

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

30/04/2024

Projekttitlel: ConSens - Condition- und Energiemonitoring mittels innovativer ultra- verlässlicher drahtloser Sensornetze

Projektnummer: 881161

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	6. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/02/2021
Projektende	31/12/2023
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	35 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Lakeside Labs GmbH
AnsprechpartnerIn	Dr. Andreas Kercek
Postadresse	Lakeside B04b, 9020 Klagenfurt
Telefon	+43 463 28 70 44 - 33
Fax	...
E-mail	Andreas.kercek@lakeside-labs.com
Website	www.lakeside-labs.com

ConSens [\(überschreiben\)](#)

Condition- und Energiemonitoring mittels innovativer ultra-verlässlicher drahtloser Sensornetze
[\(überschreiben\)](#)

AutorInnen:

[Namen der mitwirkenden AutorInnen je ProjektpartnerInnen](#)

Andreas Kercek, Denis Chernov, Lakeside Labs GmbH

Dieter Lutzmayr, Manfred Pauritsch, CAMPUS 02 Fachhochschule der Wirtschaft GmbH

Udo Schilcher, Alpen-Adria-Universität Klagenfurt

Michele Posch, Jutta Isopp, Messfeld GmbH

Michael Moser, eologix sensor technology gmbh

Roland Gößler, Spalt Technology GmbH

Marcel Schwaiger, pewag austria GmbH

1 Inhaltsverzeichnis

Es muss ein Inhaltsverzeichnis mindestens auf Überschriftenebene 1 mit Seitenangabe erstellt werden!

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung.....	7
3	Inhaltliche Darstellung	8
3.1	Use Cases.....	8
3.2	Konzept.....	9
3.3	WSN Hardware.....	9
3.3.1	Hardwarekonfiguration für den Sensorknoten	9
3.3.2	Hardwarekonfiguration der Access Points	12
3.3.3	Firmwareentwicklung	12
3.4	Netzwerkcommunication.....	12
3.4.1	Messung von Kanaleigenschaften	12
3.4.2	Netzwerkarchitektur und Scheduler Design	13
3.4.3	Experimentelle Validierung	20
3.5	Energiemanagement und Harvesting.....	32
3.5.1	Energiemanagementkonzepte für Sensorknoten	32
3.5.2	Umsetzung der Harvestingmodule.....	33
3.5.3	Modultests	35
3.6	PoC Testaufbauten.....	38
3.6.1	Use Case 1a: Messung der Versorgungsqualität, pewag – Testaufbau Referenzmessung.	38
3.6.2	Use Case 1a: Test Setup für pewag mit ConSens Sensorknoten	38
3.6.3	Case 1b: Conditionmonitoring an Schweissanlagen, Schwingungsmessung der Kontaktierungsköpfe.....	39
3.6.4	Use Case 2: Test Setup für Vibrations- und Temperatur- Monitoring an Elektromotoren, Spalt	39
3.6.5	Use Case 3: Test setup for vibration measurement at eologix	40
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	41
4.1.1	Use Case 1a: Messung der Versorgungsqualität, Gegenseitige Beeinflussung der Schweißanlagen.....	41
4.1.2	Use Case 1a: Welding current measurements pewag with UWB	42
4.1.3	Use Case 1b: Condition monitoring an Schweissanlagen (Biegeprozess) – Schwingungsmessung der Kontaktierköpfe	43
4.1.4	Use Case 2: Temperatur- und Vibrationsmessungen bei Spalt mit UWB und LTE.....	45
4.1.5	Untersuchung zur Verwendbarkeit von 2,4Ghz LoRa für Use Case 1 und 2 (pewag bzw. Spalt)	46
4.1.6	Use Case 3: Vibrationsmessungen bei eologix:	48
5	Ausblick und Empfehlungen	49

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

6	Kontaktdaten	50
---	--------------------	----

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ein publizierbarer Endbericht sollte folgende Struktur (Index) besitzen und mindestens 15 Seiten/maximal 50 Seiten (inklusive Deckblatt, Inhalts-, Abbildungs- und Tabellenverzeichnis, exklusive Anhänge) haben.

Der Umfang des publizierbaren Endberichts von F&E-Dienstleistungen soll mindestens 50 Seiten/maximal 150 Seiten (inklusive Deckblatt, Inhalts-, Abbildungs- und Tabellenverzeichnis, exklusive Anhänge) betragen besteht aus **mindestens 25 Seiten**.

Die unten angeführte **Darstellung ist eine Mindestanforderung** und kann bei Bedarf erweitert werden. Vorrangiges Ziel der publizierbaren Berichte ist die Darstellung der wesentlichen Projektergebnisse.

Textformat

- Papierformat: A4 Hochformat
- Linker und rechter Rand: 2,5 cm
- Schriftformatierung: Arial, 11 Punkt, Zeilenabstand 1,3-fach
- Schriftformatierung für Tabellen: Arial, 10 Punkt
- Fußzeile: Seitennummerierung
- Definition der Überschriften bis zur 3. Ebene
 - Überschrift 1:
Schriftformat: Arial, 16 Punkt und Fett
Absatzformat: Abstand vor: 24 Punkt, Abstand nach: 12 Punkt
 - Überschrift 2:
Schriftformat: Arial, 14 Punkt und Fett
Absatzformat: Abstand vor: 24 Punkt, Abstand nach: 12 Punkt
 - Überschrift 3:
Schriftformat: Arial, 11 Punkt und Fett
Absatzformat: Abstand vor: 12 Punkt, Abstand nach: 6 Punkt

2 Einleitung

Konzepte des Internet-of-Things (IoT) mit sensorbasierten drahtlosen Monitoring Lösungen haben enormes Potential die Energie- und Produktionsindustrie energie- und ressourceneffizienter zu gestalten und damit einen wesentlichen Beitrag zu großen gesellschaftlichen Herausforderungen wie Dekarbonisierung und Klimaschutz zu leisten.

Beispiele für o.g. Sensorsysteme sind Vibrations-, Temperatur-, Strom-/Spannungssensoren für z.B. Energie(verbrauchs)monitoring und Condition Monitoring (EM bzw. CM). Anwendung finden solche Monitoringsysteme heute schon in Komponenten der Energieerzeugung (Turbinen, Generatoren, Windkraftanlagen, Solarkraftwerken, etc.) des Energietransports (Transmissions- und Verteilnetze, etc.) als auch bei Verbrauchern (Produktionsanlagen, Mobilitätssysteme, Gebäuden, etc.). Die Informationen aus Energie- und Conditionmonitoringsystemen werden dazu verwendet fehlerhafte Systeme und „Energiefresser“ zu identifizieren und mit entsprechenden (Instandhaltungs-)Maßnahmen Nominalzustände herzustellen. Der Einfluss auf die Ressourceneffizienz hinsichtlich Stromverbrauchs, Material- und Betriebsmitteleinsatz kann dabei beträchtlich sein.

Der überwiegende Teil dieser Monitoringsysteme arbeitet heute mit verkabelten Sensoren. Ein großer Teil solcher Sensoren muss in bestehende Anlagen nachgerüstet werden. Dabei scheuen viele Unternehmen die hohen Installationskosten, die mit Verkabelungen verbunden sind. Dadurch bleiben viele Potentiale zur Energie- und Ressourceneinsparung ungenutzt. Der Bedarf an kostengünstigen und günstig nachrüstbaren Sensoren ist gegeben.

Drahtlose Sensoren bzw. Sensornetze sind vergleichsweise einfacher nachzurüsten und bei Bedarf schneller umzurüsten, ohne teure Verkabelungsinstallation. Damit unterstützen sie die Flexibilität und Wandlungsfähigkeit der Energie- und Produktionssysteme. Manche Systemkomponenten, die beweglich sind (z.B. Wellen oder Transportshuttles), kann man nicht verkabeln und mit Kabeln einhergehende Steckverbindungen sind häufige Fehlerquellen, die zu Fehlinterpretationen bei der Datenanalyse führen. Im Bereich Condition Monitoring gibt es vereinzelt drahtlose Systeme welche z.B. auf WirelessHART oder WLAN IEEE 802.11 beruhen. Ersteres erlaubt nur geringe Datenübertragungsraten, während letzteres zu viel Energie benötigt wodurch ein dauerhafter autarker Betrieb nicht möglich erscheint. Auch stehen den zugrundeliegenden Funkstandards nur wenige schmale Frequenzbänder (z.B. 2,4GHz ISM Band) zur Verfügung, was gegenseitige Störung und beschränkte Skalierbarkeit in Bezug auf die Anzahl der Sensorknoten nach sich zieht. Die Durchdringung der Energiesysteme und die Fabrik der Zukunft mit drahtlosen Sensoren wird sich im Zuge von IoT-Konzepten aber wesentlich steigern. Daher müssen für industrietaugliche drahtlose Monitoringsysteme völlig neue Konzepte untersucht und entwickelt werden, die Verlässlichkeit, Sicherheit und eine hohe Datenqualität gewährleisten. Zudem sollten sie kostengünstig, wartungsarm und oft energieautark betrieben werden können.

ConSens erforschte neuartige drahtlose Sensornetze (Wireless Sensor Networks (WSN)) insbesondere für EM und CM, die verlässlich, kostengünstig, skalierbar und energieautark sind und auf die jeweilige Anwendung flexibel angepasst werden können (z.B. hohe oder niedrige Datenraten mit einer Lösung). Erreicht wird dies durch Sensorknoten, die neben dem Sensor mit einer Kombination neuartiger Funkschnittstellen wie Ultra-Wideband (UWB), LoRa und 4G/5G ausgerüstet sind und Energie aus der Umgebung mit verschiedenen Energy-Harvesting Methoden gewinnen können. Dies erforderte die

vernetzte Optimierung von Netzwerkkommunikation (QoS-Behandlung, MAC, Routing, Energieeffizienz), Funktechnologie, Sensorik, Energiemanagement und Energy Harvesting.

Die Arbeit wurde in folgende Arbeitspakete (APe) aufgeteilt: Zu Beginn wurden in AP2 drei EM/CM Use Cases der Firmenpartner pewag, Spalt und eologix detailliert (Kap. 3.1) und daraus Sensornetzkonzepte und -architekturen abgeleitet (Kap. 3.2). Basierend darauf wurden HW-Komponenten, Kommunikationsprotokolle und die Software für die Komponenten des Sensornetzes entwickelt. Auf der Hardwareseite wurde in AP3 ein modulares Demonstratorsystem aus Sensoren (für Vibration, Temperatur und Strom/Spannung), Sensorknoten, und Accesspoints, nebst Software entwickelt (Kap. 3.3). Dazu kamen in AP5 Energiemanagementkonzepte und Energy-Harvesting Module (Kap. 3.5). All diese HW-Demonstratorkomponenten lassen sich flexibel nach Anwendungsfall kombinieren. Für die Kommunikationskomponente wurden in AP4 eigene Protokolle entwickelt (Kap. 3.4). Der Fokus lag insbesondere auf LoRa und UWB. Dazu wurden zunächst Kanaleigenschaften der Funktechnologien vermessen (Kap. 3.4.1) und daraus eine Netzwerkarchitektur und ein Scheduler Design abgeleitet (u.a. Netzwerkmanagement, Synchronisation und Multi-Hop Scheduling). Die Verfahren wurden zuerst simulatorisch untersucht (u.a. in Matlab), in C implementiert und dann experimentell teils auf Testplattformen und teils auf den Zielplattformen getestet (Kap. 3.4.3). In AP6 wurde mit den Demonstratoren der Proof-of-Concept (PoC)-Test in den drei Use Cases durchgeführt. Dazu wurden entsprechende Testumgebungen bei den Firmenpartnern eingerichtet (Kap. 3.6) und danach die PoC-Tests durchgeführt und evaluiert (Kap. 4). Aus ConSens sind 5 wissenschaftliche Publikationen entstanden. Eine kurze Zusammenfassung, Empfehlungen und ein Ausblick finden sich in Kap 5.

Das Ziel ist es letztendlich mit der späteren Umsetzung von ConSens-Ergebnissen die Ressourceneffizienz in Produktion und Energieerzeugung zu verbessern, Österreich als Technologieführer in Sachen innovative Sensing-Lösungen im Energiebereich zu positionieren und durch ConSens-basierte Innovationen zur Beschäftigung für den Standort Österreich beizutragen. Dies entspricht den drei Programmzielen des Energieforschungsprogramms.

3 Inhaltliche Darstellung

3.1 Use Cases

Wie eingangs erwähnt wurden im Projekt 3 Anwendungsfälle (Use Cases) für EM und CM betrachtet. Diese sind im Folgenden kurz aufgelistet:

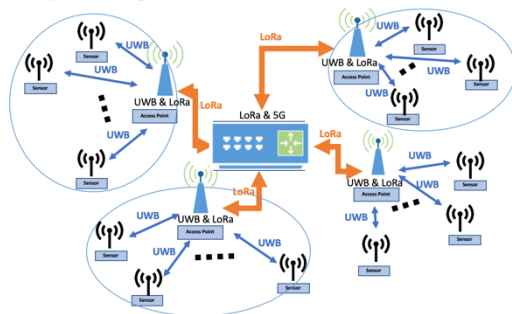
- Use Case 1 (pewag): Dieser ist in zwei Teil-Use Cases aufgeteilt: a) Messung der Stromversorgungsqualität und damit Kontrolle der Qualität von Verschweißungen (Reduzierung von Ausschuss und Energieverbrauch) sowie Untersuchung der gegenseitigen Beeinflussung der Schweißanlagen über das Versorgungsnetz mittels Strom- und Spannungsmessungen am Versorgungsnetz. Dies beeinflusst die Qualität von Verschweißungen (Reduzierung von

- Ausschuss und Energieverbrauch). b) Conditionmonitoring an Schweißanlagen zur frühzeitigen Erkennung von Fehlerzuständen und damit einhergehenden erhöhtem Energieverbrauch.
- Use Case 2 (Spalt): Zustandsüberwachung an Elektromotoren mit Hilfe von Beschleunigungs- und Temperatursensoren, die auf dem Elektromotor verteilt sind und deren Daten drahtlos an eine Zentralstation gesendet werden. So kann möglicher Fehlbetrieb in Verbindung mit erhöhtem Energieverbrauch frühzeitig abgefangen werden.
 - Use Case 3 (eologix): Zustandsüberwachung an Windgeneratoren. Vibrationssensoren werden als Sensornetz über die Rotorblätter verteilt. Vibrationsdaten geben Aufschluss über Zustand der Rotorblätter („*Structural Health*“) und damit über Effektivität der Umsetzung von Windenergie in elektrische Energie bis hin zur Antizipation möglicher Materialschäden bevor ein z.B. ein Bruch der Rotorblätter eintritt.

3.2 Konzept

Aus den Anforderungen wurden ein Systemkonzepte für das drahtlose Sensornetz entwickelt welche einen modularen Aufbau vorschlagen mit denen alle Use Cases bedient werden können. Das Systemkonzept ist in Abbildung 1 dargestellt.

Spalt and pewag



Eologix

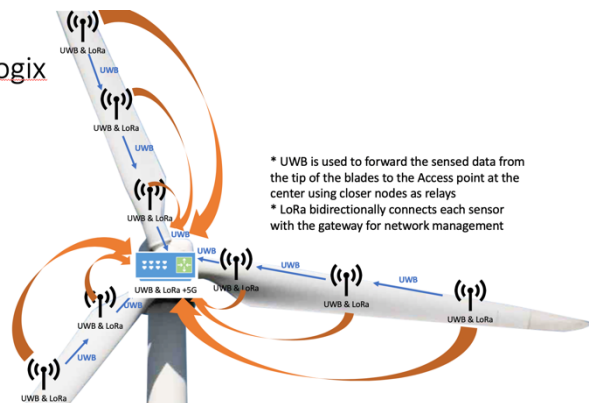


Abbildung 1: Systemkonzepte für die Use Cases bei Spalt und pewag (links) und bei eologix (rechts).

Bei Spalt und pewag werden Sternarchitekturen verwendet in denen die Sensorknoten in UWB-Clustern organisiert sind und die jeweiligen Cluster-AccessPoints Informationen per LoRa an eine zentrale Stelle weiterleiten. Aufgrund der langen Übertragungswege für die Messdaten müssen die Daten bei eologix von Sensorknoten zu Sensorknoten übertragen werden (Multihop) bis sie am AccessPoint angekommen sind und von dort z.B. per 4G/5G Verbindung weitergeleitet werden. Über LoRa-Verbindungen wird das Sensornetz gesteuert.

3.3 WSN Hardware

3.3.1 Hardwarekonfiguration für den Sensorknoten

Generelle Anforderungen waren möglichst geringer Stromverbrauch der Sensoren bzw. Sensorknoten, damit Energy-Harvesting möglich ist. Die Sensoren sollen über einen Standby-Modus verfügen, mit der

Möglichkeit zum Betrieb im diskontinuierlichen Modus bzw. Burst-Modus und niedrige Betriebsspannungen (< 2,7V) erlauben. Sie sollen über Standard Schnittstellen (I2C oder SPI), verfügen mind. 12 bit Auflösung erlauben und am Markt verfügbar sein. Aus den Use Cases ergaben sich die zu messenden Werte:

1. Standard-Temperaturbereich (-20 bis +150 °C) mit hoher Genauigkeit
2. Standard-Temperaturbereich (-20 bis +150 °C) mit preiswerten Sensoren, dafür wurde eine geringere Genauigkeit akzeptiert
3. Hohe Temperatur (über +150 °C)
4. Bewegung mittels Beschleunigungssensoren
5. Vibration mit piezoelektrischen Sensoren

Für diese Messgrößen wurden unter den o.g. generellen Anforderungen folgende Sensorkandidaten identifiziert:

- Temperatur (Standardbereich, hohe Genauigkeit): Texas Instruments TMP117
- Temperatur (Standardbereich, low cost): Texas Instruments TMP451
- Temperatur (Hochtemperaturbereich): Pt100 oder Thermocouple mit ADC Texas Instruments ADS112C04
- Beschleunigung/Bewegung (Accelerometer, triaxial): Bosch BMA253, STMicroelectronics LIS2HH12
- Vibration mit Piezo-Sensor: Measurement specialities MiniSense 100 mit ADC Texas Instruments ADS8167

Die Hardwarekonfiguration wurden festgelegt, realisiert und nach ersten Tests adaptiert. Das finale Hardwarekonzept wird im Folgenden dargestellt. Die Hardwarekonfiguration des Sensorknotens ist modular konzeptioniert, um unterschiedliche Funktionalitäten als getrennte Module (Baugruppen/Boards) zu realisieren. Das erlaubt die individuelle Evaluierung und den einfachen Vergleich alternativer Komponenten. Wir unterscheiden 4 Hauptfunktionalitäten im Sensorknoten (Power Supply, Sensor Interface (ADC), CPU und Wireless Interface (RF)). Die Komponenten werden als eigene Module ausgeführt, die je nach Use Case zusammengesteckt werden können (Abbildung 2).

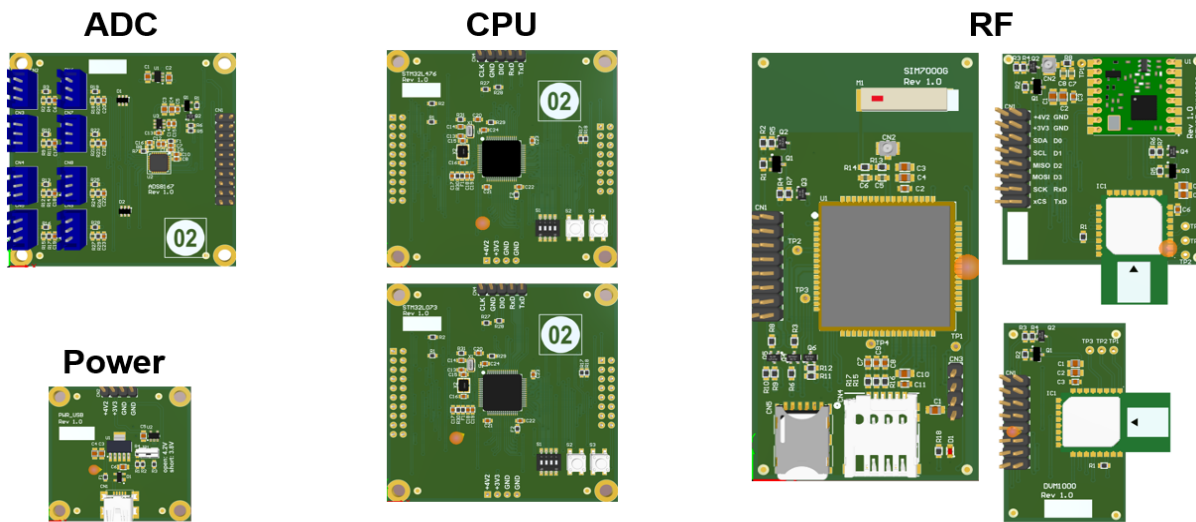


Abbildung 2: Entwickelte Module im Überblick. ADC: Schnittstelle für analoge Sensoren, Power-Modul: Für optionale Versorgung über USB-Schnittstelle mit Netzteil, CPU-Module mit ultra-low-power Microcontroller (STM32L073, oben) oder performantem STM32L476-Mikrocontroller, RF-Module: links: Microcontroller Plattform mit integrierter LoRa Schnittstelle (STM32WL), rechts oben: LoRa-Modul, rechts unten: Modul für UWB-Verbindung (wahlweise mit DWM1000 oder DWM3000 UWB-Modul).

