
**Untersuchung, Planung und Einsatz von LoRaWAN für IIoT
Anwendungen**

BACHELORARBEIT

für die Prüfung zum
BACHELOR OF SCIENCE

des Studiengangs Informationstechnik
der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Mannheim

von

Nick Kramer

Abgabe am 26. August 2022

Bearbeitungszeitraum:	07.06.2022 – 30.08.2022
Matrikelnummer, Kurs:	3122448, TINF19-IT2
Abteilung:	Digital Solutions
Ausbildungsbetrieb:	Syntegon Technology GmbH
Betreuer des Ausbildungsbetriebs:	Dipl.-Ing. (FH) Steffen Ziegler
Gutachter der Dualen Hochschule:	M.Sc. Mark Geiger

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich meine Bachelorarbeit mit dem

THEMA

Untersuchung, Planung und Einsatz von LoRaWAN für IIoT Anwendungen

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ich versichere zudem, dass die eingereichte elektronische Fassung mit der gedruckten Fassung übereinstimmt.*

* falls beide Fassungen gefordert sind

Crailsheim, den 26. August 2022

Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Funkprotokoll LoRaWAN, welches Datenpakete über weite Strecken übermitteln kann und dabei energieeffizient agiert. Ziel der Arbeit ist es, LoRaWAN anhand eines praktischen Einsatzes zu betrachten und zu beurteilen, welche IIoT-Anwendungen ermöglicht werden.

Die Anwendung der Technologie besteht darin, mehrere Endgeräte und ein Gateway an unterschiedlichen Standorten zu installieren und die daraus resultierenden Funkübertragungen zu protokollieren. Eine Auswertung der Ergebnisse findet unter verschiedenen Gesichtspunkten statt. Neben technischen Faktoren werden auch Umgebungsparameter berücksichtigt.

Von einem Gateway aus müssen die Daten an einen Server übermittelt werden. Zur Auswahl eines passenden Netzwerkservers sind Untersuchungen durchzuführen, welche mehrere Netzwerk-Architekturen und -Modelle gegenüberstellen. Dabei werden folgende Architekturen betrachtet:

- öffentliche LoRaWAN Netzwerke
- private LoRaWAN Netzwerke
- lokale LoRaWAN Netzwerke
- LoRaWAN ohne Netzwerkserver

Die erfassten Daten werden in einer Anwendung verarbeitet, gespeichert und dargestellt. Dafür steht ein Datenbanksystem bereit, welches die Daten aufnimmt. Eine grafische Oberfläche stellt die Informationen eines ausgewählten zeitlichen Rahmens übersichtlich dar.

Es werden mehrere Endgeräte genutzt, um Daten für das Netzwerk zu generieren. Die Mehrheit der Geräte sind durch Hersteller vorkonfiguriert. Daneben soll ein eigens konfiguriertes Endgerät auf Basis eines *Raspberry Pi 4* zum Einsatz kommen. Dieses hat die Aufgabe, Daten von Maschinen des betreuenden Unternehmens dieser Arbeit über LoRaWAN bereitzustellen.

Das Ergebnis ist eine vollständige Kommunikationskette von Endgeräten bis in eine Anwendung. Auf dem theoretischen Wissen und den praktischen Erfahrungen sollen weiterführende Projekte im industriellen Sektor aufbauen können.

Abstract

This thesis deals with the radio protocol LoRaWAN, which can transmit data packets over long distances and is energy-efficient. The aim of the work is to look at LoRaWAN based on a practical application and to assess which IIoT applications are made possible.

The application of the technology consists of installing several end devices plus a gateway at different locations and logging the resulting radio transmissions. An evaluation of the results takes place under various aspects. In addition to technical factors, environmental parameters are also taken into account.

From a gateway, the data must be transmitted to a server. In order to select a suitable network server, investigations must be carried out that compare several network architectures and models. The following architectures are considered:

- public LoRaWAN networks
- private LoRaWAN networks
- local LoRaWAN networks
- LoRaWAN without a network server

The collected data is processed, stored and displayed in an application. A database system is available for this purpose, which records the data. A graphical user interface clearly displays the information of a selected time frame.

