Sachbericht zum Teilvorhaben

„Entwicklung einer energieautarken LPWAN-Basisstation für IoT-Anwendungen“

aus dem KMU-innovativ - Verbundprojekt

„Energieautarke IoT-Infrastruktur

- EIOTI -“

GEFÖRDERT VOM

WEPTECH elektronik GmbH

Maria-Goeppert-Mayer 4 | D-76829 Landau

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Förderkennzeichen: 16KIS1784

Projektlaufzeit: 31.1.2023 – 31.07.2025

Teil II: Eingehende Darstellung

Autor: Wolfgang Esch

Informationclassification: internal

Inhalt

1. Einleitung und Zielsetzung des Vorhabens 3
2. Beschreibung der durchgeführten Arbeiten 3
2.1 Arbeiten in AP1 und AP2 – Use Cases, Anforderungen, Spezifikation und Systemkonzept 3
2.2 AP3 – Technologieentwicklung 4
2.3 AP4 – Inbetriebnahme der Funktionsblöcke und des Gesamtsystems 4
2.4 AP5 – Test und Charakterisierung 6
2.5 AP7 - Test der Infrastruktur 7
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der Projektarbeiten 12
4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit 12
5. Fortschritt bei anderen Stellen während der Projektdurchführung 12
6. Zusammenfassung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse 13
7. Dissemination 13
7.1 Gemeinsame Aktivitäten 14

1. Einleitung und Zielsetzung des Vorhabens

Das EIOTI Projekt hatte das Ziel, eine energieautarke Basisstation für LPWAN-Systeme zu entwickeln, die in der Lage ist, dauerhaft ohne netzgebundene Stromversorgung zu arbeiten. Ausgangspunkt war die Herausforderung, Funksysteme mit hoher Empfangskomplexität und hohem Rechenaufwand so zu miniaturisieren und energetisch zu optimieren, dass sie mit einem kompakten Solarmodul und einer kleinen, integrierten Batterie betrieben werden können. Das Vorhaben umfasst zusätzlich die Entwicklung einer Relaisfunktion über ein neuartiges High-Data-Rate-Profil sowie die Integration energieeffizienter Sensor- und Aktorknoten.

Die ursprüngliche Vorhabenbeschreibung sah vor, ein vollständig integriertes Gesamtsystem zu entwickeln, das sich in reale Anwendungen der Umwelt-, Agrar- oder Infrastrukturüberwachung übertragen lässt. Die nachfolgend dargestellten Arbeiten wurden von WEPTECH gemäß dieser Planung umgesetzt und dokumentiert.

2. Beschreibung der durchgeführten Arbeiten

2.1 Arbeiten in AP1 und AP2 – Use Cases, Anforderungen, Spezifikation und Systemkonzept

Zu Projektbeginn wurden in AP1.1–3 die relevanten Use Cases identifiziert und die funktionalen, technischen sowie nicht-funktionalen Anforderungen an die geplante Basisstation definiert. Diese Arbeiten umfassten:

- Definition mehrerer Anwendungsszenarien (Umweltmonitoring, Agrarbewässerung, netzferne Industrieüberwachung)
- Ableitung der Anforderungen an Energieautarkie, Funkleistung, Datenrate, Latenz, mechanische Robustheit und Kommunikationsarchitektur
- Gemeinsame Spezifikation mit den Projektpartnern in regelmäßigen, wöchentlichen Abstimmungssitzungen
- Erstellung eines konsistenten Systemkonzepts mit klarer Abgrenzung der Funktionsblöcke

Die Ergebnisse wurden in einem Lastenheft beschrieben und bildeten die Grundlage für die technologischen Arbeiten in AP3.

2.2 AP3 – Technologieentwicklung

2.2.1 Konzeption der Basisstation

Auf Grundlage des Systemkonzepts wurden die Funktionsblöcke der Basisstation strukturiert beschrieben. Die besonderen Anforderungen hinsichtlich Energieautarkie führten früh zur Notwendigkeit, ein tiefgehendes Bauteil-Screening durchzuführen, insbesondere bezüglich Prozessorleistung, HF-Frontend und Energiemanagement-Peripherie.