ADC (Sensor-Schnittstelle):

Die Sensor-Schnittstelle nutzt 8-Kanal Analog-Digitalwandler für die analogen Sensoren.

Power (Stromversorgung):

Das Stromversorgungsmodul wurde auf eine USB-Versorgung ausgelegt, damit man das modulare System sehr schnell und einfach mit einem geeigneten Standardnetzteil versorgen kann, wenn eine Steckdose für Tests zur Verfügung steht. Zum Einsatz kommt eine Kombination der Texas Instruments Spannungsregler TPS72501 und TLV74033 u.a. für eine stabile 3,3V Versorgung.

CPU (Microcontroller Module):

Die Controller von STM32 haben sich in zahlreichen früheren Projekten sehr bewährt, da sie sehr gut mit Peripherie ausgestattet und zudem sehr gut dokumentiert sind. Beide ausgewählten Mikrocontroller stammen aus der L-Serie mit sehr geringem Strombedarf. Damit kann ausreichende Leistung genutzt werden, wenn sie notwendig ist, andererseits können aber auch Modi mit sehr geringem Stromverbrauch aktiviert werden, beispielsweise kann die Verarbeitung verlangsamt werden, oder es werden Sleep oder Standby aktiviert, wo der Prozessorkern komplett abgeschaltet wird und die Peripherie ebenfalls, auf Wunsch aber den Zustand behält. Wir verwenden zwei Microcontroller: STM32L073 für besonders geringen Energieverbrauch STM32L476 für mehr Rechenleistung.

RF-Module (LoRa und UWB, 4G):

Für UWB (Ultra Wideband, Ultra-Breitband) wurden das Decawave-Module DWM1000 als auch die nächste Generation DWM3000 verwendet. Das Unternehmen Semtec hat die LoRa-Technologie entwickelt und umgesetzt, deshalb sind deren Chips die Referenz und werden in zahlreiche Module integriert, wie etwa das ausgewählte und eingesetzte HopeRF RFM95W. Ein weiteres sehr erfolgsversprechendes Modul für eine LoRa-Anbindung ist der Mikrocontroller STM32WL mit integriertem

LoRa von ST Microelectronics. Als 4G-Front-End wurde das Modul SIMCom SIM7000G eingesetzt, das als Industriestandard bzw. -referenz gilt.

Neben o.g. Modulen wurden 2 Use-Case-spezifische Designs für eologix und Spalt realisiert, da zum Teil spezifische Sensoren on-board als auch Energy-Harvesting Schaltkreise integriert werden mussten.

3.3.2 Hardwarekonfiguration der Access Points

Basierend auf den Erkenntnissen aus der Entwicklung der Sensorknoten wurden die Access Points aufgebaut (Abbildung 3). Anders als bei den Sensoren muss bei den Access Points nicht auf geringen Energieverbrauch geachtet werden, da diese dauerhaft versorgt werden müssen (Empfangsbereitschaft). Dementsprechend wurde die Hardware als Einzelplatine designt, die im Wesentlichen nur mit Strom versorgt werden muss und die Informationen über USB weitergeben kann, sofern der Access Point der letzte Knoten in der Kette ist.

Herzstück der Schaltung ist ein STM32WL55 Mikrocontroller, der über ein integriertes LoRa-Modul verfügt, Senden und Empfangen erfolgt mit einer externen Antenne, die an die auf der Platine montierte SMB-Buchse angesteckt wird. Damit ist eines der beiden gewünschten Funkprotokolle integriert.

Das zweite Funkprotokoll, Ultra-Wideband (UWB), wird durch einen externen Chip von Qorvo abgedeckt. Der DWM3000 ist als komplettes Modul erhältlich und entspricht mit Shielding und eingebauter Antenne allen Vorschriften zum Betrieb in der EU. Das Modul ist über SPI an den ST-Mikrocontroller angebunden, der somit für beide Funkprotokolle verantwortlich ist.

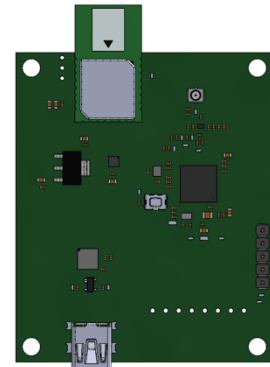


Abbildung 3: Sensornetz-AP mit UWB und LoRa

3.3.3 Firmwareentwicklung

Die entwickelten Module wurden elektrisch durchgemessen und damit zum Funktionstest freigegeben. Für die beiden Microcontrollerplatinen sowie die Sensorknoten wurde zunächst eine Test-Firmware entwickelt, mit der sämtliche Funktionen überprüft werden können.

Auf dieser Basis wurde dann die eigentliche Sensornetzwerkfunktionalität inklusive der Kommunikationsprotokolle aus Kap 3.4 in Software implementiert. Der gesamte Quellcode für die Teile des Projekts wurde in C in Visual Studio 2022 mit dem VisualGDB-Plugin geschrieben.

3.4 Netzwerkkommunikation

3.4.1 Messung von Kanaleigenschaften

Für das Design der Kommunikationsprotokolle wurden Kanaleigenschaften der Funktechnologien in verschiedensten Umgebungen (Laborumgebungen und in Real-World-Umgebungen) zur Kalibrierung der Sendeleistung und die Implementierung von sowohl zufälligem als auch synchronisiertem Kanalzugriff untersucht. Es lassen sich u.a. Kommunikationsreichweiten, Paketverlustraten (zur Dimensionierung von Retransmission-Kanälen), etc. ermitteln. Das ist grundlegend für die Auslegung einer robusten Kommunikation. Für UWB wurde eine Schwellenentfernung zwischen 20 und 25 Metern (abhängig von den Linkbedingungen) identifiziert, ab der die Linkzuverlässigkeit drastisch abnimmt. Für LoRa haben wir eine gute Abdeckung der gesamten Anlage (Spalt) beobachtet, mit Ausnahme der

Bereiche, die durch dicke Betonwände getrennt sind. Dies deutet darauf hin, dass LoRa in Bereichen, die durch diese Art von Wänden getrennt sind, eine sorgfältige Platzierung erfordern, um eine zuverlässige Kommunikation zu gewährleisten. Ein typischer Messaufbau für das Beispiel Spalt ist in Abbildung 4 dargestellt.

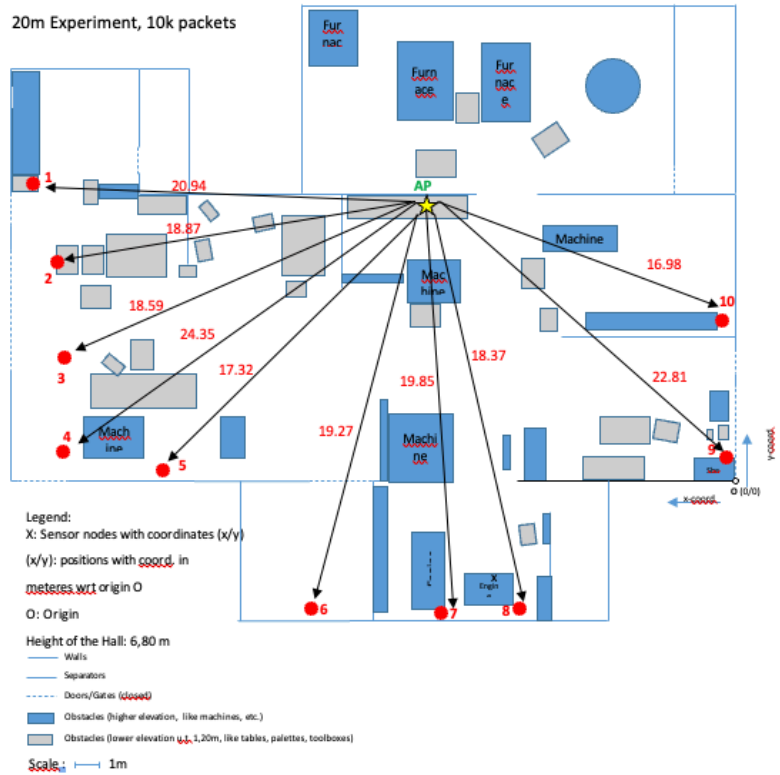


Abbildung 4: UWB-Messaufbau bei Spalt. Dargestellt ist die Link-Performanz (rote Kommazahlen) für in Abhängigkeit von unterschiedlichen Bedingungen für die Propagation bei jeweils annähernd gleicher Entfernung zwischen Sensorknoten und Empfangsstation.

Hinsichtlich UWB haben die Messungen gezeigt, dass ein angepasstes MAC-Schema erstellt werden muß, welches Uplink vor Downlink-Ressourcen priorisiert. D.h. Ressourcen für den Downlink müssen minimiert werden, sodass genügend Slots für Uplink und Retransmissions-Kanal zur Verfügung stehen.

3.4.2 Netzwerkarchitektur und Scheduler Design

Das Konzept für die Netzwerkkommunikation umfasst drei Hauptteile, Synchronisation, Scheduling und Netzwerkmanagement.

3.4.2.1 Netzwerkmanagement

Für pewag und Spalt wurde ein hierarchisches Netzwerk ausgewählt, das aus UWB-Clustern besteht, die mit LoRa- oder 4G/5G-Verbindungen verlinkt sind. Diese Architektur zeichnet sich durch das Routing des Messdatenverkehrs innerhalb der UWB-Cluster aus und nutzt die Reichweiten der LoRa-Technologie für die Übertragung von Statusinformationen und gelegentlichen Rohdatenpaketen an einen zentralen Server aus. Bei eologix ist das Netzwerkkonzept anders. Die besondere Geometrie des Einsatzes von Knoten innerhalb einer Windkraftanlage und die Länge der Rotorblätter erfordern eine unterschiedliche komplementäre Verwendung von Drahtlosschnittstellen kurzer und langer Reichweite. Insbesondere werden wir UWB verwenden, um die Messdaten von der Spitze der Rotorblätter zum Gateway in der Mitte

der Turbine zu übertragen. Durch Multihop-Funktionalität lassen sich die großen Entfernungen auf Rotorblättern (bis zu 100m) überbrücken. LoRa wird hingegen für das Netzwerkmanagement verwendet. Die Synchronisierung von Messungen und Übertragung ist entscheidend, um den Energieverbrauch niedrig zu halten.

3.4.2.2 Synchronisation

Im Projekt wurden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt, um den Synchronisationsrandbedingungen gerecht zu werden: eine selbstorganisierte Synchronisation basierend auf der Theorie gekoppelter Oszillatoren (PCO) und eine zentralisierte Synchronisation basierend auf der Aussendung von Synchronisationsreferenzen. Ein erster Entwurf für den selbstorganisierten Ansatz wurde über Simulationen in Matlab getestet. Dieses Design wurde auf der Konferenz ACSOS 2021 veröffentlicht.

Der Ansatz der selbstorganisierten Synchronisation wurde im Zusammenhang mit einer kommerziellen Plattform weiter untersucht, bei der Nachrichten anstelle von Impulsen ausgetauscht werden. Insbesondere wurden die PCO (pulse coupled oscillator)-basierte Synchronisierung für drahtlose Netzwerke unter Berücksichtigung von Interferenzen untersucht und Techniken zur Reduzierung von Interferenzen oder zur Abschwächung ihres negativen Einflusses vorgeschlagen. Unser Ansatz besteht darin, verschiedene Systemparameter, die die Synchronisation steuern, zu randomisieren. Diese Randomisierung beeinflusst sowohl die Werte bestimmter Parameter als auch das Timing bestimmter Aktionen. Einige Arten der Randomisierung stehen teilweise im Zusammenhang mit der Ersetzung globaler (netzwerkweiter) Parameterwerte durch lokale (knotenspezifische) Werte - eine Eigenschaft, die in verschiedenen selbstorganisierten Systemen zu finden ist. Außerdem ist bekannt, dass die Randomisierung in verteilten Systemen positive Auswirkungen haben kann. Es ist bekannt, dass zufällige Abweichungen zwischen Oszillatoren die Synchronisation fördern und dass die Heterogenität zwischen den Knoten manipuliert werden kann, um die Stabilität synchroner Zustände in Oszillatoren zu verbessern. In diesem Zusammenhang wird die Rolle von Nachrichteninterferenz und Randomisierung anhand eines Standardmodells für drahtlose Netzwerke mit Knoten, die durch einen Poisson-Punktprozess verteilt sind und über einen Fading-Kanal interagieren, analysiert. Nachdem wir die Auswirkungen von Interferenzen auf die Netzwerkkonnektivität hervorgehoben und einen Einblick in die Parameter gewonnen haben, die zur Reduzierung der Synchronisationszeit angepasst werden müssen, adressierten wir zwei Hauptbeiträge:

- Synchronisierung mit Power-Switching (stochastisches Power-Switching): Alle Knoten senden ihre Synchronisationsnachrichten mit einer von zwei möglichen Leistungsstufen, die sich zufällig abwechseln. Die Knoten wählen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eine hohe Leistung oder andernfalls eine niedrige Leistung. Die Energiefairness wird beibehalten. Wir zeigen, dass es eine optimale Wahrscheinlichkeit gibt, mit der die schnellste Synchronisation erreicht wird.
- Synchronisierung mit knotenspezifischen Feuerphasen und Leistungen. Unser zweiter Ansatz für die Randomisierung führt eine knotenzentrierte Sichtweise der Kopplung ein. Anstatt netzwerkweite Werte für die Parameter festzulegen, die den Synchronisationsprozess steuern, lassen wir jeden Knoten seine eigenen, lokalen Werte wählen, unabhängig von anderen Knoten. Bei den verwendeten Parametern handelt es sich um die Oszillatorphase, die eine

Synchronisationsnachricht auslöst (Feuerphase genannt), und die oben genannte Wahrscheinlichkeit für die Leistungsumschaltung. Wir untersuchen verschiedene Strategien zur zufälligen Anpassung der Werte dieser Parameter und diskutieren die Szenarien, in denen jede Strategie zu einer Beschleunigung der Synchronisation führt. Die individuelle Anpassung der Feuerphase stellt einen wesentlichen Unterschied zur PCO-Theorie dar; sie ist möglich, da wir sie in die entsprechenden Synchronisationsnachrichten einbeziehen. Dadurch kann die Feuerphase an jedem Knoten unabhängig gewählt werden, was die Synchronisationszeit bei zufälliger Wahl verbessert. Im Wesentlichen zeigen wir, dass die zufällige Wahl der Kopplung in vielen Szenarien zu einer schnelleren Synchronisation führt.

In Abbildung 5 sehen wir, wie sich die Synchronisationszeit bei stochastischer Power-Switching ändert. Die Knoten verwenden zwei Leistungsstufen, die wir als hoch und niedrig bezeichnen.

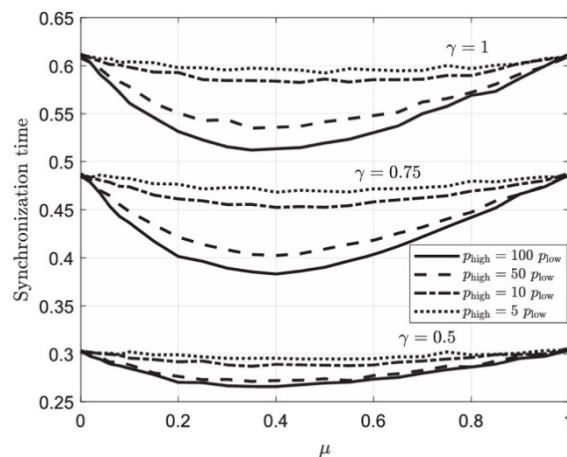


Abbildung 5: Synchronisationszeit mit stochastischem Power-Switching

Die Wahrscheinlichkeit μ auf der x-Achse gibt den Anteil der Übertragungen bei Verwendung der hohen Leistungsstufe an, während $1 - \mu$ den Anteil der Übertragungen bei Verwendung der niedrigen Leistungsstufe angibt. Es zeigt sich, dass die beiden Fälle, in denen immer der hohe oder der niedrige Leistungspegel verwendet wird, die höchste Synchronisationszeit ergeben, während ein zufälliger Wechsel zwischen den beiden Pegeln besser abschneidet. Die Erklärung dafür ist, dass die Synchronisationszeit unabhängig von der Sendeleistung ist, solange alle Geräte mit der gleichen Leistung senden, da das Verhältnis zwischen Empfangsleistung und Störung ein Bruchteil von zwei Leistungen ist, die beide linear von der Sendeleistung abhängen. Bei einem zufälligen Wechsel ändert sich die Situation und die Interferenzen nehmen im Verhältnis zu den Übertragungen mit hoher Leistung ab. Daher erreichen diese Übertragungen mehr und weiter entfernte Geräte, was zu einer erheblichen Verbesserung der Synchronisierungsleistung führt. Wie das Diagramm zeigt, kann eine optimale Wahrscheinlichkeit μ nahe bei oder unter 0,4 gefunden werden. Mit dieser Wahrscheinlichkeit, die an das jeweilige Szenario oder die Netzkonfiguration angepasst werden muss, kann die Synchronisationszeit minimiert werden.

In einem besonderen Fall kann der niedrige Leistungspegel auf Null gesetzt werden, was zu einem Ein/Aus-Übertragungsschema führt, das manchmal als stochastische Kopplung bezeichnet wird. Die Ergebnisse dieses Ansatzes sind in Abbildung 6 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass in diesem Fall die

optimale Wahrscheinlichkeit μ , die nun als Sendewahrscheinlichkeit bezeichnet werden kann, im Vergleich zu dem Fall mit zwei Leistungsstufen in Abbildung 5 etwas höher ist und nun bei etwa 0,6 liegt.

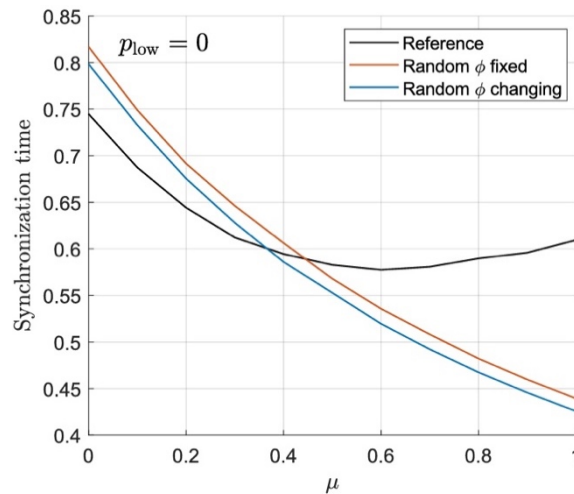


Abbildung 6: On/off-Switching der Übertragungsleistung

Es ist zu beachten, dass in allen obigen Ergebnissen die gesamte Sendeenergie konstant gehalten wird, um einen fairen Vergleich zwischen den Fällen zu ermöglichen. Die tatsächliche Sendeleistung wird also an die jeweilige Sendewahrscheinlichkeit angepasst, d.h. wenn ein Knoten häufiger sendet, verwendet er eine geringere Sendeleistung.

Wir haben die Auswirkungen einer erneuten Übertragung (Retransmission) in einem LPWAN mit einer einzigen Zelle, z. B. in einem drahtlosen Sensornetz, untersucht. Die grundlegende Motivation hinter dieser Analyse ist, dass die Wahrscheinlichkeit, dass eine Übertragung auf einer drahtlosen Verbindung beschädigt wird oder verloren geht, für längere Verbindungen höher ist als für kürzere. Bei der Anwendung von Protokollen wie ARQ-Protokollen (Automatic Retransmission Request) kommt es daher bei längeren Verbindungen häufiger zu erneuten Übertragungen. Dies wiederum führt zu mehr Verkehr auf diesen längeren Verbindungen, die anfälliger für Ausfälle sind, und erhöht die Interferenzen. Dadurch erhöht sich wiederum die Wahrscheinlichkeit, dass diese langen Verbindungen ausfallen, so dass noch mehr Neuübertragungen erforderlich werden, usw. Diese Effekte verringern die Gesamtleistung des Netzes erheblich. Wir haben die Verteilung der Übertragungen über verschiedene Verbindungsdistanzen analysiert und gezeigt, wie sich diese Verteilung über mehrere Iterationen des folgenden Zyklus verändert: Mehr Übertragungswiederholungen führen zu mehr Interferenzen, was wiederum mehr Übertragungswiederholungen zur Folge hat.

Außerdem haben wir festgestellt, dass dieser Zyklus zu einer Grenzverteilung konvergiert, und diese Grenzverteilung quantifiziert (siehe Abbildung 7). Für praktische Netzwerke beschreibt die Grenzverteilung die langfristige Leistung eines Sensornetzwerks.

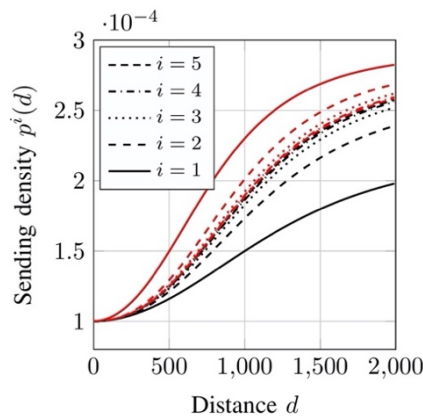


Abbildung 7: Konvergenz der Verteilung der Übertragungen über die Verbindungslänge (Link-Length)

Auf der Grundlage dieser Grenzwertverteilung haben wir verschiedene Leistungskennzahlen wie die Ausfallwahrscheinlichkeit (=Wahrscheinlichkeit, dass ein Paket verloren geht), die Durchsatzdichte, den durchschnittlichen Durchsatz und den Energieverbrauch bewertet. Wir zeigen, dass es eine optimale Anzahl zulässiger Neuübertragungen (Re-Transmissions) gibt, die für einen ordnungsgemäßen Betrieb des Netzes fein abgestimmt werden muss. Darüber hinaus kommen wir zu dem Schluss, dass die Größe des Netzwerks effektiv reduziert wird, wenn zu viele Wiederholungsübertragungen erlaubt sind, da Grenzknoten von einer erfolgreichen Übertragung ihrer Messwerte an das zentrale Gateway ausgeschlossen werden, wodurch sie vom Netzwerk abgeschnitten werden.