Several end devices are used to generate data for the network. The majority of the devices are pre-configured by the manufacturer. In addition, a specially configured terminal device based on a *Raspberry Pi 4* will be used. This has the task of providing data from the machines of the company supervising this work via LoRaWAN.

The result is a complete communication chain from end devices to an application. Further projects in the industrial sector should be able to build on the theoretical knowledge and practical experience.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	X
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Problemraumdefinition	2
1.3. Ziel der Arbeit	3
1.4. Projektorganisation	5
1.5. Struktur der Arbeit	6
2. Theoretische Grundlagen	7
2.1. Stand der Technik	7
2.2. Internet der Dinge	9
2.2.1. Konnektivität	10
2.2.2. IIoT Anwendungen	12
2.3. LoRa	13
2.3.1. Regulation	13
2.3.2. Frequenzmodulation	14
2.3.3. Vorteile	19
2.3.4. Limitierungen	19
2.4. LoRaWAN	20
2.4.1. Versionen	22
2.4.2. Endgeräte (Nodes)	22
2.4.3. LoRaWAN Server	23
2.4.4. Geräteaktivierung und Sicherheit	25
2.4.5. Anpassung der Übertragungsparameter	27
3. Einsatz und Eignungsanalyse von LoRaWAN im industriellen Kontext	29
3.1. Definition	29
3.1.1. Anforderungsanalyse	29

Inhaltsverzeichnis

3.1.2. Machbarkeitsanalyse	32
3.1.3. Zielstellung	35
3.2. Netzwerkplanung	35
3.2.1. Hardware	35
3.2.2. Standortanalyse	37
3.3. Netzwerkserver	38
3.3.1. Konzeptauswahl	38
3.3.2. Lösungsauswahl	45
3.4. Netzwerkinstallation und Tests	47
3.4.1. Outdoor-Versuchsaufbau	48
3.4.2. Indoor-Versuchsaufbau	56
3.4.3. Übertragung von Maschineninformationen	61
3.5. Entwicklung einer LoRaWAN-Anwendung	64
3.5.1. Datenverarbeitung	65
3.5.2. Grafische Darstellung	66
4. Ergebnis und Ausblick	68
Literaturverzeichnis	70

Abbildungsverzeichnis

1.1.	Roadmap zum Projektstart	5
2.1.	Einordnung von LoRa in bestehende Kommunikationstechnologien	8
2.2.	Kommunikationskette Internet of Things (IoT)	10
2.3.	OPC Unified Architecture (OPC UA) Konnektivitätsmodelle	11
2.4.	Direct Sequence Spread Spectrum	15
2.5.	Kenngrößen einer Funkübertragung	16
2.6.	LoRaWAN Architektur	21
2.7.	LoRaWAN Versionsverlauf	22
2.8.	LoRaWAN Server	24
3.1.	Versuchsaufbau Prototyp	33
3.2.	LoRaWAN-Sensordaten im <i>Node-Red</i> Dashboard	34
3.3.	Öffentliches LoRaWAN-Netzwerk	39
3.4.	Privates LoRaWAN-Netzwerk	41
3.5.	Lokales LoRaWAN-Netzwerk	42
3.6.	Kein LoRaWAN-Netzwerkserver	43
3.7.	Nutzerbasierter Reichweitentest mit Gateway im Außenbereich	49
3.8.	Installiertes Gateway mit Antenne im Außenbereich	50
3.9.	Standorte für den Versuchsaufbau im Außenbereich	51
3.10.	Outdoor Versuchsaufbau: Übermittelte Pakete der Nodes im Vergleich	52
3.11.	Outdoor Versuchsaufbau: Packet Delivery Rate (PDR) in Abhängigkeit des genutzten Spreading Factor (SF)	53
3.12.	Outdoor Versuchsaufbau: Verlauf des genutzten Spreading Factor (SF) am Beispiel von Node 3	54
3.13.	Outdoor Versuchsaufbau: SNR und RSSI der Nodes	55
3.14.	Outdoor Versuchsaufbau: Uplinks in Abhängigkeit von der Temperatur am Beispiel von Node 3	56
3.15.	Installiertes Gateway mit Antenne im Innenbereich	57
3.16.	Standorte für den Versuchsaufbau im Innenbereich	58
3.17.	Indoor Versuchsaufbau: Übermittelte Pakete der Nodes im Vergleich (inklusive Optimalwert)	59
3.18.	Indoor Versuchsaufbau: Paketankunftsralten der Nodes mit SF7	60