Im Zuge der Evaluierung wurde festgestellt, dass weltweit verfügbare Controller-Varianten zwar mehrere Frequenzbänder unterstützen, jedoch unzureichende Dokumentation oder ungesicherte Lieferketten aufwiesen. Die Wahl fiel daher auf einen leistungsfähigen Controller für das europäische Frequenzband mit nachweisbar stabiler Versorgungssicherheit. Dabei handelt es sich um ein System-on-Module basierend auf dem Texas Instruments Sitara SoC. Diese Auswahl wich von der ursprünglichen Planung ab, ist jedoch technologisch und wirtschaftlich gerechtfertigt, da sie die Projektrisiken minimierte. Die Option auf spätere Erweiterung auf ein globales Frequenzprofil bleibt bestehen.

2.2.2 Schaltungsentwurf und Musteraufbau

Ende 2023 wurde auf Basis der definierten Funktionsarchitektur mit dem Entwurf der elektronischen Schaltung begonnen. Dies beinhaltete:

- Erstellung von Schaltplänen für HF-Frontend, Prozessorboard, Sensor-Interfaces und Energiepfad
- Auswahl energieoptimierter Bauteile unter Berücksichtigung von Lebensdauer, Temperaturverhalten und Stromaufnahme
- Layoutarbeiten zur Minimierung von Leitungsverlusten und Störanfälligkeiten
- Aufbau der ersten Musterbaugruppen im Q1 2024

2.3 AP4 – Inbetriebnahme der Funktionsblöcke und des Gesamtsystems

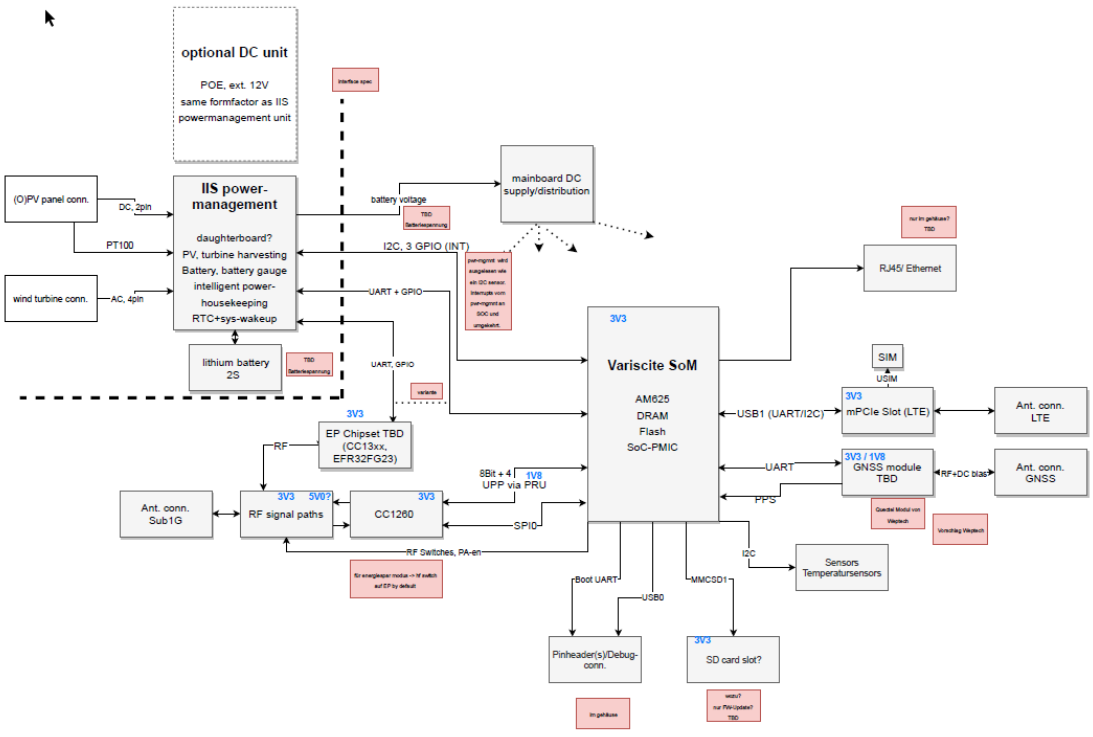
Nach Fertigstellung der ersten Muster wurde die Inbetriebnahme der einzelnen Elektronikmodule durchgeführt. Die Software auf Betriebssystemebene sowie alle Peripheriekomponenten wurden schrittweise aktiviert, getestet und dokumentiert. Die Inbetriebnahme umfasste:

- Aktivierung und Test der LPWAN-Empfangs- und Sendeeinheiten
- Prüfung der Spannungsversorgung, DC/DC-Wandler und Schutzschaltungen
- Validierung der UART-, SPI- und I²C-Kommunikationsschnittstellen
- Funktionsprüfung der Energieerfassungs- und -speicherkomponenten
- Integration der ersten Steuerungsalgorithmen

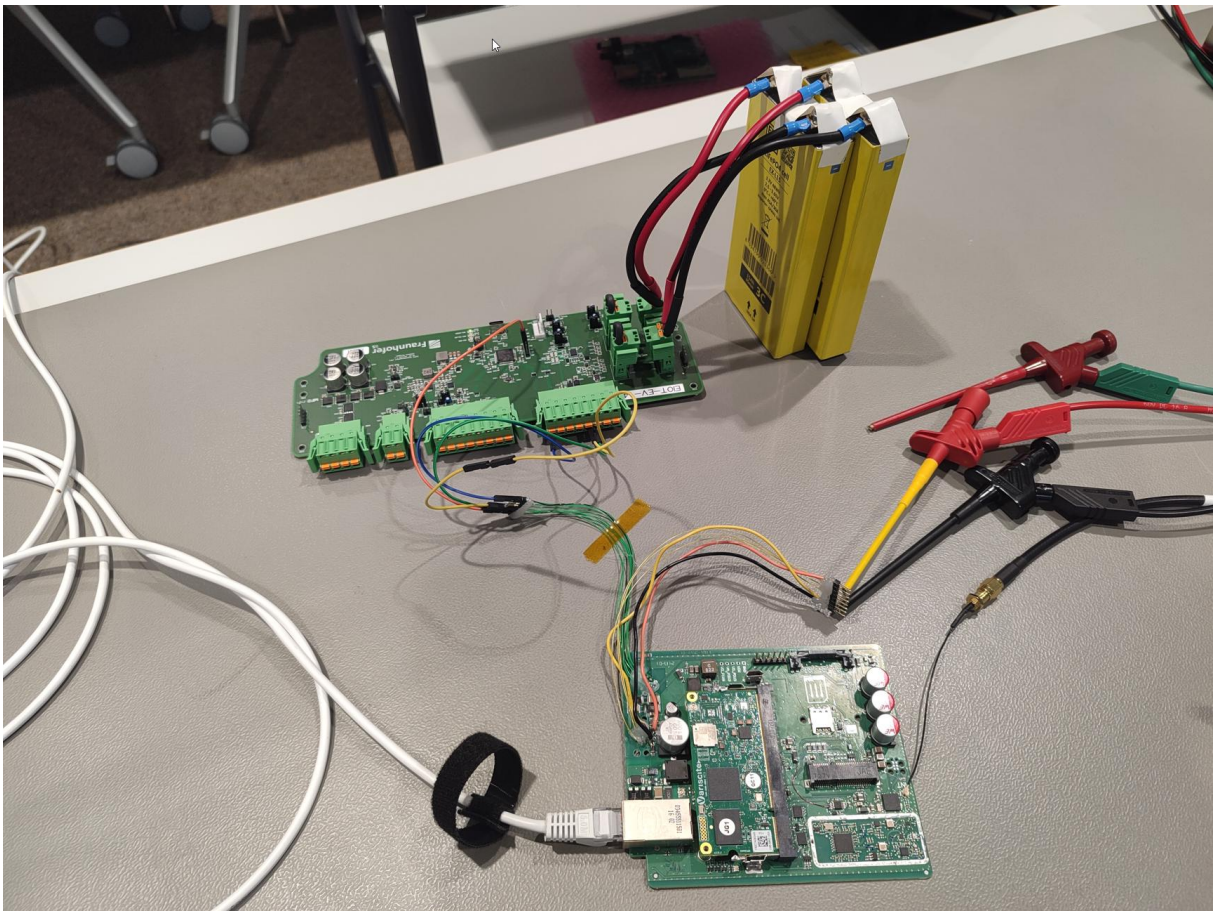
Mehrere Optimierungszyklen führten zu nötigen Anpassungen in Layout und Bauteilauswahl, die in überarbeiteten Mustern umgesetzt wurden. Die iterative Vorgehensweise war notwendig, um die Zielparameter hinsichtlich Energieverbrauch und Empfangsempfindlichkeit einzuhalten.