Wir haben diese theoretischen Erkenntnisse auf eine häufig verwendete drahtlose Technologie für Sensornetze angewandt, nämlich die Langstrecken-Kommunikation (LoRa). Wir haben sowohl die Ausfallwahrscheinlichkeit als auch den Energieverbrauch mit Simulationsergebnissen verglichen, die eine gute Übereinstimmung aufweisen. Daher können wir unsere theoretischen Erkenntnisse zur Optimierung von Netzwerkparametern wie der Zellengröße und der zulässigen Anzahl von Übertragungswiederholungen für bestimmte Netzwerkkonfigurationen anwenden, die auf theoretischen Berechnungen vor der Einrichtung des Netzwerks basieren.

3.4.2.3 Multihop-Netzwerk Design (Scheduling):

Was das Multihop-Netzdesign betrifft, begann die Arbeit mit der Durchsicht von Arbeiten über Multi-Hop-Scheduler. Nach einigen Recherchen wurde die Arbeit von Kim et al. "Collision-free optimal packet scheduling algorithm for multi-hop wireless IoT networks" für die Implementierung ausgewählt. In dieser Arbeit wird ein kollisionsfreier Multi-Hop-Scheduler vorgestellt und der Hauptalgorithmus beschrieben. Einige Funktionen, die in dem Papier nicht enthalten sind, haben wir implementiert.

Danach wurde der Algorithmus mit großen Netzen und verschiedenen Netzstrukturen getestet, um zu bestätigen, dass die Ausgabe immer korrekt war. Der erste Algorithmus generiert Netze, die aus zufälligen Knoten bestehen, auf der Grundlage eines Poisson-Punkt-Prozesses. Der zweite ist ein einfacher Dijkstra-Routing-Algorithmus. Diese Algorithmen werden benötigt, um verschiedene Eingaben für den Scheduler zu erzeugen, ohne die Baummatrizen manuell zu schreiben.

Die Ausgabe des Schedulers hatte zunächst einige Probleme, die jedoch behoben wurden, so dass die Knoten den optimalen Zeitablauf (Schedule) haben. Die Verbesserung der Ergebnisse ist in Abbildung 8 und Abbildung 9 zu sehen. In der ersten Abbildung ist zu erkennen, dass es Leerstellen gibt, die auf

verschwendete Zeit hinweisen, während es in der zweiten Abbildung keine gibt. In beiden Abbildungen zeigt die y-Achse die Nummer des sendenden Knotens und die x-Achse die Zeit, in der er sendet. Die Linien zeigen die Übertragungswege.

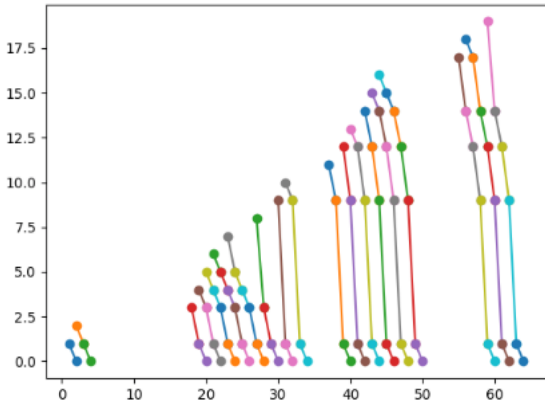


Abbildung 8: Multi-Hop Scheduler Ergebnisse mit Fehlern

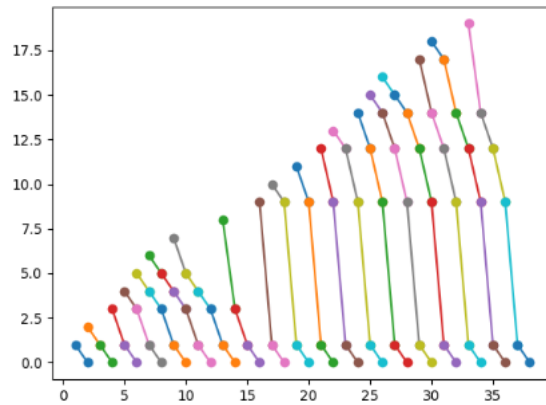


Abbildung 9: Multi-Hop Scheduler Ergebnisse ohne Fehler

Einige der verwendeten Simulationsszenarien, mit denen geprüft werden sollte, ob die Ergebnisse auch nach einer Änderung der Netzverteilung noch korrekt sind, basieren auf Knoten, die Gauß-verteilt, radial verteilt oder in Dijkstra-Clustern strukturiert sind.

Da Dijkstra sehr einfach und nicht energieeffizient ist, wurde ein anderer Routing-Algorithmus implementiert. Nach einigen Recherchen wurde die Arbeit "Energy Efficient Dijkstra-Based Weighted Sum Minimization Routing Protocol for WSN" von Razzaq et al. gefunden. Der Algorithmus wurde verwendet, um das Netzwerk zu clustern und somit die Arbeitslast vieler Knoten zu reduzieren. Für jeden Cluster wird ein Clusterhead definiert, und ihre Heads werden mit Dijkstra geroutet. Eine Illustration des Dijkstra-Routings mit Clustern ist in Abbildung 10 zu sehen.

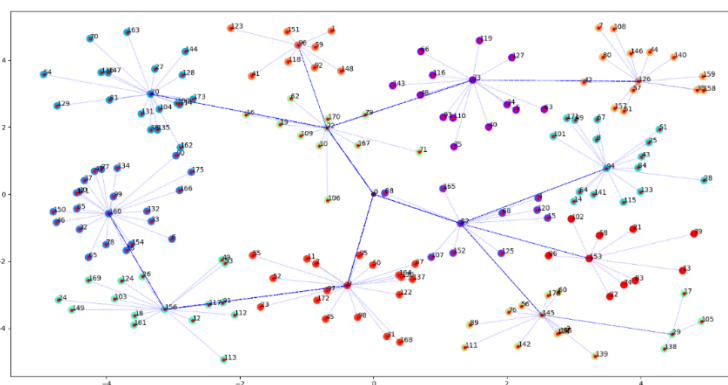


Abbildung 10: Routen in einem Netz auf der Grundlage von Dijkstra-Clustern

Vor der Implementierung des Cluster-Algorithmus gab es die Idee, unnötige Übertragungen zu reduzieren, weshalb der ursprüngliche Dijkstra-Algorithmus geändert wurde. Der erste Eindruck war, dass die Änderungen die Anzahl der Übertragungen im Netz verbesserten. Nach einem Vergleich der Anzahl der Übertragungen mit dem clusterbasierten Algorithmus konnte leicht festgestellt werden, dass die Verbesserungen des geänderten Algorithmus für größere Netze nicht signifikant waren, weshalb das

geclusterte Dijkstra-Routing als Hauptrouting-Algorithmus gewählt wurde. Hier sind noch Verbesserungen möglich, und in Zukunft könnte ein effizienterer Routing-Algorithmus verwendet werden.

Für den Vergleich der Routing-Algorithmen wurden viele Ansätze getestet. Es gibt viele Metriken zum Vergleich zweier Algorithmen. Um die tatsächlichen Verbesserungen zu ermitteln, wurden die folgenden Vergleiche angestellt. Zunächst wurde die Anzahl der Übertragungen, die jeder Knoten durchführt, analysiert. Mit dieser Metrik konnte eine Verbesserung der Gesamtübertragungen erzielt werden, aber dies ist nicht unbedingt eine Metrik für die Energie im Netzwerk. Auch die Länge der Routen zeigte keine signifikanten Verbesserungen. Danach wurde die Anzahl der Cluster analysiert, um zu sehen, ob die Anzahl der Cluster einen Einfluss auf die Leistung hat. Diese Analyse zeigte, dass die Anzahl der Cluster einen großen Einfluss hat, wie in Abbildung 11 zu sehen ist. Bei einer geringeren Anzahl von Clustern schneidet der ursprüngliche Dijkstra-Algorithmus besser oder zumindest genauso gut ab wie der effiziente Algorithmus. Mit zunehmender Anzahl von Clustern sinkt die Sendeleistung pro Clusterhead.

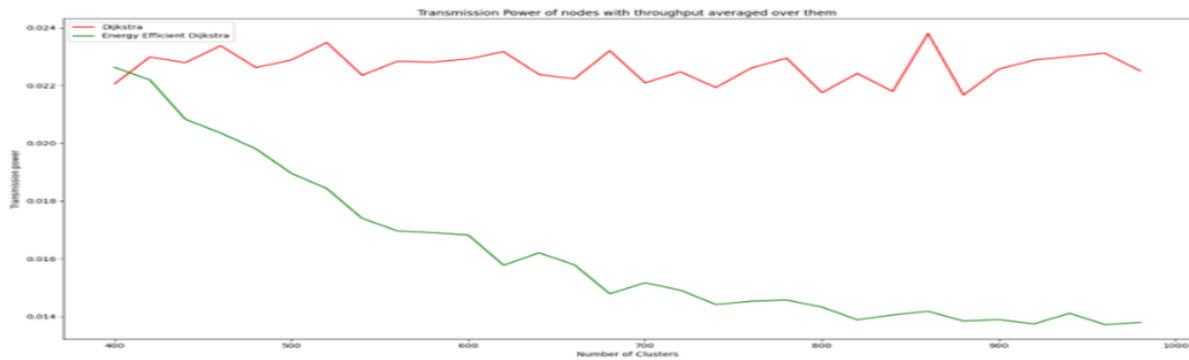


Abbildung 11: Sendeleistung der Clusterheads, gemittelt über die Anzahl der Clusterheads, rot: ursprünglicher Dijkstra-Algorithmus, grün: energieeffizienter Dijkstra-Algorithmus.

Die letzte getestete Metrik ist die gemittelte Sendeleistung aller Knoten über die Dichte des Netzes. Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse dieses Vergleichs. Es ist zu erkennen, dass die Gesamtübertragungsleistung mit der Knotendichte zunimmt, da die Netze mit einer höheren Dichte mehr Knoten und mehr Übertragungen haben. Der energieeffiziente Dijkstra schneidet im Vergleich zum ursprünglichen Dijkstra in Bezug auf die Gesamtübertragungsleistung unabhängig von der Dichte schlechter ab.

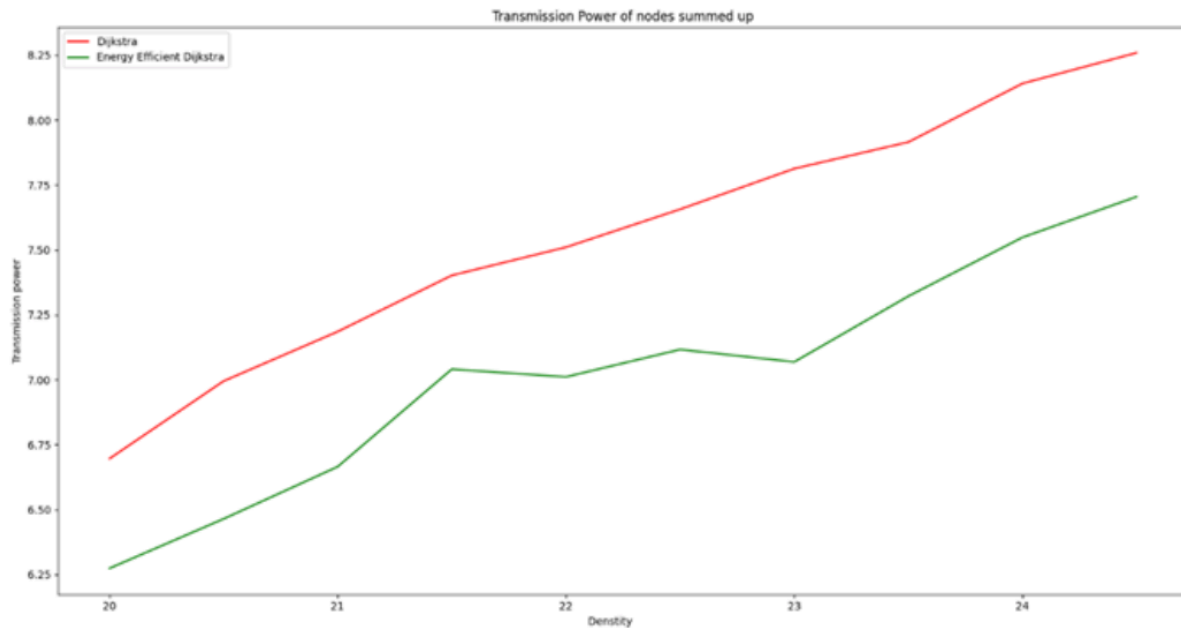


Abbildung 12: Mittlere Sendeleistung des Netzes über die Dichte des Netzes, rot: ursprünglicher Dijkstra-Algorithmus, grün: energieeffizienter Dijkstra-Algorithmus.

Die hier getesteten Verfahren wurden in den Kommunikationsprotokollen umgesetzt und implementiert.

3.4.3 Experimentelle Validierung

Erste Implementierungen für die UWB- und LoRa-Funktionalität wurden in Entwicklungskits umgesetzt. Ein automatisiertes Messprotokoll wurde ebenfalls implementiert, um nahezu automatisierte Messungen in vordefinierten Netzwerktopologien zu ermöglichen. Die Automatisierung ermöglicht umfangreiche Messungen, die sich auf kritische Parametereinstellungen von Interesse konzentrierten, ohne übermäßige Störungen zu verursachen. Bei den Messungen bei pewag kam dieses Verfahren zum ersten Mal zum Einsatz, und wurde bei den späteren Experimenten bei Spalt weiterentwickelt. Diese Automatisierung ermöglichte es uns, experimentell und mit statistischer Signifikanz die Reichweitenschwelle für die UWB-Schnittstelle zu bestimmen.

Ein Protokoll für Entfernungsmessungen mit LoRa-Geräten, das in den ersten Monaten des Projekts implementiert wurde, wurde ebenfalls experimentell getestet. Die Genauigkeit der Entfernungsmessung ist, wie von der zugrundeliegenden Technologie erwartet, gering, aber die Messungen waren konsistent. Die Ergebnisse für den LoRa-Einsatz im Freien sind in Abbildung 13 dargestellt.

Node	Number of measurements	Ranging min [m]	Ranging max [m]	Ranging mean [m]	Distance [m]	Error [m]
B	27	92	239	189	153	36
C	33	110	220	174	164	10
D	14	155	223	192	161	31

Abbildung 13: LoRa ranging tests in einem outdoor Setup im Lakeside Park, Klagenfurt

Experimenteller Set-Up Use Case 2 (Spalt):

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

- Ein AP und zehn Sensorknoten wurden mit DWM1001C-Boards implementiert. Der AP sammelt Daten und leitet sie zur eingehenden Analyse an einen über USB angeschlossenen PC weiter.
- Um die Netzwerkkapazität zu maximieren, wurde ein Übertragungsmodus von 6,8 Mbit/s, eine feste Präambel-Länge, ein benutzerdefiniertes TDMA-Protokoll mit einer effektiven Datenrate von ca. 2,8 Mbit/s und eine Option zur erneuten Übertragung verwendet.
- Umgebung: Industriehalle mit einer Vielzahl von Maschinen für Elektromotoren, einschließlich Wickeln von Drähten, Biegen, Schweißen, Lagern und automatisierten Linien mit minimalem Personaleinsatz im Produktionsprozess.
- Verschiedene Arten von Daten von Sensoren, sowohl analog als auch digital, mit niedrigen und hohen Messfrequenzen (bis in den 10 kHz-Bereich)

Unser erstes Experiment in der industriellen Umgebung fand in der Fabrik statt, wo wir strategisch ein Netz aus 9 Knotenpunkten über eine Entfernung von etwa 20 Metern einrichteten. Der Testbereich ist eine 30x10 m große Halle mit zwei seitlichen Räumen, die durch Betonwände getrennt sind. In diesem Bereich gibt es viele Hindernisse wie schwere Maschinen, Kräne, Wände und Platten. Die Mobilität in der Umgebung kann als moderat bezeichnet werden, da sich über 15 Personen und mehrere Kräne ständig bewegten. Bilder der beteiligten Hindernisse und der Knotenaufstellungspositionen beschreiben die Ausbreitungsumgebung.

Das Hauptziel bestand darin, die Hauptwerkstatt abzudecken, wobei ein AP strategisch in der Haupthalle positioniert wurde (siehe Abbildung 14). Zusätzlich wurden die Knoten 6, 7 und 8 strategisch in geschlossenen Räumen platziert.

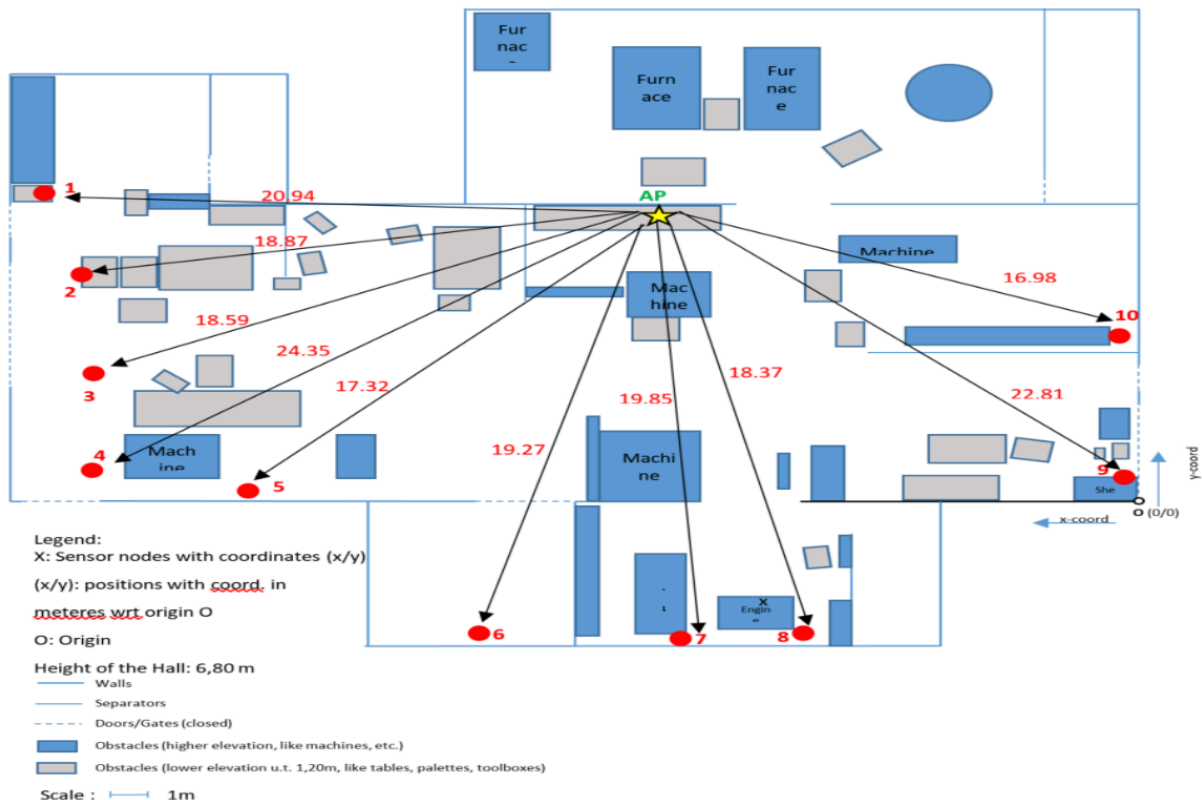


Abbildung 14: Industrielles Szenario zur Abdeckung der Halle einer Motorenproduktion (Spalt).

Tabelle 1: Paket Übertragung Spalt, Messung 1

Node number	Distance,m	Packets transmitted, num	Packets Received,num	Packets received with retransmission,num	PL Ratio, %	RX level, dBm
1	20.94	10141	10099	10139	99.98	-86.22
2	18.87	10141	10138	10141	100	-86
3	18.59	10141	10125	10141	100	-83.81
4	24.35	10141	10129	10141	100	-86.1
5	17.32	10141	10119	10131	99.90	-87.8
6	19.27	10141	10115	10034	98.94	-91.84
7	19.85	10141	4988	6300	62.12	-94.85
8	18.37	10141	8506	9885	97.47	-90.56
9	22.81	10141	10141	10141	100	-82
10	16.98	10141	10140	10141	100	-83.88

Wesentliche Erkenntnisse: Unsere Beobachtungen zeigen, dass das schwierigste Szenario eintritt, wenn Knoten 7 (N7) in einer NLOS-Konfiguration positioniert ist, die durch Maschinen getrennt ist. Obwohl der Empfangspegel in diesem Szenario deutlich geringer ist, treten nur relativ wenige Paketverluste auf. Unser zweites Experiment konzentrierte sich auf die Herstellung der Kommunikation über eine möglichst lange Verbindung innerhalb der Werkstattumgebung (Abbildung 15). Der AP wurde strategisch direkt gegenüber von Knoten 7 positioniert, was zu einer durchschnittlichen Entfernung von etwa 32 Metern zwischen ihnen führte. Die Knoten 1 und 2 befanden sich in der Ecke der Halle, während Knoten 2 in einer Lagerbox des Lagerregals untergebracht war. Der Knoten 9 befand sich in der gegenüberliegenden Ecke der Halle.