Abbildungsverzeichnis

3.19. Architektur für das Senden von Maschineninformationen über LoRaWAN	61
3.20. Uplinks einer Node im geschlossenen Schaltschrank und mit großer Entfernung zum Gateway im Vergleich zum Optimalwert	63
3.21. Architektur für das Übermitteln von Maschineninformationen über ein Edge-Device	64
3.22. Architektur der LoRaWAN-Anwendung	65
3.23. Darstellung der Daten einer <i>Dragino LHT65</i> Node in <i>Grafana</i>	67
A.1. Projekt-Abhängigkeitsgraph (Teil 1)	I
A.2. Projekt-Abhängigkeitsgraph (Teil 2)	II
C.1. Detailaufnahme Firmengelände	IV
C.2. Einordnung Firmengelände in Umgebung	V
C.3. Topologische Einordnung	VI
D.1. Standorte für einen erweiterten Versuchsaufbau im Innenbereich	VII

Tabellenverzeichnis

2.1. LoRa Spreizfaktoren in Europa	17
2.2. Minimal notwendige LoRa-Empfangsqualitäten	18
3.1. Anforderungsdefinition	30
3.2. Übersicht Hardware	36
3.3. LoRaWAN Netzwerkserver (LNS) Konzeptauswahl	45
3.4. Outdoor-Versuchsaufbau: Anzahl an Uplinks je Spreading Factor (SF) (erfolgreiche Uplinks/erwartete Anzahl Uplinks)	54
3.5. Indoor Versuchsaufbau: Anzahl an Uplinks je Spreading Factor (SF) (erfolgreiche Uplinks/erwartete Anzahl Uplinks)	60
B.1. Übersicht Software	III

Abkürzungsverzeichnis

ABP Activation by Personalization

ADR Adaptive Data Rate

AWS Amazon Web Services

CSS Chirp Spread Spectrum

DSSS Direct Sequence Spread Spectrum

HAT Hardware Attached on Top

IIoT Industrial Internet of Things

IoT Internet of Things

LNS LoRaWAN Netzwerkserver

LPWAN Low-Power, Wide-Area Network

OPC UA OPC Unified Architecture

OTAA Over-the-Air Activation

PDR Packet Delivery Rate

RPi Raspberry Pi

RSSI Relative Signal Strength Indication

SaaS Software-as-a-Service

SF Spreading Factor

SPS Speicherprogrammierbare Steuerung

TTI The Things Industries

TTN The Things Network

TTS The Things Stack

1. Einleitung

Dieses einleitende Kapitel stellt das Problem und den Rahmen der Arbeit dar. Neben einer Motivation wird eine Übersicht aller Kapitel dieser Arbeit gegeben.

1.1. Motivation

„And just like any company that blissfully ignored the Internet at the turn of the century, the ones that dismiss the Internet of Things risk getting left behind.“ [New15]
- Jared Newman, Tech Journalist

Mit dem „Internet of Things“ bezieht sich Newman auf einen vollziehenden Wandel, der sich auf immer mehr Bereiche ausdehnt. Durch Smartwatches, Luft- oder Lichtsensoren können Handlungen protokolliert und ausgewertet werden. Im Falle eines Luftsensors in einem Büro können die Personen im Raum gewarnt werden, wenn die Sauerstoffsättigung abfällt oder eine zu hohe Temperatur erreicht ist. Es sind genügend Use-Cases vorhanden, um die Dinge des alltäglichen Lebens zu erleichtern oder ein besseres Leben und Arbeiten zu ermöglichen.