Parallel erfolgte:

- die Entwicklung eines outdoor-tauglichen Gehäusekonzepts inkl. Feuchteschutz
- die Erstellung einer ca. 70-seitigen Inbetriebnahmedokumentation zur Nachvollziehbarkeit aller technischen Schritte und Parameter



Systemübersicht der EIOTI-Basestation



Aufbau der Komponenten

2.4 AP5 – Test und Charakterisierung

Basierend auf den Ergebnissen der Inbetriebnahme wurde ein Testsystem aufgebaut, bestehend aus:

- drei Sensorknoten (Niederschlag, Temperatur/Luftfeuchte, Bodenfeuchte)
- der EIOTI-Basisstation (Mainboard + Power-Management-Einheit)
- einem 50-W-PV-Modul
- einer Relay-Basisstation (AVA1)
- Datenanbindung über MQTT-Broker auf einem WEPTECH-Server

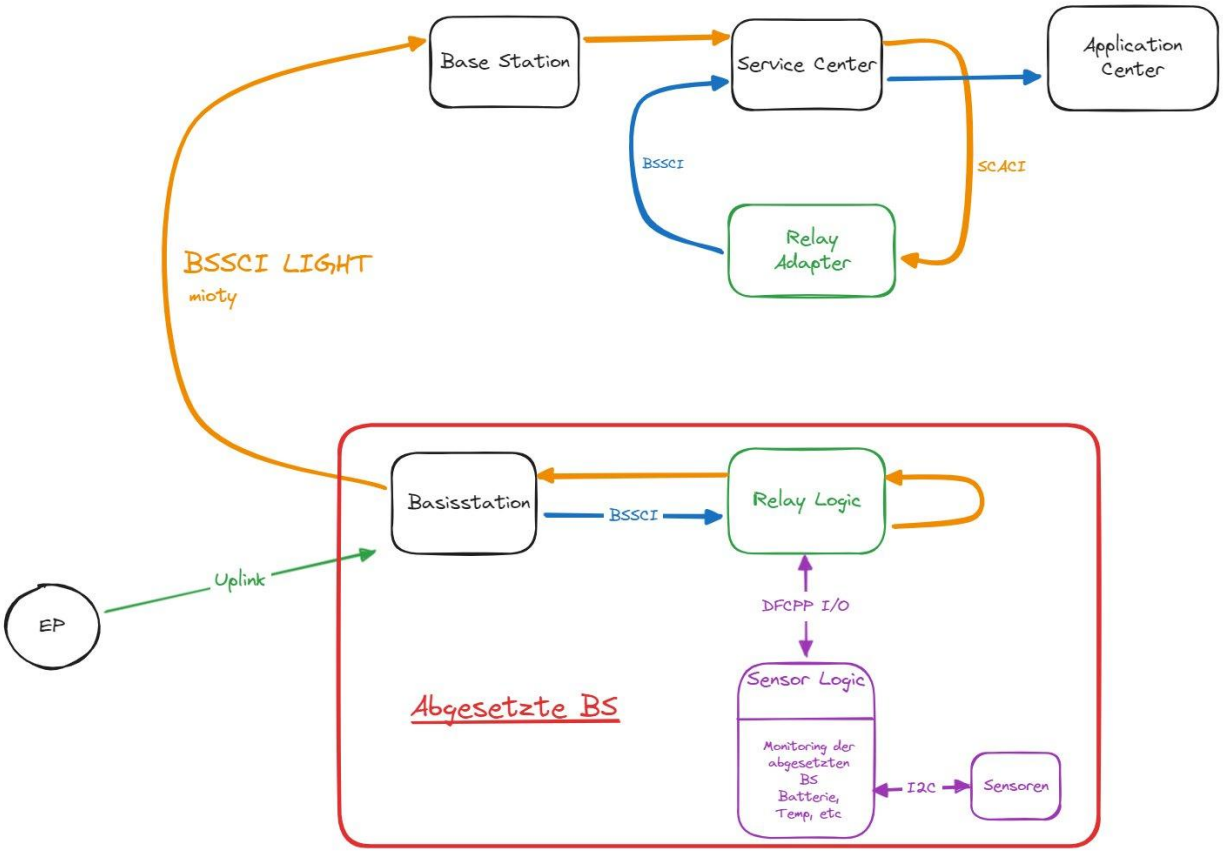
Ziel war es, erste Praxistests zur Energieautarkie, Funkreichweite, HF-Performance und Systemstabilität durchzuführen. In den ersten Testtagen zeigten sich notwendige Softwareanpassungen, weshalb der Feldtest gemäß aktualisierter Projektplanung in das Jahr 2025 verschoben wurde. Gestartet wurde der Feldversuch am 21.05.2025 und endete am 16.01.2026.

2.5 AP7 - Test der Infrastruktur

Der Feldversuch, den WEPTECH durchgeführt hat, fand auf dem Weingut Vögeli in Wollmesheim statt. Dazu wurde im Vorfeld die Versuchsanordnung definiert mit dem Aufbau der Netzwerk-Topologie und den einzelnen Komponenten. Der Feldersuch lief knapp 8 Monate mit der energieautarken Schaltung. Über diesen Zeitraum konnten wir die Sensordaten auf unserem Server empfangen und auswerten.

Im Detail sah der Versuchsaufbau wie folgt aus:

2.5.1 Aufbau der Netzwerk-Topologie:



2.5.2 Aufbau im Feld:

1: EIOTI-Basestation

2: Agvolution climavi one: Sendeeinheit in Kombination mit climavi soil Bondenmikroclima-Sensor, die Umweltdaten wie Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit

3: Agvolution Lufttemperatur- und Luftfeuchtigkeitssensor

4: 50 Watt PV-Modul

2.5.3 Basisstation und Anbindung an den Server

AVA 1 mioty Gateway mit LAN-Anbindung an WEPTECH-Server

2.5.4 Ergebnisse des Feldversuchs

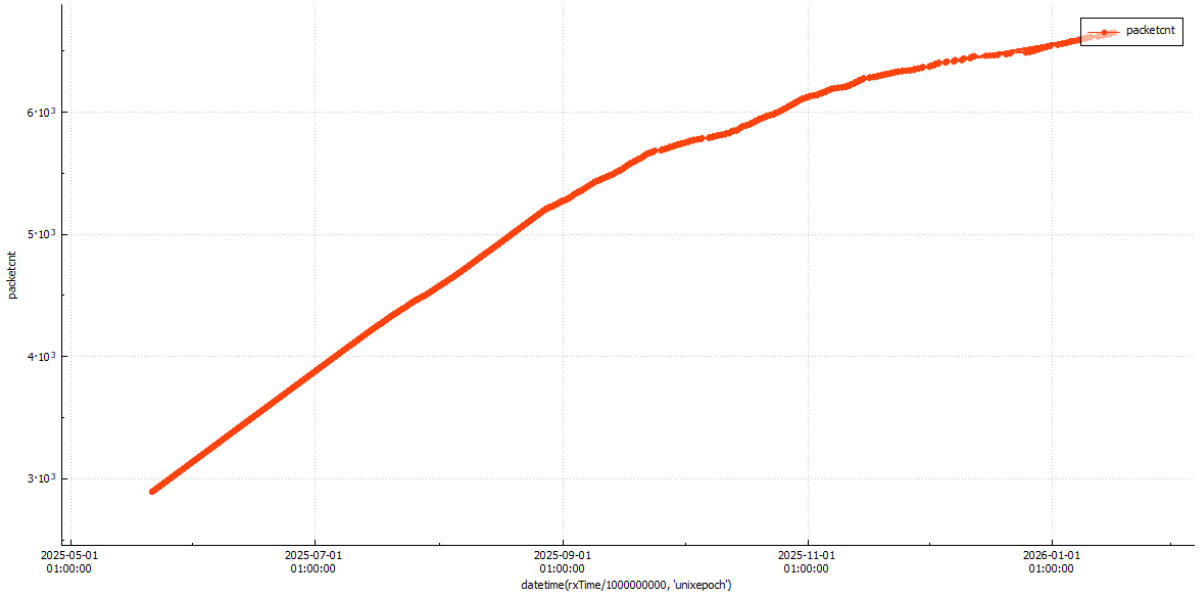
In dem Versuchszeitraum vom 21.05.2025 ab 11:20 Uhr bis zum 16.01.2026 um 15:09 Uhr wurden die Daten gesammelten und geloggt. Rein rechnerisch ergibt das eine Versuchsdauer von 20.749.711 Sekunden, was 5763 Stunden entspricht. Demnach haben wir bei stündlichem Versand der Daten 5763 Pakete erwartet, basierend auf dem Packet Counter im Telegramm.

Die Auswertung der Logs zeigt folgende Bilanz:

Expected packets	3763
Received overall	3691 (98.09%)
Direct Reception	3609 (97.78%)
Relayed Reception	3055 (82.77%)
Both Direct and Relayed	2973 (80.55%)
Only Direct	636 (17.23%)
Only Relayed	82 (2.22%)