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

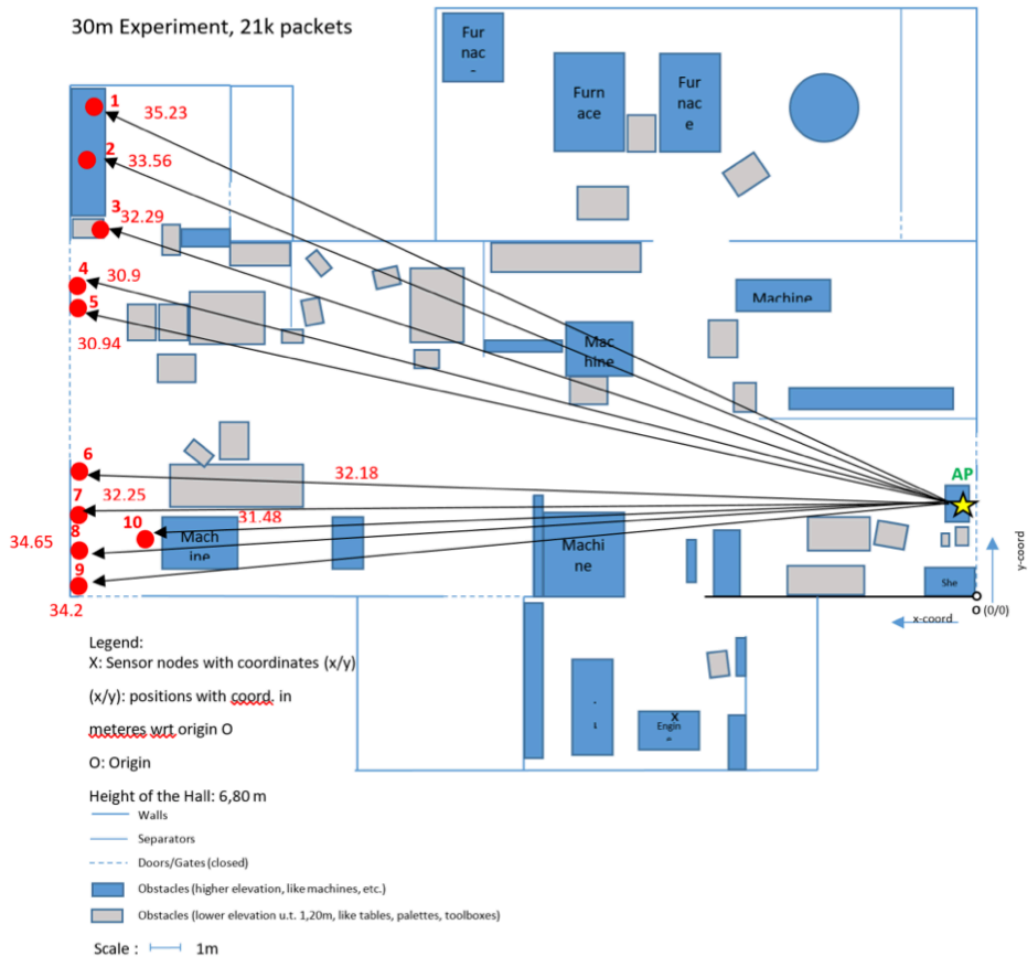


Abbildung 15: Herausfordernder Aufbau für UWB in der Motorenfertigung (Spalt)

Tabelle 2: Paketübertragung Spalt Messung 2

Node number	Distance,m	Packets transmitted, num	Packets Received,num	Packets received with retransmission,num	PL Ratio, %	RX level, dBm
1	35.23	21628	15602	17767	82.15	-92.23
2	33.56	21628	9896	13618	62.67	-98.8
3	32.29	21628	21489	21586	99.81	-88.26
4	30.9	21628	21559	21627	99.995	-83.02
5	30.94	21628	21626	21626	99.99	-86.87
6	32.18	21628	21621	21621	99.97	-86.1
7	32.25	21628	21619	21628	100	-86.13
8	34.65	21628	21289	21376	98.83	-89.3
9	34.2	21628	20463	20896	96.62	-91.47
10	31.48	21628	21628	21628	100	-85.48

Wichtigste Erkenntnisse:

- RSSI-Schwellenwert: Bei diesem Aufbau wiesen die Knoten 1, 2 und 9 einen deutlich niedrigeren

Pegel der empfangenen Signalstärke auf. Fällt der Pegel unter -96 dBm, kommt es zu hohen Paketverlusten.

- Konkrete Hindernisse schränken die Konnektivität ein: Diese Beobachtung verdeutlicht die erheblichen Auswirkungen konkreter Hindernisse auf die Leistung und die Möglichkeiten des Netzes.
- LOS- und NLOS-Bedingungen: Die Ergebnisse zeigen, dass die angestrebte Reichweite von bis zu 20 m bei LOS- und NLOS-Bedingungen in den meisten Fällen zuverlässig erreicht werden kann. Eine Ausnahme bilden Knoten hinter Betonwänden, da Beton den NLOS-Signalempfang stark zu beeinträchtigen scheint. Andere Hindernisse haben keinen Einfluss auf die PLR. Auch die Mobilität scheint keine große Rolle zu spielen. Schließlich scheint die Dimensionierung des Redundanzkanals angemessen zu sein.

Experimenteller Setup Use Case 1 (pewag):

- Ein AP und neun Sensorknoten wurden mit DWM1001C-Boards implementiert. Der AP sammelt Daten und leitet sie an einen über USB angeschlossenen PC weiter, um sie eingehend zu analysieren.
- Um die Netzwerkkapazität zu maximieren, wird ein Übertragungsmodus von 6,8 Mbit/s, eine feste Präambel-Länge, ein benutzerdefiniertes TDMA-Protokoll mit einer effektiven Datenrate von ca. 2,8 Mbit/s und eine Option zur erneuten Übertragung verwendet.
- Umgebung: Industriehalle mit einer Vielzahl von Maschinen für die Herstellung von Metallketten, einschließlich Biegen, Schweißen, Lagern und automatisierten Linien mit minimalem Personaleinsatz im Produktionsprozess.
- Verschiedene Arten von Daten von den Sensoren, sowohl analog als auch digital, mit niedrigen und hohen Messfrequenzen (bis in den 10 kHz-Bereich)

Die zweite Messung mit drahtloser UWB-Übertragung ist die Verbindung in einer Umgebung mit hoher EMI-Dichte. Dies geschah in einem Schweißbetrieb während der regulären Arbeit in der Halle mit 10.000A-Schweißgeräten.

In Umgebungen mit Hochstrom-Schweißgeräten stellt die elektromagnetische Interferenz (EMI) aufgrund mehrerer Faktoren eine große Herausforderung für die drahtlose Übertragung dar. Erstens erzeugen Schweißmaschinen ein breites Spektrum an elektromagnetischem Rauschen, das sich mit den in der drahtlosen Kommunikation verwendeten Frequenzen überschneidet und zu Signalverzerrungen oder -verlusten führt. Außerdem kann die hohe Intensität der von diesen Maschinen ausgehenden Emissionen drahtlose Empfänger überfordern. Die metallischen Strukturen in diesen Umgebungen können drahtlose Signale reflektieren und streuen, was zu Mehrwegeausbreitung und potenzieller Signalverschlechterung führt. Die vom Schweißen erzeugte EMI ist oft intermittierend und unvorhersehbar, was es drahtlosen Systemen erschwert, sich anzupassen oder die Störungen herauszufiltern. Um diese Herausforderungen zu entschärfen, ist eine sorgfältige Planung des drahtlosen Netzwerks erforderlich, einschließlich der Auswahl robuster Kommunikationsprotokolle, weniger störungsanfälliger Frequenzbänder und der strategischen Platzierung von Antennen und Abschirmungen.

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Der Messvorgang lief wie folgt ab: Der Sendeknoten wird an einem festen Ort positioniert und der AP wird im Testgebiet mitgeführt, während der Paketempfang an einem PC überwacht wird. Die industrielle Umgebung und die schematische Platzierung der UWB-Knoten vom AP sind in Abbildung 16 dargestellt. Entfernungen von ca. 20, ca. 27 m und ca. 34 m (basierend auf SS-Entfernungsmessungen) werden durch hellblaue, blaue und violette Punkte dargestellt.

Der Aufbau umfasst 12 Schweißstationen, jede mit unterschiedlichen Leistungsstufen und unterschiedlichen Schweißfrequenzen. Diese Anordnung führt zu einer komplizierten elektromagnetischen Interferenzlandschaft, die sich negativ auf den Empfang von UWB-Übertragungen auswirkt. Die Umgebung bleibt dabei weitgehend unverändert. Wir haben Experimente mit 10.000 Paketübertragungen pro Knoten durchgeführt.

Die Positionierung mehrerer Knoten in ähnlicher Entfernung zum AP, aber unter unterschiedlichen Ausbreitungsbedingungen, half uns, ein durchschnittliches Leistungsniveau zu ermitteln.



Abbildung 16: pewag-Szenario (Use Case 1) in einer Produktionshalle mit verschiedenen Maschinentypen

Wichtigste Erkenntnisse:

- Einfluss der industriellen Umgebung: Wir haben herausgefunden, dass eine industrielle Umgebung mit hoher EMI keinen Einfluss auf die Konnektivität hat.
- Konnektivitätsschwelle: Wir haben einen signifikanten Abfall der Paketübertragungsrate für Knoten festgestellt, die mehr als 24 Meter vom AP entfernt sind.
- Kanalwiederherstellung und erneute Übertragung von verlorenen Paketen: Unsere Daten zu verschiedenen Ausbreitungsbedingungen zeigten, dass einige längere Verbindungen eine hohe Leistung aufrechterhielten, während der Grad der Leistungsverschlechterung bei anderen so erheblich war, dass die Wiederherstellung von Paketen behindert wurde. Bei einigen Knoten, die

etwa 21 Meter vom AP entfernt waren, konnte die beobachtete geringfügige PLR jedoch möglicherweise durch effektive Strategien zur erneuten Übertragung ausgeglichen werden.

LoRa 2.4Ghz Baseline Versuchsaufbau im Freien

Der Testaufbau umfasste zwei verschiedene Messkampagnen mit einer SX1280-Karte. In der ersten Kampagne wurden die Knoten vor und seitlich des APs platziert. In der zweiten Kampagne wurden sie nur an der Vorderseite platziert. Die zweite Kampagne bot auch mehr Messpunkte pro Entfernung. Der AP wurde auf einer Bank in einer Höhe von etwa 0,5 m über dem Boden platziert, während die Knoten größtenteils auf dem Boden platziert wurden, mit wenigen Ausnahmen, die auf Pfählen oder in Bäumen erhöht platziert waren.

Es wurden zwischen ein- und zweitausend Pakete von jedem Knoten gesammelt. Es gab Ausnahmen, die weniger sendeten, weil sie die Pakete vom AP nicht hörten. Dabei steht jeder Knoten für einen eindeutigen Standort. Alle diese Pakete wurden unter einer einzigen Konfigurationseinstellung gesammelt.

Abbildung 17 zeigt zwei verschiedene Kampagnen für zwei verschiedene SFs (Spreading Faktor) und zwei verschiedene Bandbreiten BW (band width). Da verschiedene SFs unterschiedliche Reichweiten haben und nicht alle Entfernungen für niedrigere SFs erreichbar sind, gibt es einige Unterschiede bei den Entfernungen zwischen zwei SFs. Abbildung 17 a) und b) zeigen Standorte für SF5 und c) und d) für SF10. Zur einfacheren Analyse sind die Standorte mit Buchstaben in Bezug auf den ID-Wert des Knotens gekennzeichnet. Die Punkte sind außerdem mit verschiedenen Farben gekennzeichnet, die in der ersten Kampagne zeigen, welcher Standort zu dem jeweiligen BW-Wert gehört (gelb BW400 und grün BW1600). In der zweiten Kampagne wurden die Farben verwendet, um Orte zu kennzeichnen, die ungefähr gleich weit entfernt sind.

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

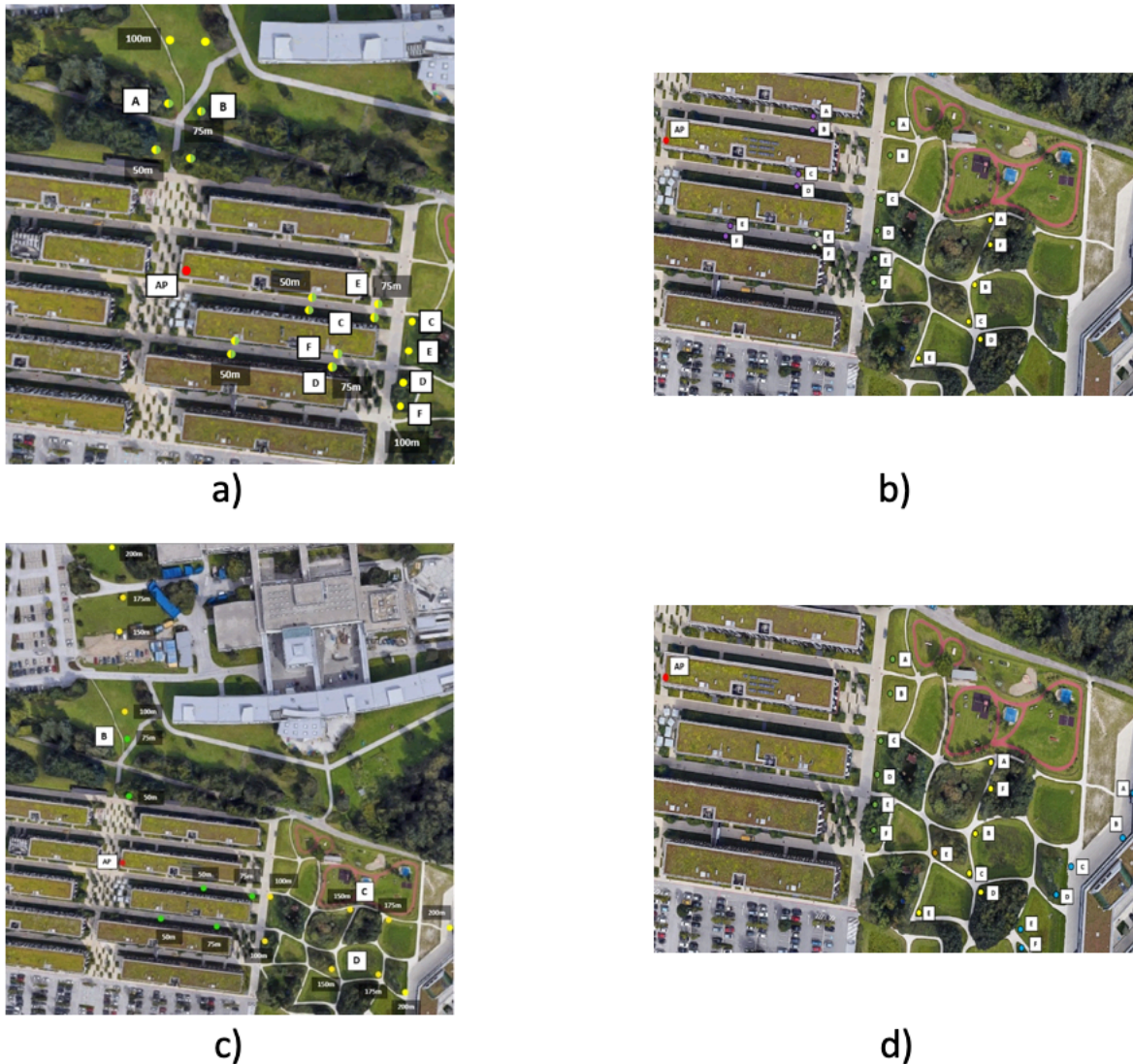


Abbildung 17: Setup-Layouts der Außenmessungen a) SF5-Kampagne eins, b) SF5-Kampagne zwei, c) SF10-Kampagne eins, d) SF10-Kampagne zwei

Die erste Messkampagne umfasste drei verschiedene Entfernungen {50 m, 75 m und 100 m} für SF5, und für SF10 wurden einige weitere hinzugefügt {150 m, 175 m und 200 m}. Bei der zweiten Messkampagne wurden ähnliche Entfernungen gemessen. Die Entfernungen waren nicht exakt, sondern lagen eher nahe an den nächsten Werten. Für SF5 {40 m, 60 m, 70 m, 100 m, 110 m, 150 m} und einige wenige zusätzliche für SF10 {175 m, 200 m, 220 m}. Die Messungen wurden nicht an allen Standorten gleichzeitig durchgeführt. Stattdessen haben wir verschiedene Standorte, die dieselbe Entfernung aufweisen, in einem einzigen Fall gemessen.

Die wichtigsten untersuchten Konfigurationen sind die Kombinationen der folgenden Parameter: SF={5, 10} und BW={400 KHz, 1600 KHz}. SF12 wurde nicht gewählt, da die Entfernungsmessung (hier nicht erwähnt) parallel zur PLR analysiert wurde. Für SFs größer als 10 ist keine Entfernungsmessung möglich. Die PLR-Werte wurden aus beiden Messkampagnen gruppiert. Außerdem werden die Ergebnisse in zwei Kategorien eingeteilt: eine umfasst LoS- und LoS-nahe Standorte und die zweite umfasst NLoS-Standorte. Abbildung 18 zeigt die mittleren PLR-Ergebnisse für vier verschiedene Konfigurationen von SF und BW und zwei verschiedene LoS-Gruppen. Aufgrund der Positionierung der Knoten und unterschiedlicher

Entfernungswerte gab es für einige Entfernungen nur eine einzige Messung, so dass kein Mittelwert berechnet werden konnte. Diese Ausnahmen sind das LoS und LoS-nahe Szenario {Entfernung 50 m: SF10BW600, Entfernung 150 m: SF5BW400 und SF10BW1600, Entfernung 220 m: SF10BW400 und SF10BW1600} und das NLoS-Szenario {Entfernung 50 m: SF10BW1600, Entfernung 70 m: SF10BW1600, Entfernung 110 m: alle, Entfernung 150 m: SF5BW400, Entfernung 175 m: SF10BW1600, Entfernung 220 m: alle}.

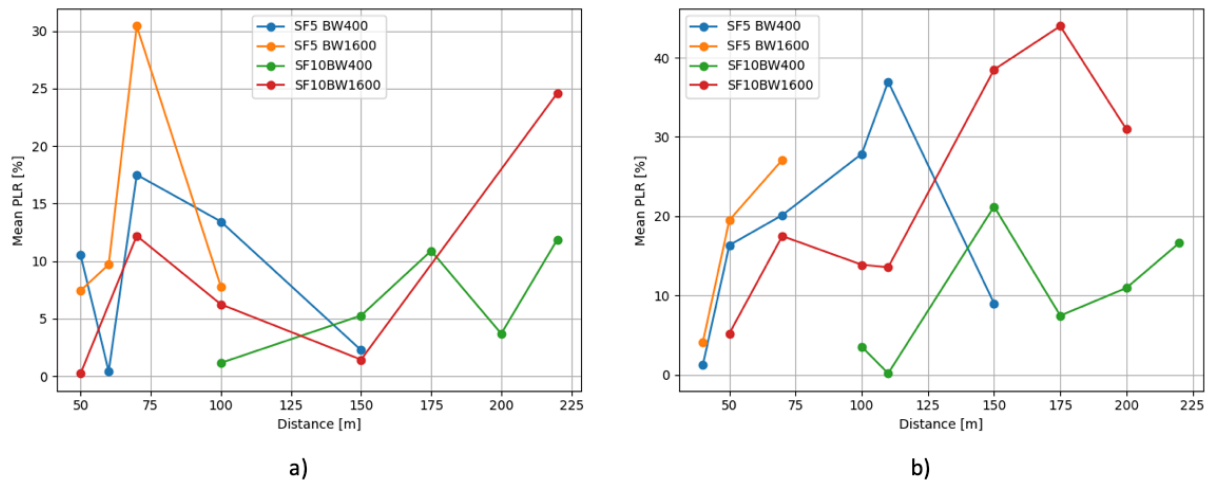


Abbildung 18: Mittlere PLR-Werte für SF={5, 10} und BW={400, 1600} KHz mit verschiedenen Messorten a) LoS und in der Nähe von LoS, und b) NLoS; Ausnahmen, wenn nur eine Messung verfügbar war: a) SF10BW600 Entfernung 50 m, SF5BW400 und SF10BW1600 Entfernung 150 m, SF10BW400 und SF10BW1600 Entfernung 220 m, b) SF10BW1600 Entfernung 50 m, SF10BW1600 Entfernung 70 m, Entfernung 110 m, SF5BW400 Entfernung 150 m, SF10BW1600 Entfernung 175 m, Entfernung 220 m.