Das Anwendungsfeld erstreckt sich nicht ausschließlich über den privaten Raum. Digitale Lösungen für industrielle Anwendungen sind ein weiterer Teil, welcher stetig an Bedeutung gewinnt. Auch „konservative“ Branchen wie der Maschinenbau oder das Handwerk entwickeln digitale Lösungen, um eigene Prozesse zu verbessern und Kunden bessere Lösungen bieten zu können.

LoRaWAN ist eine Technologie, die im Bereich des Internet der Dinge eingesetzt wird. Damit sollen Sensoren energieeffizient und über lange Strecken hinweg an ein

1.2. Problemraumdefinition

Netzwerk angebunden werden. Erste Aktoren setzen LoRaWAN im Bereich Smart City oder Smart Agriculture ein. Das Ziel dieser Arbeit ist es, den Einsatz der Technologie in der Industrie zu betrachten und dabei erlangte Erfahrungen zu teilen.

1.2. Problemraumdefinition

Um die Aufgabe abgrenzen und einen Zeitplan einhalten zu können, wurden im Vorfeld Überlegungen zum Umfang des Problemraums getroffen. Der Problemraum wird nach den Vorgaben von Rollett aufgebaut [Rol08]. Dabei ist er durch einen Anfangszustand, mögliche Zwischenzustände und einen Endzustand definiert.

Als Anfangszustand liegt ein Greenfield-Ansatz vor. Es soll keine Arbeit fortgeführt werden. Als Folge daraus bestehen keine experimentellen Aufbauten, Geräte oder Ergebnisse vorangegangener Arbeiten. Alle Hardware und Versuchsaufbauten sind im Laufe der Arbeit auszuwählen bzw. aufzubauen.

Zwischenzustände werden dadurch erreicht, dass Bearbeitungspunkte erledigt werden. Darunter ist die Untersuchung, Planung und der Einsatz von LoRaWAN zu verstehen, womit über den Standort eines Werksgeländes verteilte Sensoren verbunden und deren Daten zur Verfügung gestellt werden sollen. Erlangte Daten sollen persistiert und übersichtlich dargestellt werden. Die Erfahrungen des praktischen Einsatzes sollen die Grundlage für ein Fazit zu LoRaWAN im betrachteten Kontext bilden.

Der Zielzustand ist dann erreicht, wenn der Einsatz der Technologie LoRaWAN für Industrial Internet of Things (IIoT)-Anwendungen umfassend erörtert wurde. Dabei ist zu beurteilen, welche Anwendungen durch LoRaWAN ermöglicht werden und worin die Grenzen der Technologie liegen.

Insgesamt können zwei Problembereiche abgeleitet werden, die theoretische Betrachtung und die praktische Anwendung. Es soll kein spezifischer Use-Case umgesetzt werden, vielmehr stützt die Anwendung die Technologiebetrachtung, indem die komplette Kommunikationskette dargestellt wird und die Technologie somit „verbildlicht“. Eine Zielstellung für die praktische Ausarbeitung wird dennoch spezifiziert, um eine Betrachtung aller Gesichtspunkte von LoRaWAN sicherzustellen.

1.3. Ziel der Arbeit

Das betreuende Unternehmen zeichnet sich durch den Spezialmaschinenbau von Verpackungsanlagen im Food- und Pharma-Bereich aus. Aus diesem Grund wird IIoT besonders im Bereich des Maschinenbaus betrachtet.

1.3. Ziel der Arbeit

Die Problemraumdefinition in 1.2 stellt das zentrale Ziel dar. Es besteht darin, LoRaWAN zu betrachten und die Anwendung im vorliegenden Fall zu beurteilen. Um die Beurteilung vollziehen zu können, soll ein Projekt durchgeführt werden. Dieses muss es ermöglichen, alle Komponenten eines LoRaWAN-Netzwerks zu verstehen. Außerdem sollen entstehende Versuchsaufbauten und daraus generierte Daten dazu genutzt werden, eigene technische Untersuchungen anzustellen.