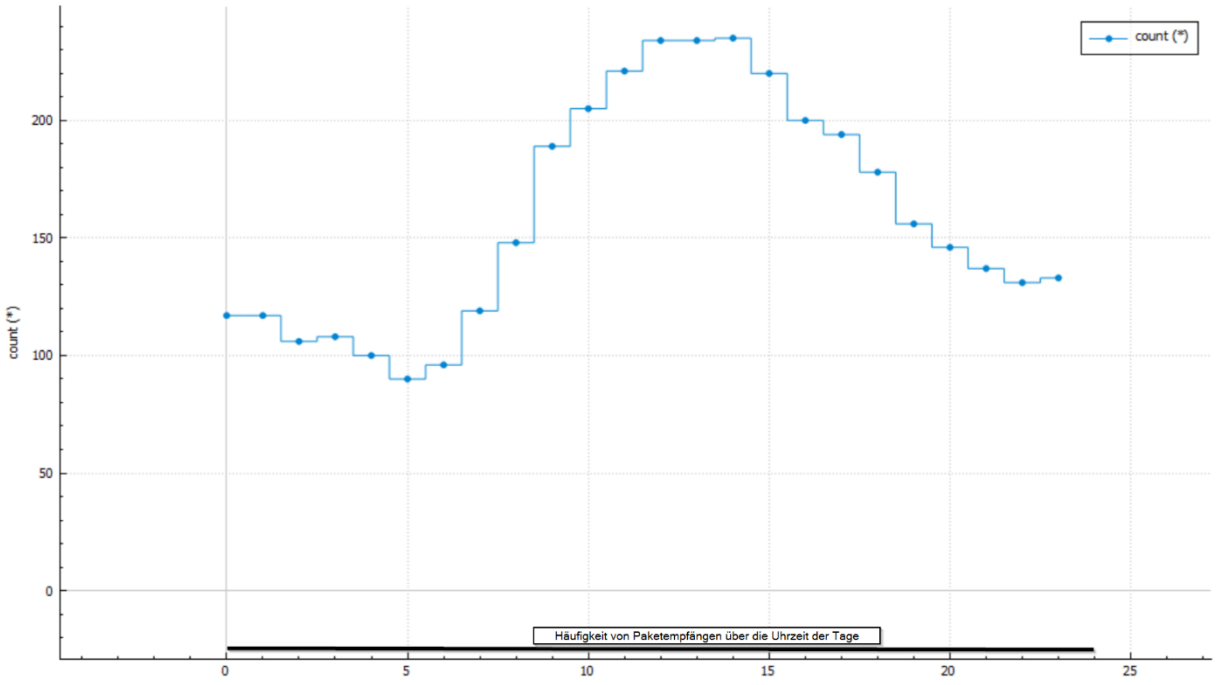
Empfangene mioty-Pakete1

Das Delta zwischen den 5763 Stunden und den 3763 expected packages ergibt in Summe eine Downtime von ca. 2000 h im Feld – teils während Anpassungs- und Wartungsarbeiten am Set, teils wegen zu wenig Tageslicht, mittels dessen des PV-Modul den Akku nicht speisen konnte.



Packet Countüber die Zeit

Das Abflachen der Kurve ist dem schwindenden Tageslicht vom Sommer zum Winter hin geschuldet – die Energieversorgung mit dem 50W-Moodul reicht nicht aus, um den Akku wieder ausreichend aufzuladen:



Packet Countüber den Tag

In den frühen Morgenstunden werden signifikant weniger stündliche Pakte empfangen. Wir messen seit 240 Tagen, und für 11-14 Uhr haben wird im Mittel jeweils 234 Pakete, jedoch morgens um 5:00 nur 90. An weniger als der Hälfte der Tage hat die Batterie nicht für den Betrieb in der Nacht gereicht.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der Projektarbeiten

Alle durchgeführten Arbeiten waren erforderlich, um die Energieautarkie, Funkperformance und miniaturisierte Bauweise der Basisstation sicherzustellen. Die iterative Vorgehensweise bei der Schaltungs- und Softwareentwicklung war technisch notwendig, um die Zielwerte hinsichtlich Energieaufnahme, Empfangsleistung und Systemstabilität zu erreichen.

4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

Die entwickelten Technologien können unmittelbar in folgende Bereiche überführt werden:

- energieautarke Sensorik und IoT-Infrastruktur
- mobile, netzferne Überwachungsanwendungen
- landwirtschaftliche Bewässerung und Umweltmonitoring
- industrielle Außenanwendungen und Fernwartung

Die beteiligten Unternehmen planen die Überführung der Systemkonzepte in neue Produktlinien, die in den nächsten Monaten definiert werden sollen. WEPTECH plant eine weitere Versuchsreihe im Weingut, um die Bewässerung von Jungreben zu optimieren.

Durch den Fokus auf Energieeffizienz, robuste Outdoor-Tauglichkeit und skalierbare Funktechnologie bestehen exzellente Marktpotenziale im europäischen und perspektivisch globalen LPWAN-Sektor.

5. Fortschritt bei anderen Stellen während der Projektdurchführung

Während des Vorhabens wurden technologische Entwicklungen im Umfeld energieoptimierter LPWAN-Gateways, neuer Prozessorarchitekturen und effizienterer HF-Frontend-Bauteile beobachtet.