Wichtigste Erkenntnisse:

- Höherer SF mit niedrigerem BW ist optimal: Die Konfigurationen mit höherem SF und niedrigerem BW haben den besten PLR.
- Knotenplatzierung ist wichtig: Die Position der Knoten, von denen einige auf dem Boden platziert wurden, während andere erhöht waren, hat erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse.
- NLoS-Bedingungen haben einen höheren PLR
- Ausreißer bei 150 m für die SF5BW400-Konfiguration: Ein bei einer Entfernung von 150 m für die SF5BW400-Konfiguration beobachteter Ausreißer ist auf die Knotenplatzierung zurückzuführen. Einige näher am Boden platzierte Knoten empfingen nichts, wodurch sich der mittlere PLR verringerte. Der mittlere PLR für die SF10BW400-Konfiguration ist höher, da mehr Standorte pro Entfernung Ergebnisse lieferten. Dies bedeutet, dass diejenigen Messorte, die nichts für SF5 aufwiesen, hohe PLR-Werte für SF10 meldeten und damit den Mittelwert erhöhten.

Die nächste Serie von Diagrammen zeigt, wie die Platzierung der Knoten die PLR beeinflusst. Die Werte in den Diagrammen sind nach LoS-Bedingungen und BW gruppiert. Abbildung 19 zeigt die Verteilung numerischer Daten mit Median (50 % der Daten liegen höher und 50 % liegen unter diesem Median),

Maximal- und Minimalwerten sowie unteren und oberen Quartilen, die Daten anzeigen, die unter 25 % der Werte liegen, und jeweils weniger als 75 % der Zeit.

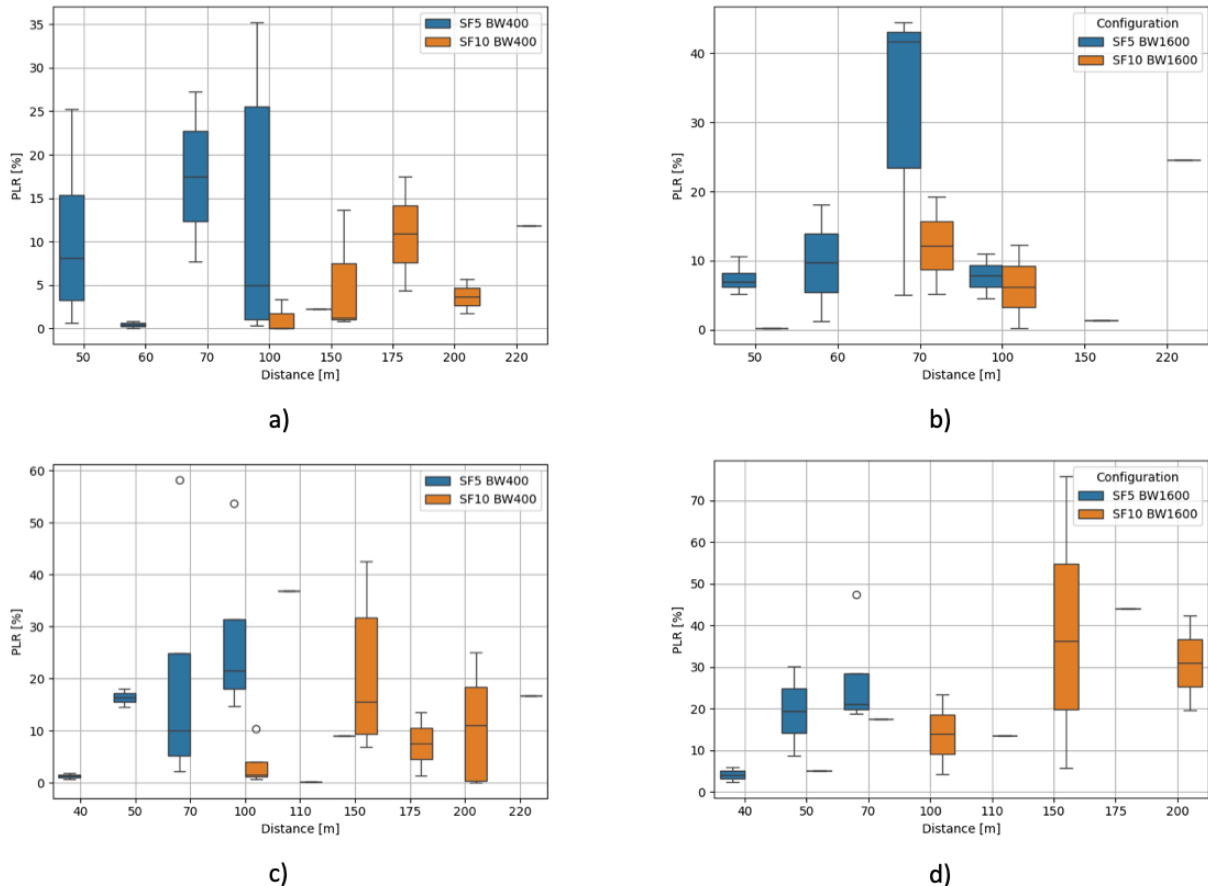


Abbildung 19: Balkendiagrammdarstellung der PLR für a) LoS und nahe LoS SF={5, 10}, BW=400KHz, b) LoS und nahe LoS SF={5, 10}, BW=1600KHz, c) NLoS SF={ 5, 10}, BW=400KHz, d) NLoS SF={5, 10}, BW=1600KHz; Ausnahmen, wenn nur eine Messung verfügbar war: a) SF5BW400 Distanz 150 m, SF10BW400 Distanz 220 m, b) SF10BW600 Distanz 50 m, SF10BW1600 Distanz 150 m, SF10BW1600 Distanz 220 m, c) Distanz 110 m, SF5BW400 Distanz 150 m, Distanz 220 m, d) SF10BW1600 Distanz 50 m, SF10BW1600 Distanz 70 m, Distanz 110 m, SF10BW1600 Distanz 175 m.

Wichtigste Erkenntnisse:

- LoS mit SF5BW1600: Bei einer Entfernung von 100 m ergibt sich eine geringere Abweichung, was jedoch auf weniger Messungen als beim SF5BW400 zurückzuführen ist. SF5BW1600 hat an Standorten, an denen SF5BW400 ein Signal empfangen hat, kein Signal empfangen, daher ist SF5BW1600 möglicherweise nicht unbedingt besser. Wenn Werte aus der gleichen Entfernung berücksichtigt werden, hat SF5BW400 einen niedrigeren PLR. Niedrigere SF zeigen höhere Abweichungen zwischen Standorten pro Entfernung, was zu erwarten ist, da es weniger robust gegenüber Ausbreitungsverlusten ist.
- NLoS-Fall: Niedrigere SF zeigen Ausreißer, die zu hohen PLR-Werten führen. Bei SF10 sind die Abweichungen höher als im LoS-Fall.
- Beste Ergebnisse: Die besten Ergebnisse werden beobachtet, wenn die Knoten:

- vor dem AP,
 - über dem Boden erhöht sind,
 - keine große Oberfläche darunter haben.
- Auswirkung einer Erhöhung der BW: Durch eine Erhöhung der BW erhöht sich der PLR, da das Signal anfälliger für Störungen ist. Dies wird hauptsächlich durch die Mehrwegeausbreitung verursacht, die in den beobachteten Szenarien stark ausgeprägt ist.

LoRa 2.4Ghz Baseline Versuchsaufbau Indoor

In dieser Umgebung (Abbildung 20) befanden sich nur wenige Punkte in LoS mit dem AP. Sowohl LoS- als auch NLoS-Ergebnisse werden gruppiert, da es im LoS des AP nur einen Standort pro gemessener Entfernung gab. Der AP wurde etwa 0,5 m über dem Boden platziert, während die Knoten direkt auf dem Boden positioniert waren. Es gibt insgesamt acht Messentfernungen {5 m, 9 m, 15 m, 19 m, 27 m, 30 m, 34 m, 38 m}, wobei jede Entfernung sechs verschiedene Standorte hatte, die mit Buchstaben markiert waren, die auch der Knoten-ID entsprechen (siehe Abbildung 20). Orte, die zur gleichen Entfernung gehören, haben die gleiche Farbe. Die Messungen wurden nicht an allen Standorten gleichzeitig durchgeführt. Stattdessen haben wir verschiedene Standorte, die in der gleichen Entfernung lagen, in einem einzigen Fall gemessen.

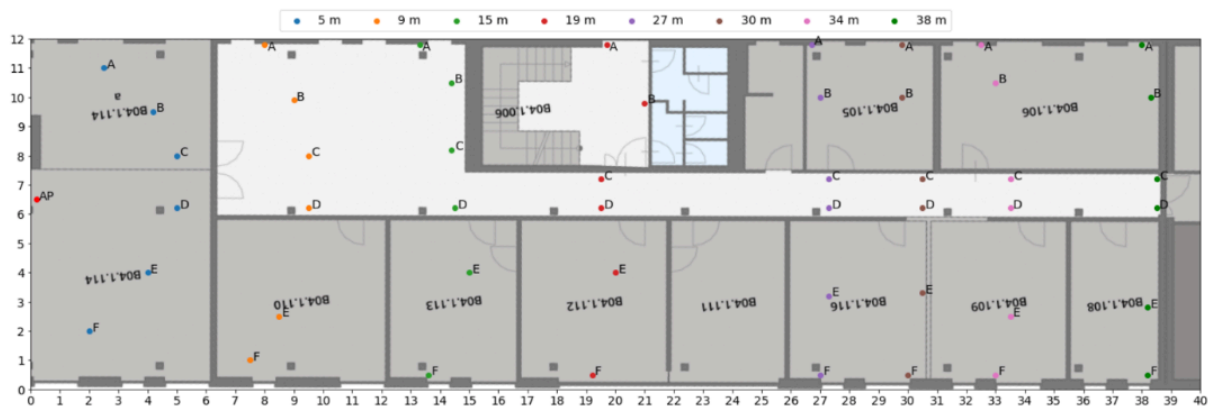


Abbildung 20: Setup-Layout Indoor-Messungen für acht verschiedene Standorte {5 m, 9 m, 15 m, 19 m, 27 m, 30 m, 34 m, 38 m}

Wir empfangen pro Konfiguration etwa zweitausend Pakete von jedem Knoten. Hier repräsentiert jeder Knoten einen eindeutigen Standort.

Die wichtigsten untersuchten Konfigurationen sind die Kombinationen der folgenden Parameter: SF={5, 10} und BW=1600 KHz. Von größerem Interesse war das Testen einer Konfiguration, die eine höhere Datenrate bietet. Der SF12 wurde nicht ausgewählt, da parallel zum PLR auch die Ranging-Leistung (hier nicht erwähnt) analysiert wurde. Für SFs über 10 ist kein Ranging verfügbar.

Abbildung 21 zeigt den mittleren PLR über die Distanz. Jeder Standort verfügt über sechs verschiedene Standorte, die alle in einem Kegel vor dem AP positioniert sind. Alle sechs Standorte pro Distanz wurden gleichzeitig durchgeführt.

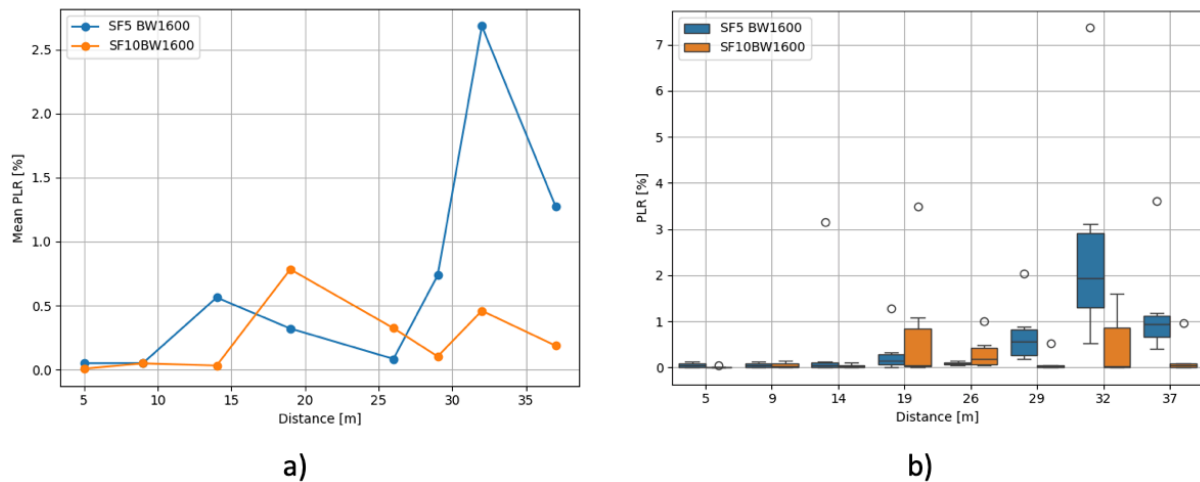


Abbildung 21: PLR Ergebnisse für SF = {5, 10}, BW = 1600 KHz in Abhängigkeit der Entfernung zum AP, a) mittlerer PLR, b) Abweichungen pro Standort.

Wichtigste Erkenntnisse:

- Das Diagramm zeigt kaum Unterschiede im PLR zwischen den beiden Konfigurationen.
- Bei größeren Entfernungen steigt der PLR von SF5, während SF10 aufgrund der längeren Symbolzeit keine Probleme zeigt. SF10 scheint größere Entfernungen besser zu bewältigen als SF5, da es aufgrund der höheren Robustheit gegenüber Störungen und der geringeren Empfängerempfindlichkeit auch bei größeren Entfernungen keine Probleme zeigt.
- Bis zu 40 m in Innenräumen bietet eine niedrigere SF mit hoher Bandbreite günstige PLR und sorgt auch für hohe Datenraten, was für Anwendungen mit höheren Datenraten von Vorteil ist.
- Mit zunehmender Entfernung könnte der PLR beginnen zu steigen, aber der Grenzwert muss noch weiter getestet werden.
- Das Diagramm zeigt, dass mit zunehmender Entfernung die Abweichung aufgrund der zunehmenden Anzahl reflektierter Signale und der Verschlechterung der Signalstärke größer wird. Die Positionierung von LoS und NLoS verdeutlicht den erheblichen Einfluss der Entfernung auf die Leistung dieser Konfigurationen. Dies unterstreicht weiter die Notwendigkeit einer sorgfältigen Berücksichtigung der Knotenplatzierung und -entfernung in realen Anwendungen.
- Der Einfluß der Positionierung von LoS und NLoS wird mit zunehmender Entfernung deutlicher.
- Bedarf an weiteren Tests: Der Anstieg des PLR mit zunehmender Entfernung legt nahe, dass weitere Tests erforderlich sind, um die Grenzen dieser Konfigurationen zu bestimmen.

3.5 Energiemanagement und Harvesting

3.5.1 Energiemanagementkonzepte für Sensorknoten

Zu Beginn wurde eine Grundlagen-Recherche durchgeführt, wie Energie in den vorgeschlagenen Use-Cases aus der Umgebung geerntet werden kann. Als Resultat wurde beschlossen, folgende Energiequellen zu nutzen:

Licht aus der Umgebung

Für ein System, das im Freien betrieben wird, wie beispielsweise das System von eologix, kann eine Nutzung von Photovoltaik gewählt werden. Denn anders als bei künstlichen Indoor-Lichtquellen ist bei direkter Sonneneinstrahlung eine hohe Leistung zu erwarten. Da integrierte Schaltkreise für die Energieumwandlung existieren und auch in der Hardware eingesetzt wurden (siehe Kap. 3.5.2), war die Herausforderung insbesondere das Evaluieren und Experimentieren mit der Größe, der Ausrichtung und den unterschiedlichen Typen von Photovoltaik-Zellen.

Ein klarer Nachteil ist, dass in der Nacht, bei Bewölkung und Regen sowie Schnee deutlich weniger Leistung zur Verfügung steht. Es muss daher eine Umsetzung ein Speicherelement beinhalten, das genug Energie aufnehmen kann, um die einstrahlungsfreie bzw. einstrahlungsreduzierte Zeit zu überbrücken.

Stromtransformatoren

Für die Messung in Schaltschränken, wo aufgrund von Sicherheitsbestimmungen, aber auch Garantie- und Herstellervorschriften nicht direkt in die Stromkreise eingegriffen werden darf, war der Ansatz, bestehende Stromflüsse zu nutzen und einen kleinen Teil davon abzugreifen. Dazu wurden Strom-Transformatoren (Abbildung 22) evaluiert, die normalerweise zu Messzwecken über Stromleitungen geklemmt werden. Sie sind so aufgebaut, dass man sie um ein Kabel herum installieren kann, ohne das Kabel abschrauben und damit unterbrechen zu müssen – der Eingriff erfolgt somit störungs- und risikofrei.

Abhängig vom Stromfluss im Kabel wird eine entsprechende Spannung induziert, die gut und einfach für das Harvesten genutzt werden kann. Nachteilig ist dabei allerdings, dass das Zielsystem aktiv sein muss, da sonst klarerweise keine Ströme fließen. Diese Form des Harvestens eignet sich also langfristig nur für tatsächlich betriebene Maschinen.

Streufeld von Elektromotoren

Elektrische Antriebsmotoren erzeugen immer ein Streufeld. Bei größeren Motoren kann der magnetische Fluss ausreichend sein, um eine oder mehrere Harvesting-Spulen mit Energie zu versorgen (Abbildung 23). Wenngleich diese Idee von Anfang an sehr vielversprechend schien, mussten erst Testaufbauten entwickelt und Versuche durchgeführt werden (Kap. 3.5.2 und 3.5.3), um die theoretische Idee auch in der Praxis zu evaluieren.



Abbildung 22:
Messtransformator für das Harvesting.

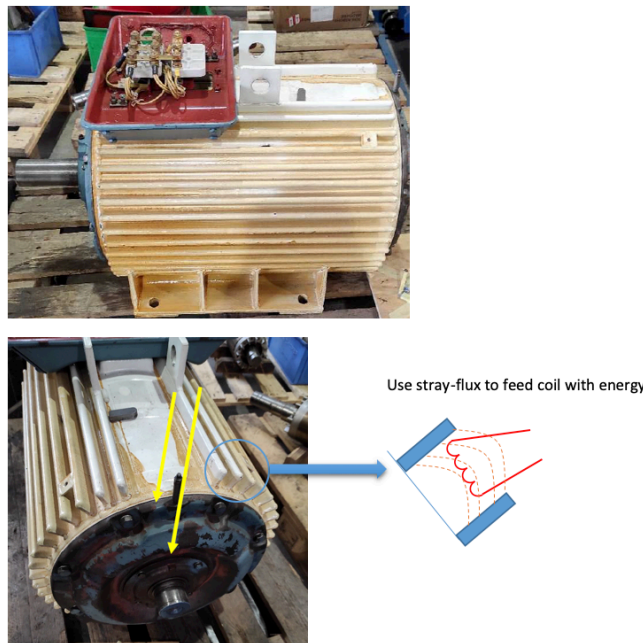


Abbildung 23: Idee des Harvestings aus dem magnetischen Streufeld eines Elektromotors

Wie bei der Idee der Stromtransformatoren zuvor ist auch hier der Nachteil, dass es ein veränderliches Magnetfeld geben muss, um Energie ernten zu können. Und das entsteht klarerweise nur, wenn der Motor tatsächlich in Betrieb ist. Nachdem aber große Motoren bereits im Leerlauf bis zu 70 % der Maximalenergie konsumieren, ist zumindest für den Betriebsfall mit einer relativ konstanten Energielieferung zu rechnen.

Vibration

Die Bewegung von Teilen kann auf verschiedene Arten in elektrische Energie umgewandelt werden, beginnend bei einer drehend gelagerten Unwucht wie bei Armbanduhren, wo ein Generator aus der Drehbewegung Strom erzeugt. Ein anderer erfolgreicher Ansatz ist die Nutzung von Piezokristallen, die eine Ladungsmenge produzieren, wenn man sie zusammendrückt, wie das beispielsweise bei Piezofeuernzeugen sichtbar ist. Während der Ansatz des Drehens auch bei geringeren Geschwindigkeiten funktioniert, wenngleich mit dem Nachteil eines größeren Gewichts aufgrund der notwendigen Getriebeübersetzung der Drehzahl, ist für Piezokristalle eine rasche kurzhubige Bewegung, somit eine Vibration, von Vorteil. Eine solche Vibration ist bei den meisten Industrieanlagen jedoch nicht gewünscht und wird nach Möglichkeit sogar unterdrückt.

Temperatur

Das Ernten von Energie aus Wärme benötigt immer eine Temperaturdifferenz, d.h. es muss auch eine kühlere Stelle möglichst in der Nähe geben. Bei den meisten Industrieanwendung ist diese Differenz aber zumindest nach längerer Betriebsdauer ziemlich klein, ein etwaiger thermoelektrischer Generator muss daher ziemlich groß sein. Die normale Aufgabe solcher Systeme ist es meist, als Peltier-Element elektrisch zu kühlen.

3.5.2 Umsetzung der Harvestingmodule

Die Methoden der Energiegewinnung wurden in Kap. 3.5.1 beschrieben; die gewonnene Energie muss aber entsprechend umgewandelt und dann auch gespeichert werden. Am Markt sind bereits Energy-Harvesting-Stromversorgungsbausteine verfügbar, die sich durch einen äußerst niedrigen Ruhestrom im

Bereich von Nanoampere auszeichnen und auf den jeweiligen Einsatzzweck zugeschnitten sind. Deshalb wurden mehrere Harvester in Form einer Datenblattanalyse recherchiert:

- Analog Devices ADP5090
- Analog Devices LTC3588
- E-Peas Photovoltaic AEM10941
- ST SPV1050
- TI BQ25504

Im zweiten Schritt wurden Testaufbauten für die Energy-Harvesting-Konzepte aufgesetzt. Mit diesen konnte eine erste praktische Messung durchgeführt werden, wieviel Energie in Abhängigkeit von den Umgebungsfaktoren tatsächlich geerntet werden kann.