Die Projektdurchführung gliedert sich in fünf Abschnitte. Der Fokus liegt auf der technischen Auswertung verschiedener Versuchsaufbauten, um LoRaWAN fundiert beurteilen zu können. Die Messwerte der Sensoren werden gespeichert und dargestellt, besitzen jedoch im Rahmen dieser Arbeit maximal eine unterstützende Rolle.

Punkt 1: Definition

Die in der Problemraumbeschreibung definierten Funktionen werden in Anforderungsdefinitionen spezifiziert.

- 1) Anforderungsdefinitionen werden verfasst.
- 2) Eine Machbarkeitsanalyse wird durchgeführt.
- 3) Die Zielstellung für die praktische Lösung wird definiert.

Punkt 2: Netzwerkplanung

Der Aufbau des Netzwerks wird durch die Auswahl und Beschaffung von Hardware vorbereitet. Durch eine Standortanalyse wird diese Vorbereitung vervollständigt.

1.3. Ziel der Arbeit

- 1) Ausgewählte Hardware wird beschafft.
- 2) Eine Standortanalyse wird durchgeführt.

Punkt 3: Netzwerkserver

Alle Möglichkeiten, einen Netzwerkserver zu betreiben, werden betrachtet. Ein Netzwerkserver wird für den Betrieb eingerichtet.

- 1) Ein Vergleich verschiedener Netzwerkserver-Konzepte findet statt.
- 2) Auf Basis des Konzepts wird eine spezifische Netzwerkserver-Lösung ausgewählt.
- 3) Der ausgewählte Netzwerkserver wird eingerichtet/installiert.

Punkt 4: Netzwerkinstallation und Tests

Die Netzwerkkomponenten werden in Versuchen installiert. Die generierten Daten liefern die Grundlage für technische Auswertungen.

- 1) Versuchsaufbauten stellen Reichweiten und Limitierungen von LoRaWAN in der vorliegenden Umgebung dar.
- 2) Eine Maschine wird mittels eines Raspberry Pi an das LoRaWAN-Netzwerk angebunden.

Punkt 5: Verarbeitung von Sensordaten

Generierte Daten werden im Rahmen einer Datenverarbeitung dekodiert, in einer Datenbank gesichert und geeignet dargestellt.

- 1) Eine Anwendung wird erstellt, welche das Dekodieren und Speichern der Daten ermöglicht.
- 2) Auf Basis der in einer Datenbank gespeicherten Daten wird eine grafische Übersicht erstellt.

1.4. Projektorganisation

1.4. Projektorganisation

Eine strukturierte Bearbeitung der Problemstellung wird durch Methoden des Projektmanagement ermöglicht. Zeitliche Übersichten und offene Aufgabenstellungen müssen jederzeit von Projektbeteiligten eingesehen werden können. Um dies zu erreichen, wird sich an agilen Methoden aus dem Bereich der Softwareentwicklung bedient. Nach Beck et al. gelten grundlegende Leitlinien [Bec+01]. Für den Einsatz in diesem Rahmen werden folgende Leitlinien übernommen:

- Individuen und Interaktionen sind wichtiger als Prozesse und Werkzeuge
- Reagieren auf Veränderungen ist wichtiger als das Befolgen eines Plans

Der Fokus wird darauf gelegt, flexibel und miteinander zu arbeiten. Besonders abteilungsübergreifende Kommunikation muss auf Grund der Art der Tätigkeit sichergestellt sein.

Die Aufgabenverwaltung findet auf Atlassians Plattform *Jira Software*¹ statt. Aufgabenblöcke werden durch Sprints zu Zeiträumen zugeordnet. Es ist eine Fortschrittsanzeige erkennbar. Als Folge dessen kann ein enger Zeitplan eingehalten werden. Abbildung 1.1 stellt einen Überblick des initial festgelegten zeitlichen Rahmens zur Verfügung. Der dargestellte Zeitraum entspricht der Bearbeitungszeit dieser Arbeit.