Die gewonnenen Marktinformationen flossen in die Entscheidung zur Auswahl des Controllers sowie zur Optimierung der Energiepfade ein.

6. Zusammenfassung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse

- vollständige Erarbeitung der Use Cases und Systemanforderungen
- Entwicklung eines vollintegrierten Systemkonzepts der Basisstation
- Entwurf und Musteraufbau der Elektronik für SDR-basierte Funkübertragung
- Auswahl eines geeigneten Controllers mit hoher Dokumentations- und Lieferqualität
- iterative Inbetriebnahme aller Systemkomponenten mit Design-Optimierungen
- Entwicklung eines Testsystems für Labor- und Feldversuche
- Fortschritt bei der Entwicklung des High-Data-Rate-Profils und der Systemsteuerung
- Beginn der Charakterisierung und Vorbereitung eines Feldtests

In einer späteren Umsetzung der energieautarken Basisstation sind die Auslegung des Solarpanels in Verbindung mit der Dimensionierung des Akkus sowie die Optimierung der Versorgungsschaltung zu untersuchen.

Zudem muss das gewählte Gehäusekonzept preisoptimiert werden.

Dies sind die noch zu klärenden Teilaspekte, um ein serientaugliches System auf den Markt zu bringen.

7. Dissemination

Die Kommunikation und Ergebnisverbreitung begleiteten den Projektverlauf kontinuierlich und unterstützten eine sachliche Information der Fachöffentlichkeit über zentrale Entwicklungen. Durch abgestimmte Veröffentlichungen und ausgewählte Präsentationsformate wurde der Wissenstransfer zwischen den Projektpartnern und relevanten Interessengruppen systematisch gefördert.

7.1 Gemeinsame Aktivitäten

Von FHg wurde die im Projekt entwickelte HDR-Wellenform als ULP8 in die neue Version des ETSI-Standards TS 103 357-2 (Physical Layer, v2.1.1) aufgenommen. Mit der Standardisierung sind die relevanten PHY-Parameter (u. a. Modulation, Symbolraten, Paketstruktur und Timing) normiert, wodurch Interoperabilität sichergestellt und die Umsetzung des HDR-Relay-Profils in kommerziellen Geräten erleichtert wird. Damit ist die Technologie breit anschlussfähig und für weitere wissenschaftliche Beiträge sowie Produktzertifizierungen vorbereitet.

Die Zwischenergebnisse des Projekts wurden von Agvolution auf der Poster Session der Mittelstandkonferenz des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) am 21. und 22. November 2023 vertreten und vorgestellt.

Auf Basis der Projektergebnisse wurde ein Demonstrator-System für die Anwendung in der landwirtschaftlichen Bewässerung erstellt und auf den folgenden Messen und Veranstaltungen ausgestellt:

Embedded World 2025, Nürnberg; Transform 2025, Berlin; mioty Global Summit 2025, Nürnberg; KI-Rat Treffen 2025, Nürnberg; FMD-Treffen 2025, Nürnberg; KOMMUNALE 2025, Nürnberg; Lange Nacht der Wissenschaft 2025, Erlangen; 6G Summit Thinknet, Nürnberg; TechX, Brüssel.

Embedded World 2025

Pressemitteilung (6. November 2025): Zukunftsweisende Basisstation für Sensornetze im Projekt »Energieautarke IoT-Infrastruktur« entwickelt

https://www.iis.fraunhofer.de/de/pr/2025/pressemitteilung-energieautarke-iot-infrastruktur.html

Es wurde eine Projektwebseite eingerichtet:

https://www.iis.fraunhofer.de/de/ff/lv/net/projekte/eioti.html

Die Website ist auf Deutsch und Englisch verfügbar.

Integrationsworkshop aller Projektpartner am 24.09.2024 bei Fraunhofer IIS in Nürnberg