Zudem wurde auch der Stromverbrauch der Sensoren und der Mikrocontroller sowie der Datenübertragungsmodule gemessen. Daraus konnte weiteres Wissen generiert werden, wie oft gemessen werden kann und wie oft die Daten dann übertragen werden können, wie zu erwarten war ist der Stromverbrauch während der Übertragung am höchsten, da ja Funkwellen abgestrahlt werden müssen. Deshalb ist die Häufigkeit der Datenübertragungen möglichst gering zu halten, da ja der Auf- und Abbau der Verbindung ebenfalls Energie kostet. Das Übertragen großer Datenmengen hat sich als unmöglich herausgestellt, wenn man die Energie ausschließlich aus der Umgebung beziehen kann, bei LoRa ist ein solches Übertragen hoher Datenmengen oder das häufige Übertragen aufgrund der Einschränkungen durch den Standard ohnehin verboten. Deshalb muss eine möglichst vollständige Vorverarbeitung direkt am Sensorknoten erfolgen. Es hat sich gezeigt, dass die Verarbeitung auch bei Nutzung eines leistungsstarken Mikrocontrollers in jedem Fall vorteilhafter ist als das Übertragen von unverarbeiteten Rohdaten.

Als Ergebnis der Evaluierungen hat sich gezeigt, dass die beiden Chips von Analog Devices deshalb am besten geeignet sind, weil sie vollwertige Gesamtlösungen mit entsprechenden Leistungsdaten darstellen. Sie wurden daher für die Schaltungsentwicklung ausgewählt. Während der ADP5090 speziell für Photovoltaik-Zellen designt wurde, passt der LTC3588 gut für andere Energiequellen.

Für die Evaluierung des Einsatzes in realen Umgebungen wurden drei völlig unterschiedliche Anwendungen ausgewählt und dazu entsprechende spezifische Systeme entwickelt. Das erste Testfeld dient zur Verifikation von Funktechnologien in schwierigen Umgebungen, dazu wurde eine Installation in der Kettenfertigung beim Unternehmen pewag aufgebaut (Use Case 1). Dort werden aus Volldraht mit Stärken bis 10 mm Kettenglieder gebogen und dann zu Endlosketten gebogen und verschweißt. Insbesondere durch den Schweißvorgang, aber auch die sonstigen elektromagnetischen Störungen ist eine drahtlose Datenübertragung nur möglich, wenn die Kommunikation robust ausgelegt ist. Die Übertragung erfolgt deshalb mit Ultra-Breitband (UWB), um Reflexionen und Störungen möglichst auszublenden. Das Meshing dient hier vor allem der Sensor Fusion, also dem Zusammenfassen von Daten. Das Sammeln erfolgt z.B. sternförmig an einem zentralen Punkt.

Eine zweite Anwendung ist das Detektieren von Vereisung und Materialermüdung auf Windrotorflügeln (Use Case 3). Hier wurde das Unternehmen eologix sensor technology gmbh (nunmehr eologix-Ping) bei der Optimierung ihrer Lösung im Bereich der Elektronik unterstützt. Besonders herausfordernd ist die Stromversorgung, die aufgrund der Drehbewegung ausschließlich über Photovoltaik samt Akkupufferung

erfolgen kann. Dazu kommt, dass die Messung insbesondere im Winter notwendig ist, wo durch niedrige Temperaturen und kürzere Tage ohnedies weniger Energie zur Verfügung steht. Im Vordergrund steht daher die Minimierung des Strombedarfs, weshalb als Technologie LoRa genutzt wird. Die Netzwerkfunktionalität wird vor allem dafür benötigt, mehrere Rotorblätter auf mehreren Windrädern von einer zentralen Stelle aus zu überwachen.

Der dritte Use-Case betrifft die Messung von Maschinenparametern direkt an großen Elektromotoren (Use Case 2). Diese verfügen zwar über eine Stromversorgung, die aber für die Anbindung von Sensorik denkbar ungeeignet ist, da Eingriffe in den Starkstrombereich sicherheitstechnisch bedenklich sind und zudem nur mit viel Aufwand eine störungsfreie Versorgung ermöglichen. Die Idee für das Harvesten, die gemeinsam mit der Firma Spalt Technology GmbH umgesetzt wurde, ist die Nutzung des Streufelds der Elektromotoren.

Entsprechend wurden die Modulkonfigurationen bzw. Platinen mit den entsprechenden Harvestern und Funkmodulen ausgestattet in den diese Ergebnisse eingeflossen sind.

Auf eine Nutzung der Energiequellen Temperatur und Vibration wurde aufgrund der Use-Cases und der zu erwartenden geringen Energiemenge verzichtet.

3.5.3 Modultests

Der Use-Case 1 (pewag) zeigt die Probleme im industriellen Fertigungsumfeld sehr gut auf. Das Schweißen eines Kettengliedes erfolgt mittels Elektroschweißen, die während dieses Vorgangs auftretenden elektrischen und magnetischen Felder bringen beispielsweise den Bildstabilisator bzw. die Fokusoptik von Smartphone-Kameras außer Tritt und sorgen für einen Absturz von Laptops und stören daher auch die Funkschnittstelle extrem, was bis hin zu unzulässigen Strömen an der Antenne führen kann. Der Vorgang ist andererseits aber so kurz, dass nicht ausreichend viel Energie geerntet werden kann. In solchen Umgebungen ist Energy-Harvesting nur mit sehr großem Aufwand möglich. Da die Maschinen größtenteils ohne menschliche Eingriffe arbeiten und die Hallen daher meist schlecht beleuchtet sind, entfällt auch die Möglichkeit der Nutzung von Photovoltaik. Auch eine Energieerzeugung über bewegte Magnete muss entfallen, da die Induktionsströme während des Schweißvorgangs viel zu hoch wären.

Der Fokus der Evaluierung liegt aufgrund dieser Erkenntnisse auf der Funkübertragung und die Evaluierung des Harvestens wird abgebrochen. In Bezug auf die Datenübertragungskapazität wäre der Betrieb einer Schweißmaschine allein noch keine große Erschwernis, da dann die Verbindung im Takt der Fertigung jeweils nur kurz unterbrochen wird. Ein Takt von 1,2 Sekunden und eine Schweißdauer von 0,2 Sekunden ergibt einen Duty Cycle von ca. 16 % oder umgekehrt ca. 84 % Schweißpause. Da aber zudem noch ein diskontinuierlicher Vorschub mit starken Antrieben erfolgt und in der Halle zahlreiche Fertigungsstraßen parallel arbeiten, muss von einer dauerhaften Störungsbelastung ausgegangen werden. Eine Funkübertragung kann daher nur mit einer möglichst breitbandigen Übertragungstechnik erfolgen, weshalb hier UWB zum Einsatz kommen muss.

Use-Case 3 (eologix) zeichnet sich durch erschwerte Umweltbedingungen in Bezug auf Temperatur und Bewegung des Systems aus. Insbesondere im Winter fordert die Kombination aus geringer Sonneneinstrahlung und schlechtem Wirkungsgrad des Akkus bei niedrigen Temperaturen, verstärkt durch Windchill an den Rotorflügeln, eine möglichst effiziente Datenübertragung. Das Testsystem wird

daher aus einer hochperformanten Photovoltaik-Zelle der 3. Generation (Abbildung 24), dem ADP5090 als Harvester sowie dem ST-Microcontroller mit integriertem LoRa aufgebaut.

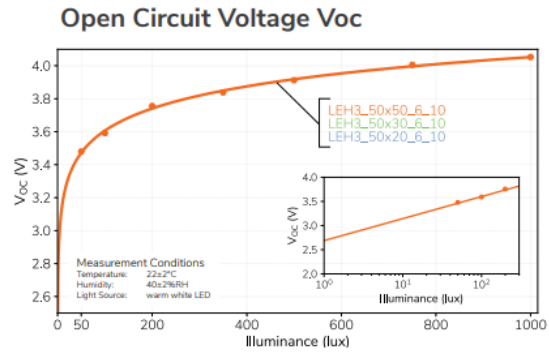
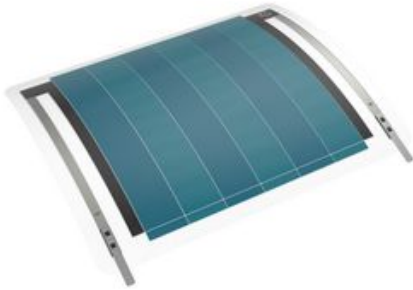


Abbildung 24: PV-Zelle der 3. Generation (links) und deren Spannungsverlauf (rechts).

Da der Harvester bereits bei einer Spannung von < 1 Volt startet und eine vernachlässigbare Verlustleistung bietet, kann dieser bereits bei geringer Bestrahlung (siehe Leistungs-Spannungscharakteristik einer PV-Zelle, Abbildung 25) starten und Energie in den Pufferakku liefern. Da die Vereisung auf den Rotorflügeln ein vergleichsweise langsamer Prozess ist, erscheint eine Messung in entsprechenden Intervallen ausreichend, gesendet muss zudem nur bei Veränderungen werden, ergänzt durch Statusmeldungen als Lebenszeichen. Das entspricht auch den Vorgaben der LoRa-Alliance, dass immer nur kleine Pakete in größerem Zeitabstand gesendet werden dürfen. Über die Sendeleistung lässt sich zudem die Reichweite steuern, sodass in Windparks nicht zwingend auf jedem Mast ein Empfänger positioniert werden muss.

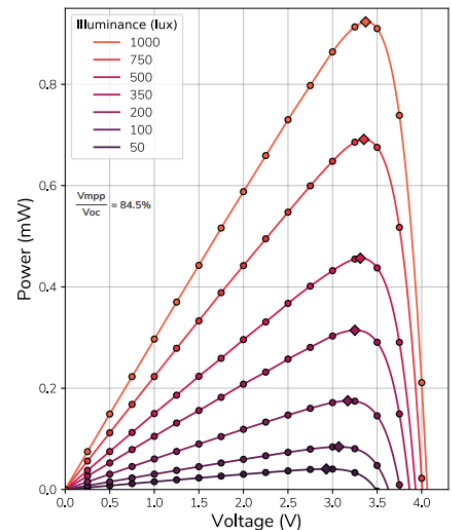


Abbildung 25: Leistungs-Spannungs-Charakteristik der PV-Zelle

Die Messung in Use-Case 2 (Spalt) erfolgte an einem Motor mit 45 kW Nennleistung (Abbildung 26), angebunden an einen Frequenzumrichter zur Steuerung. Zu bemerken ist dabei, dass der Motor schon im Leerlauf bereits 30 % der Nennleistung erreicht. Somit steht immer ein Streufeld zur Verfügung, das zur Energiegewinnung dienen kann. Für die Messung wird ein eigens konstruierter und 3D-gedruckter Klemmadapter für kleine Spulen sowie eine größere handgewickelte Spule verwendet, mit dem Aufbau lässt sich der Zusammenhang von Belastungsspannung und Belastungsstrom messen. Die höchste Energiedichte herrscht zwischen den beiden Ösen, die eigentlich für das Versetzen des Motors mittels eines Krans oder Staplers vorgesehen sind.

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

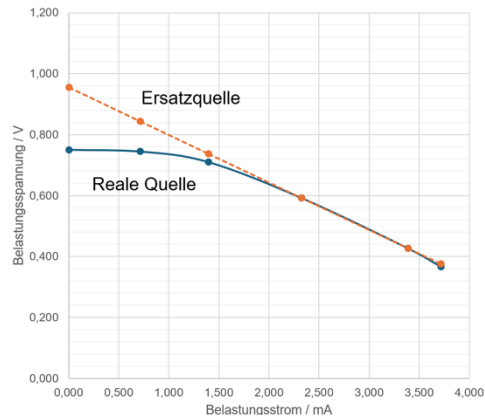


Abbildung 26: Messaufbau auf dem Elektromotor (links), Belastungsspannung vs. Belastungsstrom (rechts).

Aus den Messergebnissen lässt sich das Ersatzschaltbild einer Quelle mit knapp 1 Volt Spannung sowie einem Innenwiderstand von 156 Ohm ableiten (Abbildung 27). Die Energie ist ausreichend, um kumuliert eine permanente Durchschnittsleistung von 1 mW zu liefern. Das ermöglicht es, einen Mikrocontroller dauerhaft zu betreiben und zusätzlich einen Puffer zu laden, der genug Kapazität für das sendende Übermitteln der Daten bereitstellt. Die Oszillogramme (Abbildung 28) zeigen eine Eingangsspannung von 1,2 Volt RMS sowie eine stabile Ausgangsspannung von 5 Volt Gleichspannung am Ausgang des verwendeten LTC3588, der wiederum bei < 1 Volt startet und sich durch vernachlässigbare Verluste auszeichnet.

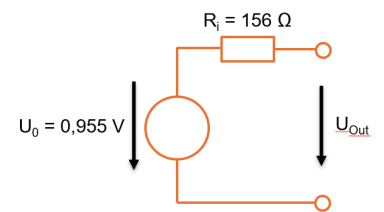


Abbildung 27: Ersatzschaltbild der Harvesting-Spule

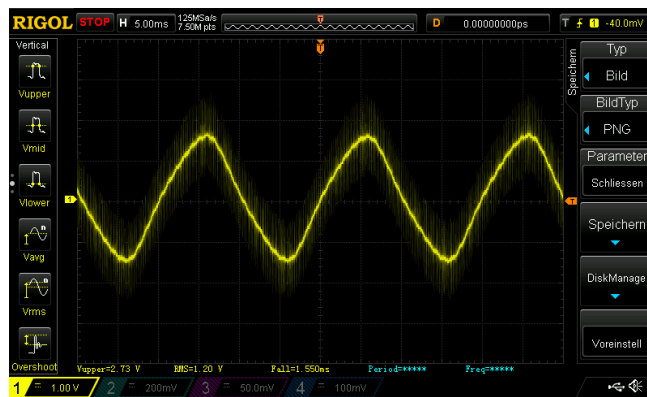


Abbildung 28: Oszillogramme $V_{in} = 1,2 V_{rms}$, $V_{out} = 5 V_{dc}$

Zusammenfassung: Für den Use-Case bei Pewag war das Harvesten aus der Umgebung bzw. aus dem Schaltschrank vorgesehen. Es wurde aber sofort erkannt, dass am Schaltschrank der relevanten Kettenschweißmaschinen bereits eine Stromversorgung vorgesehen ist. Zudem ergaben die Messungen, dass das Elektroschweißen zu extrem für sinnvolles Harvesten ist, sehr hohe Ströme für eine sehr kurze Zeit. Das würde für jegliche Form von Harvesten eine Überbelastung darstellen, andererseits aber aufgrund der kurzen Dauer nur wenig Energie liefern. Somit war die Grundvoraussetzung für eine konstante Versorgung nur bei direkter Stromversorgung gegeben. Für Use-Case 2 konnte eine Lösung für den permanenten autarken Betrieb von Sensorknoten an großen Elektromotoren gefunden werden. Für Use Case 3 wurde eine PV-basierte Lösung entwickelt.

3.6 PoC Testaufbauten

3.6.1 Use Case 1a: Messung der Versorgungsqualität, pewag – Testaufbau Referenzmessung

Die Strommessungen wurden vor Ort unter realen Bedingungen mit einem laborartigen Testaufbau durchgeführt (Abbildung 29).

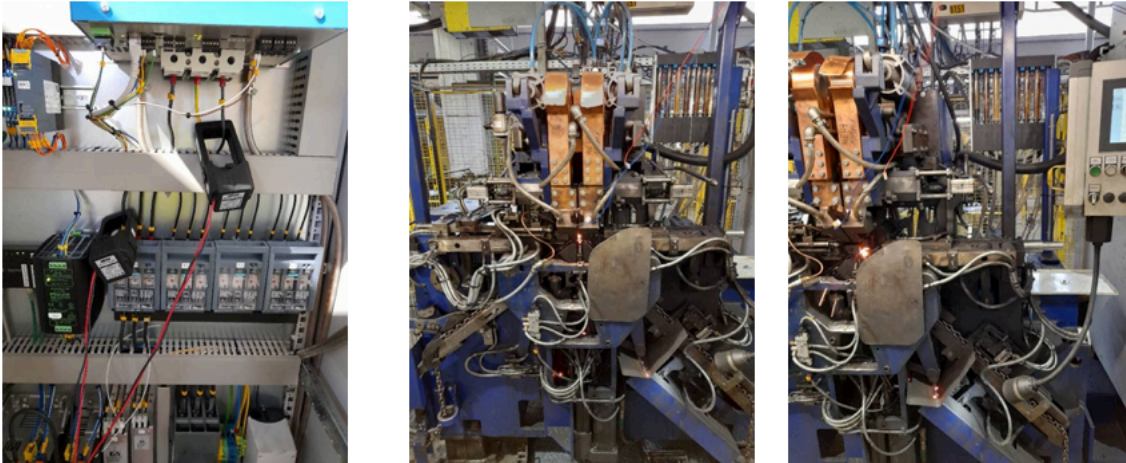


Abbildung 29: Messaufbau für Strommessungen an den Schweißanlagen bei pewag in Kapfenberg. Auf dem Bild links sind die Strommesszangen bei der Zu- und Ableitung im Schaltschrank zu sehen. Im Bild Mitte und rechts sind die Messzangen direkt im Prozess dargestellt.

Die Wago Strommesszangen wurden im Schaltschrank an den einzelnen Phasen der Zuleitung der Schweißmaschine befestigt. Zur Datenerfassung selbst kommt ein industrielles Messsystem von Dewesoft als Referenzsystem, welches für die Aufnahme hoch performanter Daten geeignet ist, zum Einsatz. Die verwendete Sensorik besteht aus Wago Zangen mit einem Umrechnung Faktor 1000/1 A, dadurch eignen diese sich zur Aufnahme höherer Ströme. Sowohl das Messgerät als auch die Sensorik sind Industriemessgeräte und dadurch für Einsätze in rauer Umgebung geeignet. In der Messsoftware können die Daten direkt analysiert und für weitere Berechnungen und Analysen exportiert werden.

3.6.2 Use Case 1a: Test Setup für pewag mit ConSens Sensorknoten

Bei dem bei der Firma pewag durchgeführten Test wurde wie unter Kap. 3.6.1 die Stromstärke gemessen, die zum Schweißen von Metallkettengliedern in einer automatischen Produktionslinie erforderlich ist. In die automatische Linie integrierte physikalische Sensoren lieferten Spannungsausgänge. Für die Messungen wurden zwei UWB-Geräte (Ultra-Wideband) verwendet. Das erste Gerät wurde mit einem analogen Pfad zum Anschluss des physischen Sensors erweitert, der einen ADC (Analog-Digital-Wandler) enthält und eine Echtzeit-Datenübertragung zum zweiten UWB-Gerät ermöglicht. Dieses zweite Gerät wurde über einen USB-Bus mit einem PC verbunden. Die finale Visualisierung der Daten der Schweißmaschine wurde am PC mittels Python und Matplotlib umgesetzt.

3.6.3 Case 1b: Conditionmonitoring an Schweissanlagen, Schwingungsmessung der Kontaktierungsköpfe

Weitere Messungen wurden an den Kontaktierungsköpfen der Schweißmaschine durchgeführt (Abbildung 30). Anhand der Schwingungen der Kontaktierungsköpfe kann man Rückschlüsse auf die Qualität der Schweißnähte ziehen. Ein Frühzeitiges Erkennen der Abnutzung der Kontaktierungsköpfe verhindert das Produzieren von Fehlerhaften Schweißnähten (Kettengliedern). Dies spart Ressourcen sowie Energie.

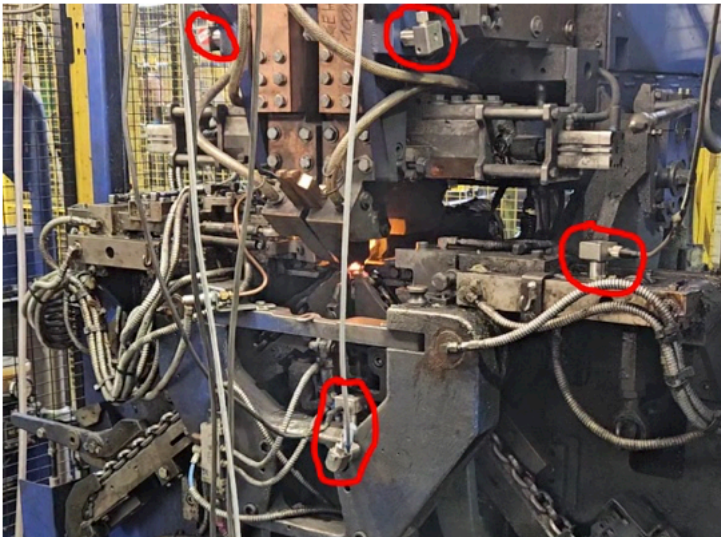


Abbildung 30: Testaufbau für die Schwingungsmessung an den Kontaktierungsköpfen der Schweißmaschinen bei pewag in Kapfenberg. Gezeichnet sind die Schwingungssensoren im linken Bild. Rechts ist die Orientierung der Achsen der Schwingungssensoren angegeben.

