wh	Optimal

Table 2: Vergleich des Energieverbrauchs verschiedener Kommunikationsszenarien

das Victron-System gesteuerten Intervall-Betriebsstrategie ein valider Weg aufgezeigt, den Energieverbrauch der Kommunikationstechnik um signifikante Faktoren zu senken. Damit wird das primäre Ziel der Arbeit erreicht: Die Gewährleistung eines unterbrechungsfreien, ganzjährigen Betriebs der Wetterstation ohne Datenverlust, selbst in den lichtarmen Wintermonaten.

Darüber hinaus demonstriert der gewählte „Mobile-First-Ansatz“ mit der verfahrenbaren Basiseinheit („5G on Wheels“) eine hohe Flexibilität. Er entkoppelt den technologischen Fortschritt von baulichen Genehmigungsprozessen und transformiert das Campusnetz von einer reinen Infrastrukturmaßnahme zu einem dynamischen **Reallabor**. Studierende erhalten so die Möglichkeit, moderne Mobilfunkstandards nicht nur theoretisch zu erlernen, sondern aktiv an der Schnittstelle von Energieeffizienz und Hochleistungsdatenübertragung - von QKD bis Drohnensteuerung - zu forschen.

Zusammenfassend stellt das konzipierte System eine Blaupause für nachhaltige Campus-Netzwerke dar. Es beweist, dass 5G mehr ist als nur höhere Bandbreite: Durch RedCap wird es zu einem Enabler für das energieeffiziente Internet der Dinge und leistet einen direkten Beitrag zur Digitalisierung und Klimaresilienz der Hochschulinfrastruktur.

References

- [Aca] RUT976 5G RedCap Router » Acal BFi. URL: <https://www.acalbfi.com/technologies/communications/wireless-connectivity/cellular-modems-and-gateways/cellular-modems-and-gateways/rut976-redcap-5g-router/>.
- [Adv] Introducing the ICR-2452 RedCap: Advantech's Future-Ready 5G Industrial Cellular Router. URL: <https://icr.advantech.com/blog/detail/introducing-the-icr-2452-redcap-advantechs-future-ready-5g-industrial-cellular-router>.
- [Anv] How 5G Enables Real-Time Drone Operations | Anvil Labs. URL: <https://anvil.so/post/how-5g-enables-real-time-drone-operations>.
- [AS24] ALBRICH H., SHARHAN A.: Energiemanagement Wetterstation Campus Unter den Eichen.
- [BKM*23] BURDIAC P., KAPIČÁK L., MICHALEK L., DERVIŠEVIĆ E., MEHIC M., VOZŇÁK M.: Demonstration of QKD Integration into 5G Campus Network. In *2023 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)* (Sept. 2023), pp. 1–4. ISSN: 1847-358X. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10271676>, doi:10.23919/SoftCOM58365.2023.10271676.
- [Bun] Bundesnetzagentur - Öffentliche Netze - 3,7 GHz. URL: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Telekommunikation/Frequenzen/OeffentlicheNetze/LokaleNetze/_functions/faq_3,7%20GHz.html.
- [Cab] 5G Small Cell Base Station Radios. URL: <https://www.cablfree.net/5g-lte/5g-small-cell-base-station-radios/>.
- [fre] free5GC — free5gc.org. <https://free5gc.org>. [Accessed 17-01-2026].
- [Hoc23] HOCHSCHULE OSNABRÜCK: 5g-campusnetz für forschung und lehre. <https://www.hs-osnabrueck.de/i40/>, 2023. Zugriff am 06.02.2026.
- [Mil] MILE SIGHT NETWORK TECHNOLOGY: Ultra 5G Industrial Router | 5G Cellular Router. URL: <https://www.milesight.com/iot/product/5g/ur75>.
- [Mou] RUT976 Redcap 5G Router - Teltonika | Mouser. URL: <https://www.mouser.de/new/teltonika/teltonika-rut976-5g-router/>.
- [ope] open5gs.org. <https://open5gs.org>. [Accessed 17-01-2026].
- [Pen25] PENTA OTOMASYON: Ser[LOG] Data Logger, 2025. Zugriff am 29. Dezember 2025. URL: <https://www.pentaotomasyon.com.tr/Uploads/Document/014df3ad-ab84-4296-b15f-6a643c9a71d0.pdf>.
- [Que22] RM520N-GL Hardware Design, 2022. URL: <https://forums.quectel.com/uploads/short-url/1zkjPRnxF5BZ2woox386baCZx4g.pdf>.
- [RL] RG Q., LAN G.: 5G RedCap Sub-6 GHz LGA Module.
- [Tec23] TECHNISCHE HOCHSCHULE ROSENHEIM: Neues 5g-campusnetz unterstützt forschung und lehre. <https://5g.nrw/neues-5g-campusnetz-unterstuetzt-forschung-und-lehre>, 2023. Zugriff am 06.02.2026.
- [Uni24] UNIVERSITÄT KOBLENZ: Nola – nachhaltige, autonome landwirtschaft mit 5g. <https://nola-5g.de/>, 2024. Zugriff am 06.02.2026.
- [Vic] 8. Accessing the GX device. URL: https://www.victronenergy.com/media/pg/Cerbo_GX/en/accessing-the-gx-device.html.
- [Zip] 5G RedCap and the Future of IoT Connectivity. URL: <https://www.zipitwireless.com/blog/5g-redcap-and-the-future-of-iot-connectivity>.