Dies Sensorik wurde jeweils an den Kontaktierungsköpfen befestigt. Die verwendete Vibrationssensorik besteht aus Triax Sensoren, die in X-Y- und Z – Richtung messen. Zur Datenerfassung wurde wie bei den Strommessungen ein industrielles Messsystem verwendet. Es wurde mit einer Abtastrate von 20kHz gemessen. Die Messung wurde bei unterschiedlichen Maschinen durchgeführt.

3.6.4 Use Case 2: Test Setup für Vibrations- und Temperatur- Monitoring an Elektromotoren, Spalt

Der Demonstrator für den PoC wurde bei Spalt an einem realen Motor getestet und geprüft. Das Gerät verfügt über fünf Kanäle zur Temperaturmessung, zwei analoge Kanäle zur Vibrationsmessung, Kanäle zur Energieeinsparung und einen drahtlosen UWB-Kommunikationskanal (Ultra-Wideband). Der Motor, in dem bereits Temperatursensoren installiert sind, ist auf einer speziellen Halterung montiert. Befestigungspunkte für die analogen Vibrationssensoren wurden vorbereitet.

Die Temperatursensoren wurden an das PoC-Gerät angeschlossen und die Vibrationssensoren zusätzlich positioniert (Abbildung 31). Das Datenerfassungsgerät sammelt alle Informationen und übermittelt sie an den Access Point (AP),



Abbildung 31: Testmotor mit installiertem ConSens Demonstrator (weisse Box) und Vibrationssensoren an der Motorvorderseite.

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

der als Router fungiert. Diese Daten werden dann an den Einplatinencomputer Raspberry Pi 4 gesendet und dort in Echtzeit in einer Datenbank aufgezeichnet. Auf dem Raspberry Pi 4 läuft außerdem ein einfaches Datenvisualisierungsprogramm, das einen Echtzeitvergleich der Daten mit einem kommerziellen System ermöglicht. Der Fernzugriff auf diese Datenbank wurde durch die LTE-Technologie ermöglicht.

Die Anpassungen am Demonstrator für Spalt zeigten den Bedarf an zusätzlichen Arbeiten an den Schwingungsmesskanälen. Daher wurde im Messfeld-Labor ein zusätzlicher Test auf einem Vibrationsprüfstand durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden zwei Schwingungsmesskanäle an den Schwingungsprüfstand angeschlossen. Der Shaker erzeugte Schwingungen einer bestimmten Frequenz und die Messungen wurden verglichen.

3.6.5 Use Case 3: Test setup for vibration measurement at eologix

Die eologix-Messungen wurden im eologix-Labor durchgeführt. Für die Messungen wurden mehrere Pläne erstellt. Die Sensorknoten wurden mittels LoRa und UWB miteinander vernetzt. Die Daten wurden in einem Access Point (AP) gesammelt, der die Daten an den Jobrechner übermittelte, der die Daten wiederum zur Speicherung aufzeichnete. Die Sensorknoten wurden wie in Abbildung 32 dargestellt an einem Rotorblattabschnitt montiert.

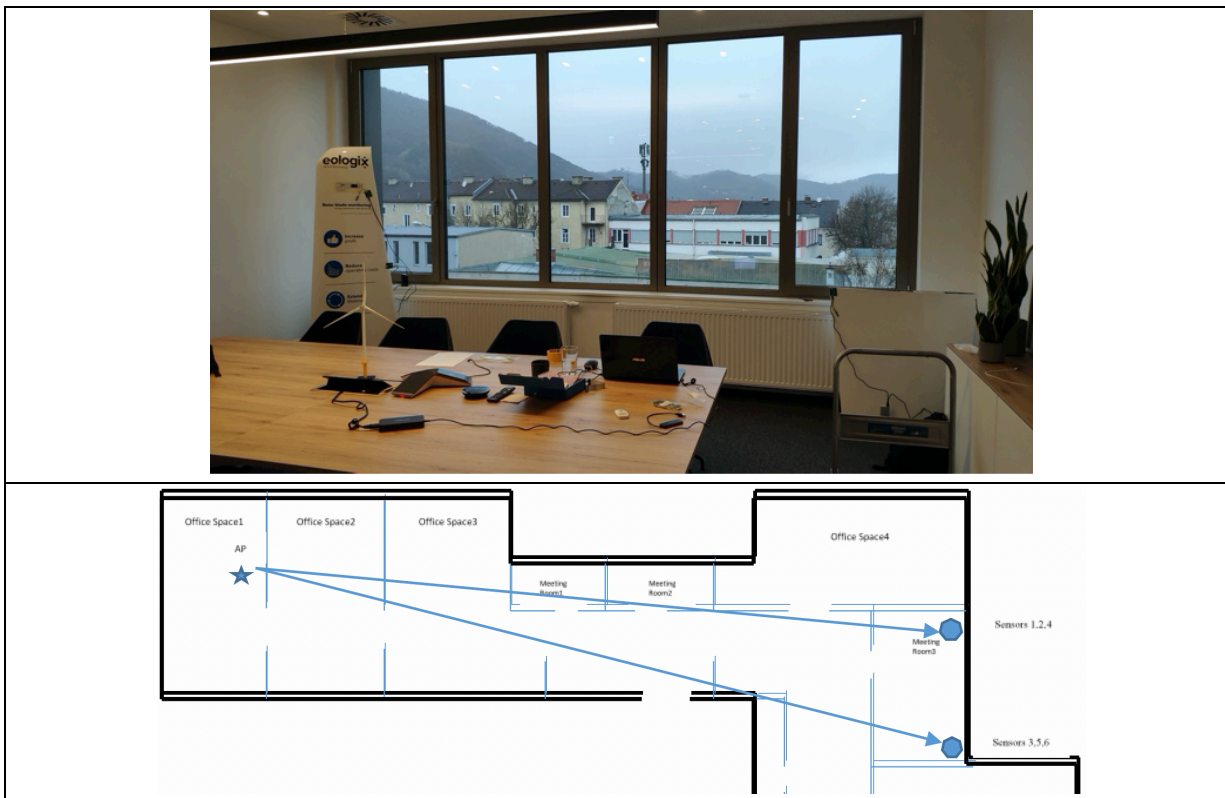


Abbildung 32: PoC Testaufbau bei eologix. Hauptziel der Tests war es, die Koexistenz der LoRa- und UWB-Technologien für den Anwendungsfall zu testen. Der Hauptverkehr des Systems lief über UWB, das als Mesh-Netzwerk funktionierte. Das Design des Mesh-Netzwerks basiert auf dem BLE-Mesh-Ansatz. Die Geräte im Mesh-Netzwerk können sowohl als Sensor als auch als Relais arbeiten. Die LoRa-Schnittstelle wurde verwendet, um Steuerinformationen für das Mesh-Netzwerk zu senden.

Das obere Bild in Abbildung 32 zeigt den Raum mit den Sensoren, wobei die Sensorknoten auf der Rotorblattabschnitt einer Windkraftanlage (links) und auf einem ebenen Element (rechts) montiert sind. Dies entspricht dem Raum auf der rechten Seite im unteren Bild. In diesem Raum befinden sich die Sensorknoten 1, 2 und 4 oben (Rotorblattabschnitt) und die Sensorknoten 3, 5 und 6 unten (ebenes Element). Die Sensorknoten wurden auf 3 verschiedenen Ebenen innerhalb der markierten Orte platziert. Im unteren Bild links ist der AP zu sehen. AP und Sensorknoten waren zwischen 35 und 40 Meter voneinander entfernt. Zwischen AP und Sensoren befanden sich mehrere Gipswände.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

4.1.1 Use Case 1a: Messung der Versorgungsqualität, Gegenseitige Beeinflussung der Schweißanlagen

Die Strommessung wurde im ersten Schritt ohne Last durchgeführt. Anhand der Messung (Abbildung 33) sieht man einen Einfluss der benachbarten Schweißmaschinen deutlich. Das Starten des Schweißprozesses auf den benachbarten Maschinen führt zu einer Änderung der Stromversorgung an der Testmaschine. Die Änderung führt zu den Abweichungen in der Qualität der Schweißnähte und damit zu unnötigem Ausschuss (Ressourcen).

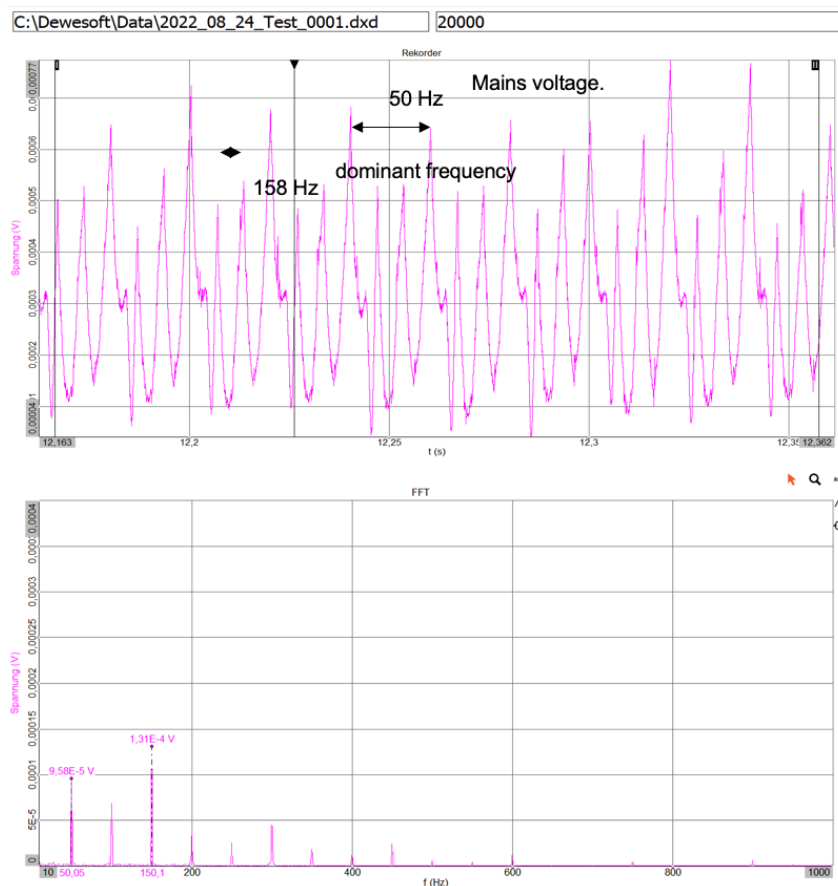


Abbildung 33: Messsignal und Spektrumanalyse der Spannungsmessung ohne Last. Man erkennt anhand der Harmonischen den Einfluss des Nachbarroboters auf diese Schweißmaschine. Bei 50Hz ist die Frequenz der Hauptspannung. Bei 158Hz sieht man den Spannungseinfluss der Nachbarmaschine.

Im zweiten Schritt wurde die Stromzufuhr während des Schweißprozesses an der Testmaschine gemessen (Abbildung 34). Die Messungen wurden über eine Periode von 5 Minuten mit einer Abtastrate von 20kHz aufgenommen.

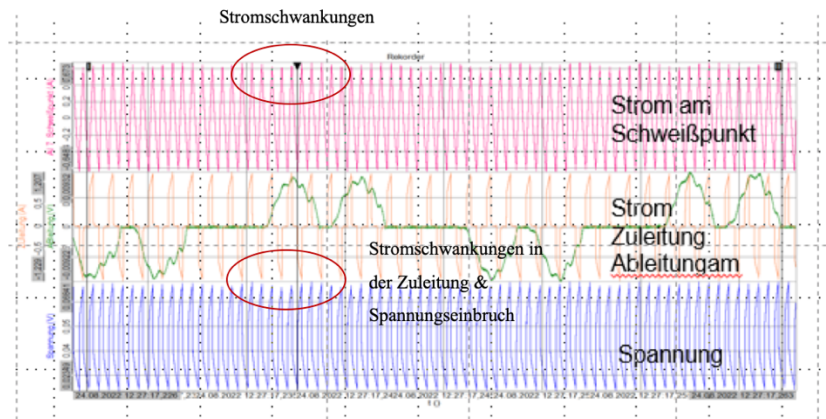


Abbildung 34: Messung des Schweißprozesses - Detailsicht eines Messzyklus. Man sieht den Zusammenhang von Strom zu Spannungsmessung im Zuge einer Schweißnaht. Es kommt zu minimalen Abweichungen bei der Strom Zuleitung zum Schweißroboter, diese führen Zeitgleich zu minimalen Spannungseinbrüchen, sowie zu Schwankungen im Strom direkt am Schweißpunkt. Dies hat Einfluss auf den Schweißvorgang. Diese Schwankungen in den Zuleitungen werden auf Grund des Schweißvorganges des benachbarten Roboters verursacht.

Bewertung der Messungen:

- Ein erster Schritt wäre das Scheduling der verschiedenen Maschinen anzupassen, damit kann desbezüglicher Materialausschuss und dessen energieintensive Aufarbeitung (Einschmelzen) reduziert werden. Eine andere Maßnahme könnte in der Entkopplung der Versorgungen der Schweißanlagen liegen mit gleichem Ergebnis.
- Dauerhafte kontinuierliche Messungen während der Schweißprozessen ist sinnvoll, um die Qualität der Schweißnähte dauerhaft zu überprüfen und gegebenenfalls schneller eingreifen zu können. Dabei würde eine Strommesszange (Wago Strommesszange) auf der Stromzuleitung reichen. Die Abtastrate sollte jedoch bei 20kHz bleiben, da es sich hierbei um schnell auftretende Änderungen handelt.
- Weitere Untersuchungen in einem Nachfolgeprojekt könnten auf die die Abhängigkeit der Messung vom Schweiß Programm, der Gültigkeit für alle Maschinen und der Untersuchung weiterer Einflüsse dienen. Auch dafür wäre ein permanent installiertes Drahtloses Messsystem von Vorteil.

4.1.2 Use Case 1a: Welding current measurements pewag with UWB

Der betrachtete Schweißprozess läuft zyklisch im Sekundentakt ab (Abbildung 35). Dieses regelmäßige Intervall ist wichtig, um konsistente Schweißnähte sicherzustellen und ermöglicht eine synchrone Datenerfassung durch das Spannungserfassungssystem. Die vom Stromsensor DWM1001 aufgezeichnete durchschnittliche Spannung beträgt 1,63 Volt. Der DWM1001-Sensor ist Teil eines drahtlosen Geräteaufbaus, der Spannungswerte bei einer festgelegten Frequenz erfasst. Im Vergleich

dazu liegt die durchschnittliche Spannung, die mit dem Messfeld GmbH-Setup gemessen wurde, mit 1,56 Volt etwas niedriger.

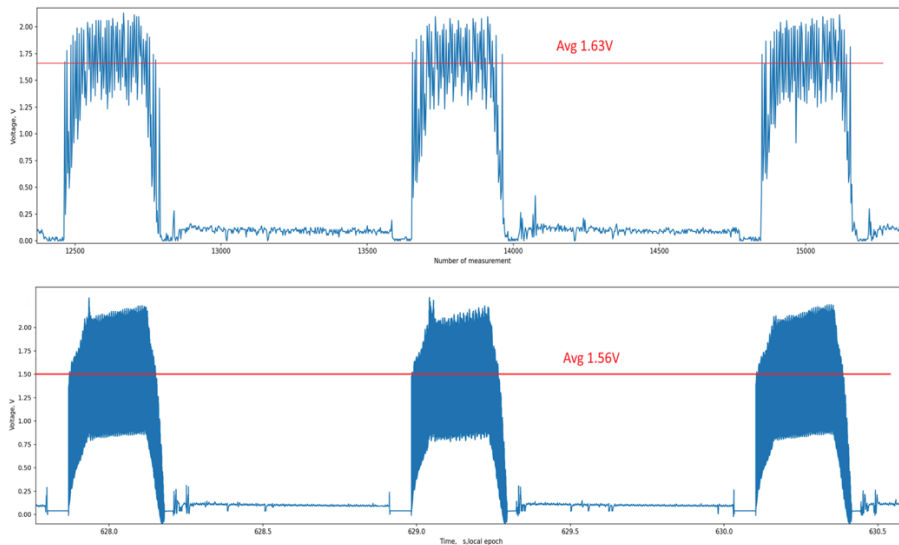


Abbildung 35: Über UWB übertragene analoge Daten des Schweißprozesses (oben) im Vergleich zum Referenzsystem (unten).

Wichtigste Erkenntnisse:

- Die entworfene UWB-Kommunikationsmethode (benutzerdefiniertes Protokoll + ausgewählte Kombination aus physikalischen Eigenschaften des UWB-Kanals, Nutzlast + Übertragungsrate + PHR-Länge) unterstützt hochfrequente Echtzeit-Strommessungen mit analogen Sensoren hinsichtlich Datenübertragung.
- Mehrzweckkanal: Unser Experiment hat gezeigt, dass die Integration eines neuen Sensortyps in das System einfach ist. Wir haben einen analogen Strommesssensor integriert und gezeigt, dass über denselben Kommunikationskanal auch Entfernungsmessungen (Sensorknoten – Accesspoint) möglich sind. Damit kann der Strom- und Energieverbrauch des Schweißprozesses in Echtzeit überwacht werden und gleichzeitig die Position des Sensors bestimmt werden.

4.1.3 Use Case 1b: Condition monitoring an Schweissanlagen (Biegeprozess) – Schwingungsmessung der Kontaktierköpfe

Es wurden die Bewegungen an den Kontaktierungsköpfen während eines Schweißprozesse in allen 3 Achsen (X-, Y- und Z- Richtung) gemessen. Beispielhaft wird die Asymmetrie in Y-Richtung gezeigt (Abbildung 36). Gemessen wurde jeweils die Veränderung in mm.

Die Schweißmaschine hat jeweils zwei Kontaktierungsköpfe links und zwei Kontaktierungsköpfe rechts. Im optimalen Fall bewegen diese sich exakt gleich. Anhand der ersten Messung erkennt man jedoch bereits einen Unterschied zwischen linken und rechten Kontaktierungskopf in allen 3 Richtungen. Anhand der Messunterschiede kann man daraus schließen das die Kontaktierungsköpfe nicht gleichmäßig abgenutzt werden. Dies führt zu einem frühzeitigen Verschleiß einzelner Kontaktierungsköpfe und damit zu einer Minderung in der Qualität der Schweißnaht sowie unnötigen Ausschuß.

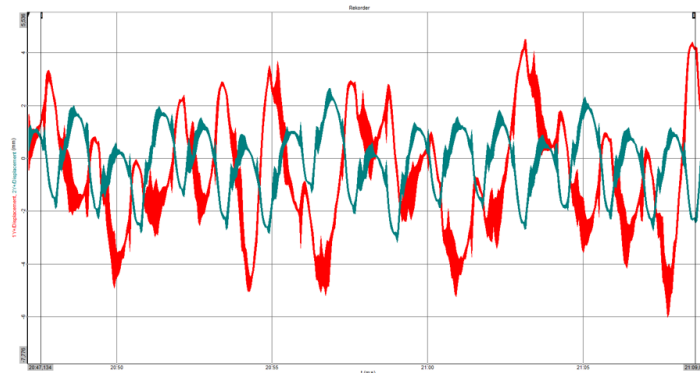


Abbildung 36: Unterschied der Bewegung der Kontaktierungsköpfe links und rechts in Y Richtung

In einer zweiten Messung wurden die Sensoren unterhalb und oberhalb der linken und rechten Kontaktierköpfe angebracht (Abbildung 37).

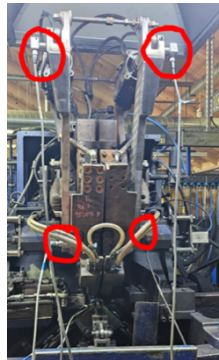


Abbildung 37: Messpositionen zur Messung der Kontaktierungsköpfe

Abbildung 38 dient als Beispiel für oben/unten-Asymmetrien der Kontaktierungsköpfe in X-Richtung.

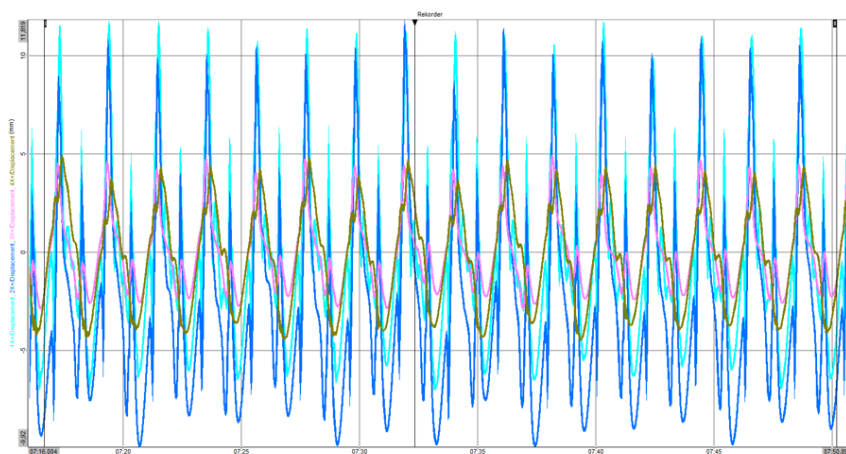


Abbildung 38: Unterschied der Bewegung der oberen Kontaktierungsköpfe zu den unteren in X Richtung.

Bewertung der Messungen:

- Es sind in den Messungen Asymmetrien der Kontaktierungsköpfe deutlich zu erkennen. Diese führen zu geringer Qualität der Schweißnaht und damit zu einem Materialausschuß und unnötigem

Energieverbrauch.

- Für ein fest installiertes System sind 4 Sensoren pro Maschine sinnvoll. Je einer pro Kontaktierungskopf. Die Abtastrate kann auch auf 10kHz gesenkt werden. Es reichen dabei Standard Piezosensoren. Dies kann mit dem identischen Demonstrator wie jener, der für Use Case 2 verwendet wurde realisiert werden (siehe nächstes Kapitel). Der entsprechende PoC für Use Case 2 gilt auch hier.

4.1.4 Use Case 2: Temperatur- und Vibrationsmessungen bei Spalt mit UWB und LTE

In unserem PoC-Test haben wir Messungen am Test-Elektromotor durchgeführt (Abbildung 39). Am Motor wurden 2 Vibrationssensoren und 5 Temperatursensoren verbaut. Elektromotoren sind mit vorinstallierten Vibrations- und Temperatursensoren ausgestattet. An diese Sensoren waren zwei Überwachungssysteme angeschlossen: ein kommerzielles und unser ConSens Demonstrator. Das Design umfasst einen kundenspezifischen Sensorknoten mit 5 Temperatureingängen basierend auf PT100-Sensoren und 2 Eingängen für 1-Achsen-Vibrationssensoren, die mit einer Frequenz von 10 kHz betrieben werden. In Bild 8 ist es als großes graues Kästchen dargestellt. Der Sensorknoten übermittelte Daten über den UWB-Kanal an den AP, eine kleine weiße Box, die über USB mit dem Raspberry Pi verbunden ist und über eine laufende Datenbank zum Speichern von Daten und zum Erstellen einer einfachen GUI verfügt, auf die über ein 4G-Netzwerk aus der Ferne zugegriffen werden konnte.

Der erste Test bei der Spalt GmbH ergab, dass der Kanal für Schwingungsmessungen einer Modifikation bedurfte. Die Daten des Vibrationssystems des Proof of Concept (PoC) unterschieden sich deutlich von denen des von Spalt verwendeten kommerziellen kabelgebundenen Systems. Nach Modifikationen wurde ein zusätzlicher Test am Rüttelstand durchgeführt. In diesem Test wurden Vibrationsdaten vom PoC-Demonstrator mit Messungen verglichen, die mit dem kommerziellen System von Dewesoft durchgeführt wurden. Die Ergebnisse dieser Messungen werden in den unteren Plots von Abbildung 39 angezeigt, wobei die rote Linie die Daten des PoC-Demonstrators darstellt.

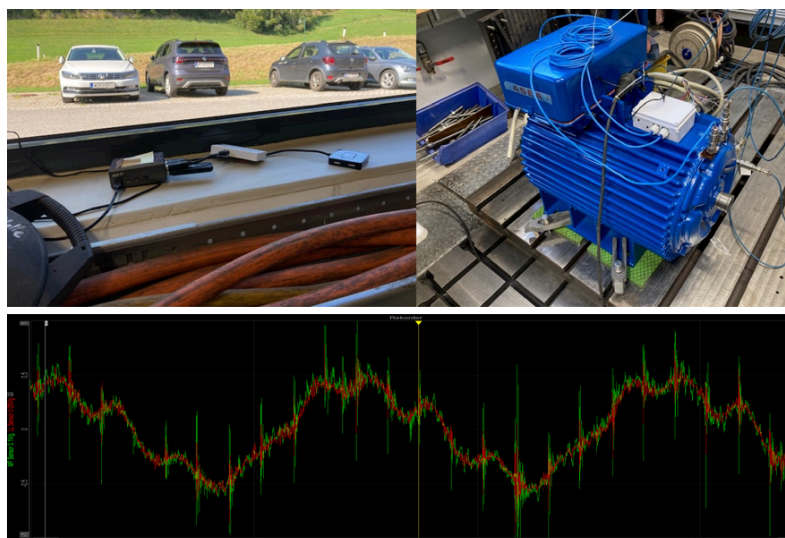


Abbildung 39: PoC-Testaufbau am Elektromotor bei Spalt. Links oben: Raspberry Pi als AP mit LTE-Modul für den Fernzugriff, rechts oben: Sensorknoten (weiße Box) mit Vibrationssensoren am Testmotor, Temperatursensoren sind im Motor an Lagern und Windungen verbaut. Unten: Vergleich Messung mit PoC-Demonstrator (rot) mit Referenzsystem (grün) nach

Modifikationen am Eingangskanal für Vibrationsmessungen. PoC-Demonstrator und Referenzsystem zeigen gute Übereinstimmung.

Wesentliche Erkenntnisse:

- Koexistenz: Zustandsdaten des getesteten Elektromotors wurden über UWB und 4G-Netzwerk an den Server mit Datenbank übertragen.
- Vibrationszustandsüberwachung: Wir haben gezeigt, dass die UWB-Technologie zur robusten Übertragung von 10-kHz-Vibrationssensordaten (2 Kanäle) in Echtzeitanwendungen verwendet werden kann.
- Temperaturzustandsüberwachung: Wir haben gezeigt, dass UWB-Technologie zur robusten Übertragung von 1-kHz-Temperatursensordaten in Echtzeitanwendungen verwendet werden kann.
- Skalierbarkeit: Wir haben gezeigt, dass der UWB-Kanal skalierbar ist, um verschiedene Arten von Daten der verschiedenen Sensoren zu erfassen.
- Mit den Ergebnissen aus den Messungen aus Kap. 3.4.3 wurde gezeigt, dass ein robustes UWB-basiertes Sensornetz aufgebaut werden kann, um mehrere Motoren zu bedienen.
- Mit den Ergebnissen aus Kap. 3.5.3 wurde gezeigt, dass die Sensorknoten unter gewissen Umständen (mit einer Magnetfeld Harvestingmethode energieautark betrieben werden können).
- Die Messdaten helfen Probleme an Motoren festzustellen und bestehende und sich entwickelnde Energiefresser über anomales Vibrations- und Temperaturverhalten zu identifizieren und entsprechende Maßnahmen zu ergreifen.
- Mit denselben Sensorknoten lassen sich Sensornetze für EM und CM in Use Case 1 realisieren. Umgebung und Parameter für die Sensorik sind sehr ähnlich.

4.1.5 Untersuchung zur Verwendbarkeit von 2,4Ghz LoRa für Use Case 1 und 2 (pewag bzw. Spalt)

Da die Testumgebungen für Use Case 1 und 2 ähnlich waren, werden zwei Anwendungsfälle wie im UWB-Fall (s.o.) kombiniert. Beide Produktionshallenumgebungen waren mit Geräten und metallischen Gegenständen bestückt (siehe Abbildung 40). Die Knoten wurden mit wenigen Ausnahmen in NLoS-Positionen platziert, hauptsächlich auf dem Boden. Der AP wurde für den Anwendungsfall pewag auf dem Boden und für den Anwendungsfall Spalt auf einem Tisch platziert. Drei Standorte wurden gleichzeitig für eine einzelne SF- und BW-Konfiguration getestet.

Wir sammelten etwa vier- bis fünftausend Pakete von jedem Knoten und in jeder Konfiguration. Hier repräsentiert jeder Knoten einen eindeutigen Standort.

Die wichtigsten untersuchten Konfigurationen sind die Kombinationen der folgenden Parameter: SF={5, 10} und BW=1600 KHz. Von größerem Interesse war das Testen einer Konfiguration, die eine höhere Datenrate bietet. Der SF12 wurde nicht ausgewählt, da parallel zum PLR auch die Ranging-Leistung (hier nicht erwähnt) analysiert wurde. Für SFs über 10 ist keine Ranging verfügbar.

Abbildung 41 zeigt PLR für die Anwendungsfälle pewag und Spalt. Da pro Position nur ein Knoten platziert wurde, werden die Abweichungen nicht dargestellt. Nur an einer Position liegen zwei Messungen vor, und

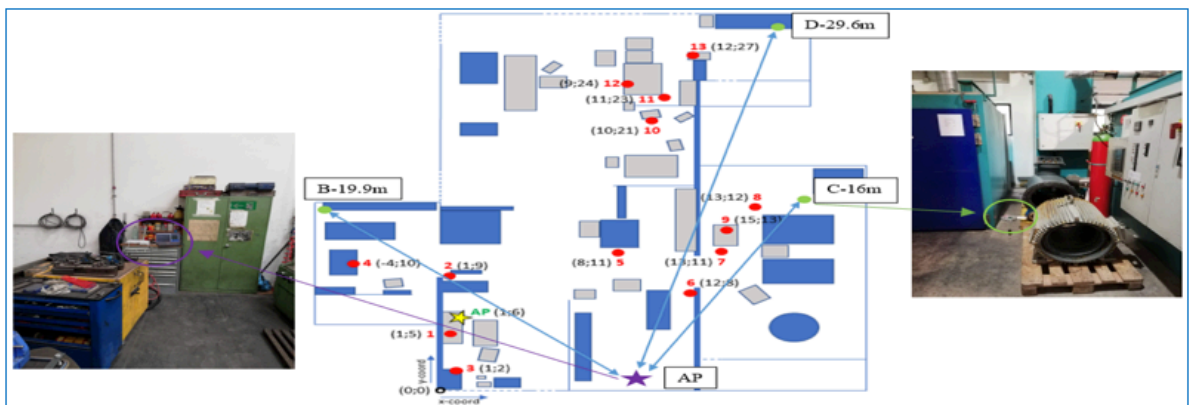
Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

zwar SF5BW1600 für eine Entfernung von 50 m im Anwendungsfall 2 (siehe Abbildung 40 a)) und für diesen Punkt wird der mittlere PLR angezeigt.



a)



b)

Abbildung 40: Testumgebungen für Messungen für a) Use Case 1 (pewag) und b) Use Case 2 (Spalt)

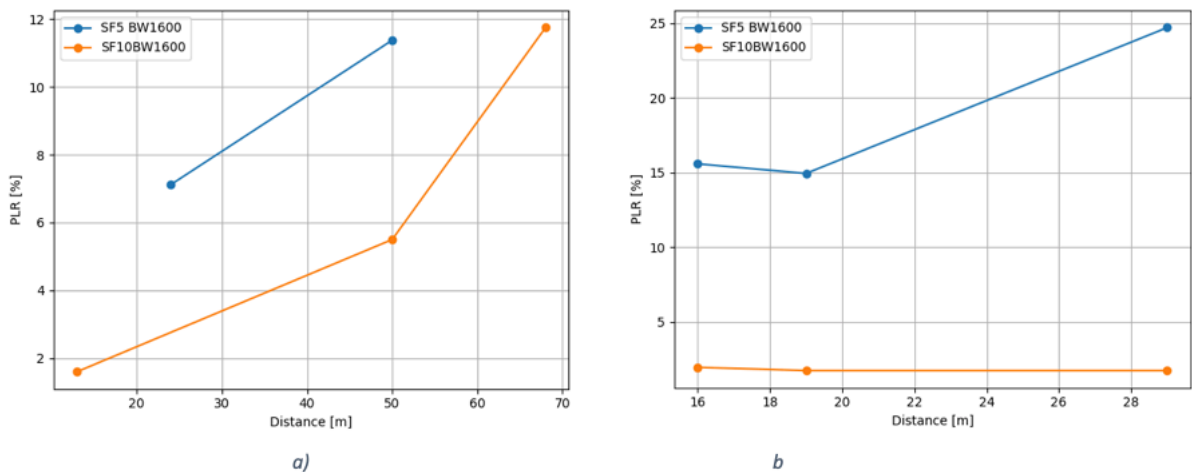


Abbildung 41: Paketverlustraten (PLR) für SF={5, 10} und BW=1600 KHz in a) Use Case 1 (pewag) und b) Use Case 2 (Spalt);

Ausnahme: a) SF5BW1600 Entfernung 50 m mittlerer PLR.

Die wichtigsten Erkenntnisse:

- Unterschiedliches Verhalten in verschiedenen Indoor-Szenarien: Das Verhalten in diesem Szenario unterscheidet sich von Büroräumen (Kap. 3.4.3) deutlich. Beide Szenarien enthalten Hindernisse, allerdings aus unterschiedlichen Materialien. Die Büroumgebung ist weniger rau, da sie größtenteils aus hohlen, nicht betonierten Wänden besteht. In den Use Case 1 und 2 hingegen sind metallische Hindernisse wie Maschinen und Betonwände vorhanden, die die Reflexionen verstärken.
- Bessere Leistung von SF10 und robuster in verschiedenen Umgebungen: SF10 zeigt im Vergleich zum niedrigeren SF eine viel bessere Leistung und einen langsameren Anstieg des PLR mit zunehmender Entfernung. Es zeigt eine konsistente Leistung in verschiedenen Szenarien, einschließlich Büro- und Innenumgebungen.
- Vergleichbare Leistung von SF10: Die Leistung von SF10 in diesem Szenario ist vergleichbar mit der im Büroszenario.
- Schlechte Leistung von SF5: Andererseits schneidet SF5 nicht so gut ab wie im Büroszenario.
- Geringerer SF-Gehalt reagiert empfindlicher auf die Umgebung: Die Leistung von niedrigerem SF-Gehalt, wie z. B. SF5, wird erheblich von der Umgebung beeinflusst, insbesondere in Szenarien mit vielen Geräten und metallischen Gegenständen.
- Größerer Einfluss auf niedrigere SF in Produktionshallen-Szenarien: Vergleicht man die Werte aus gleichen Entfernungen, haben die Produktionshallen-Szenarien einen größeren Einfluss auf die Leistung der unteren SF.
- Die Umgebung spielt eine entscheidende Rolle bei der Signalausbreitung: Das Vorhandensein von Geräten und metallischen Objekten in der Umgebung kann die Signalausbreitung erheblich beeinflussen, was unterstreicht, wie wichtig es ist, die Umgebung bei der Netzwerkplanung und -optimierung zu berücksichtigen.
- Der Anwendungsfall von Pewag hatte weniger Wände: Durch den offeneren Raum wären die Signale möglicherweise weniger behindert worden, was zu besseren Ergebnissen für SF5 geführt hätte. SF10 beginnt an Leistung zu verlieren, wenn die Entfernung über 50 m liegt.

Damit eignet sich 2,4GHz LoRa ebenfalls für den Aufbau von Sensornetzen in industrieller Umgebung, vor allem für moderatere Übertragungsraten als bei UWB oder zur Steuerung des Sensornetzes.

4.1.6 Use Case 3: Vibrationsmessungen bei eologix:

Mit dem in Abschnitt 3.6.5 gezeigten Testaufbau wurden Datenpakete von 6 Sensorknoten an einen AP gesendet. Wie angegeben, waren die Knoten an zwei Stellen und auf drei verschiedenen Ebenen etwa 35-40 Meter vom AP entfernt montiert. Mehr als 2300 und 9000 Pakete pro Knoten wurden im LoRa- bzw. UWB-Fall gesendet. Die Messergebnisse sind in Tabelle 3 und Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 3: LoRa: Übertragung der Steuerpakete

Node #	RSSI min,dBm	RSSI max,dBm	RSSI mean,dBm	Packets sent	Packets received	PLR,%
1	-107	-101	-105	2334	2285	2,09
2	-106	-100	-103	2334	2301	1.32
3	-109	-102	-106	2334	2276	2,48
4	-107	-100	-105	2334	2295	1.67
5	-110	-102	-107	2334	2203	5.61
6	-109	-102	-104	2334	2268	2.82

Tabelle 4: UWB: Übertragung der Datenpakete

Node #	RSSI min,dBm	RSSI max,dBm	RSSI mean,dBm	Packets sent	Packets received	PLR,%
1	-91	-82	-86	9083	8766	3.49
2	-94	-82	-87	9083	8801	3.1
3	-97	-86	-92	9083	8343	8.14
4	-92	-81	-86	9083	8769	3.45
5	-98	-88	-91	9083	8103	10.78
6	-100	-87	-92	9083	8206	9.65

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Koexistenz von LoRa und UWB gut funktioniert. Das UWB-Mesh-Netzwerk weist bei Entfernungen von 25 Metern und mehr eine bessere Paketverlustrate auf als ein herkömmliches Netzwerk. Auch wenn eine Mesh-Konfiguration den Gesamtdurchsatz reduziert und die Echtzeit-Datenerfassung unter diesen Bedingungen herausfordernd ist, bietet das vorgeschlagene Sensornetzdesign eine vielversprechende Lösung für Vibrationsmessungen in diesem speziellen Anwendungsfall. UWB kann für die Datenübertragung und LoRa für die Steuerung des Netzwerks verwendet werden. Die zu erwartenden Abstände zwischen den Knoten auf installierten Rotorblättern liegen in der Größenordnung der im Testaufbau verwendeten Abstände.

5 Ausblick und Empfehlungen

Die Untersuchungen im Projekt ConSens haben gezeigt, dass Sensornetze welche insbesondere auf LoRa und UWB oder deren Kombination basieren, in der Lage sind EM und CM in herausfordernden industriellen Umgebungen zu ermöglichen. Darüber hinaus ist in manchen Fällen ein energieautarker Betrieb der Sensorknoten möglich. Die UWB-Technologie ermöglicht sogar die robuste und energieeffiziente Versendung größeren Datenmengen von Sensoren mit höheren Scanraten (bis 20kHz und darüber hinaus). Dies ist vor allem dann von Vorteil, wenn, wie im Fall pewag (Use Case 1) und eologix (Use Case 3), in der zentralen Auswerte-Instanz die Sensorrohdaten notwendig sind und man sie vor ihrer Versendung nicht in den Sensorknoten reduzieren darf.

Mit anderen Worten, der ConSens-Ansatz ermöglicht Anwendungen von Sensornetzen im Bereich EM und CM, die von Standardsystemen derzeit nicht bedient werden können. Damit haben ConSens-basierte Sensornetze das Potential den energie- und ressourceneffizienten Betrieb von Produktions- und Energieerzeugungsanlagen weiter zu forcieren. Einfaches Energiemonitoring bei dem Strom- und Spannungswerte nur in etwa alle 15 sec oder seltener gemessen werden können zwar auch bedient werden, das machen aber heute auch schon kommerzielle Systeme. Die Stärke von ConSens liegt darüber hinaus darin, durch die hohe Auflösung der Daten auf Problemursachen für erhöhten Energieverbrauch oder anderen Problemen zu schließen und damit Gegenmaßnahmen bei

Energiefressern oder zur Vermeidung von Schäden gezielter einsetzen zu können, ob in Anlagen wie bei pewag oder eologix oder als späteres Produkt Add-On in Systemkomponenten wie großen Elektromotoren wie bei Spalt. Der modular aufgebaute Demonstrator ermöglicht die Kombination unterschiedlicher Sensoren mit verschiedenen CPUs und Drahtlosschnittstellen, die schnell auf neue Messsituationen angepasst werden können. Mit den Projektergebnissen kann in verschiedener Weise fortgefahren werden. Zunächst bietet sich die Umsetzung der ConSens-Komponenten als eine Art Sensornetztoolbox als Werkzeug für Dienstleister wie Messfeld im Bereich EM und CM an. Aber auch Endnutzer wie pewag könnten diese Systeme direkt, flexibel und bedarfsorientiert einsetzen. Dazu sind die Komponenten und deren Schnittstellen zur Marktreife weiterzuentwickeln, professionelle Benutzeroberflächen zu etablieren oder mit marktüblichen Lösungen zu kombinieren. Dazu gehört auch eine automatisierte Datenanalyse u.a. basierend auf KI-Algorithmen, die in ConSens nicht angestrebt war. Auch diese kann sich entweder auf Integration vorhandener marktüblicher Lösungen stützen oder in einem Nachfolgeprojekt gezielt für die Toolbox entwickelt werden.

Als weitere Option steht die Ausentwicklung von Speziallösungen für z.B. Spalt und eologix hin zu Prototypen. Wie oben erwähnt ist eine Option eine drahtlose CM-Lösung für die direkte Integration an oder in Elektromotoren oder als Retrofit-Variante als Produkt-Add On für die Spalt Technology zu entwickeln. eologix plant die Integration des in ConSens entwickelten Ansatzes in die F&E-Roadmap um die Erkenntnisse im Rahmen der nächsten Produktgeneration auch in einer Serienumgebung anzuwenden. Alle vorgenannten Aktivitäten lassen sich als anwendungsorientierte F&E-Projekte umsetzen und sind in der Diskussion.

Im Laufe des Projektes haben sich auch weitere wissenschaftliche Fragestellungen ergeben, die teilweise im vorangegangenen Text oder den wissenschaftlichen Publikationen, die aus ConSens hervorgegangen sind, diskutiert werden. Darunter ist z.B. die Erforschung effizienterer Routing Algorithmen für das Multi-Hop Scheduling als das verwendete geclusterte Dijkstra Routing oder optimalere Re-Transmissionstrategien für UWB, um die Methode noch robuster zu machen. Weitere Untersuchungen in einem Nachfolgeprojekt könnten auf die die Abhängigkeit der EM-Messungen vom Schweiß Programm, von der Maschine und von weiteren Einflüssen bei pewag dienen, um die Messergebnisse noch besser einordnen zu können.

6 Kontaktdaten

Koordinator: Dr. Andreas Kercek, Lakeside Labs GmbH, Lakeside B04b, 9020 Klagenfurt, Tel.: +43 463 2870 44-33, andreas.kercek@lakeside-labs.com, www.lakeside-labs.com

Weitere Projektpartner: CAMPUS 02 Fachhochschule der Wirtschaft GmbH, Messfeld GmbH Spalt Technology GmbH, eologix sensor technology gmbh, pewag austria GmbH, Alpen-Adria-Universität Klagenfurt, Institut für Vernetzte und Eingebettete Systeme