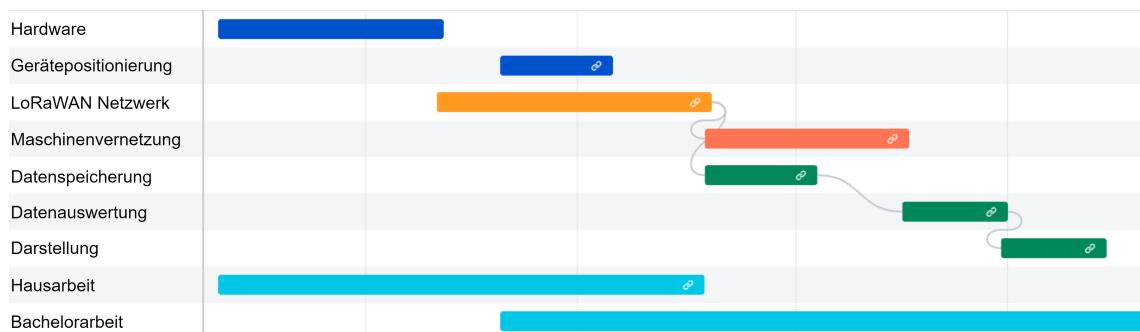


Abbildung 1.1.: Roadmap zum Projektstart

¹weitere Informationen: <https://www.atlassian.com/de/software/jira>

1.5. Struktur der Arbeit

Im Projekt treten Software-Entwicklungstätigkeiten auf. Diese Software wird unternehmensintern gespeichert, eine Versionsverwaltung wird mittels Git² erreicht.

1.5. Struktur der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in insgesamt fünf Kapitel. Eine Einleitung und Hinführung zum Thema in Kapitel 1 setzt den Rahmen für das Projekt. Anschließend werden in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen des Projektes gelegt. Die Umsetzung und Bearbeitung der Problemstellung folgt in Kapitel 3. Schließlich folgt in Kapitel 4 eine Zusammenfassung der Ergebnisse sowie ein Fazit bezüglich der Anwendung von LoRaWAN in IIoT-Anwendungen.

²weitere Informationen: <https://git-scm.com/>

2. Theoretische Grundlagen

Das Kapitel legt die Grundlage für die Ausarbeitung. Es beschäftigt sich mit dem aktuellen Stand der Technik bezüglich Funktechnologien für das Internet of Things (IoT), wobei LoRa und LoRaWAN ausführlich aufbereitet werden.

2.1. Stand der Technik

Im Bereich der Funknetze für IoT-Anwendungen existiert ein breites Spektrum an verwendbaren Lösungen. Laut Linnemann et al. befinden sich Funktechnologien in einem Spannungsdreieck aus Energienutzung, Reichweite und Datenrate [LSL19]. Unterschiedliche Gewichtungen in diesem Dreieck definieren individuelle Vor- und Nachteile. Daraus resultieren unterschiedliche Einsatzgebiete und Anwendungsfälle.

In lokalen Netzwerken (LAN) können Geräte über kurze Distanzen vernetzt werden. Vertreter dieser Gruppe sind WiFi, Bluetooth und ZigBee. Dabei handelt es sich um weit verbreitete und etablierte Standards.

Mobilfunk legt den Fokus auf große Übertragungsstrecken mit hohen Datenraten. Einschränkungen bestehen dahingehend, dass Mobilfunk mit hohen Kosten verbunden ist und eine Abhängigkeit zu einem Mobilfunkanbieter besteht. Beispiele von Standards aus diesem Bereich sind 3G und 4G.

LAN und Mobilfunk haben den Nachteil, dass Geräte einen hohen Energieverbrauch aufweisen. Batteriebetriebene Geräte entladen sich daher schnell.

Low-Power, Wide-Area Networks (LPWANs) sind Funknetze, die sich durch einen geringen Energieverbrauch, kleine Datenmengen und eine Datenübertragung auf

2.1. Stand der Technik

große Entfernungen auszeichnen. Diese Eigenschaften lassen LPWAN zwischen lokale Übertragungstechnologien und den Mobilfunk einordnen. Abbildung 2.1 stellt unterschiedliche Standards aus den drei Bereichen gegenüber. Als Vergleichskriterien werden die Bandbreite (y-Achse) und die Reichweite (x-Achse) herangezogen.

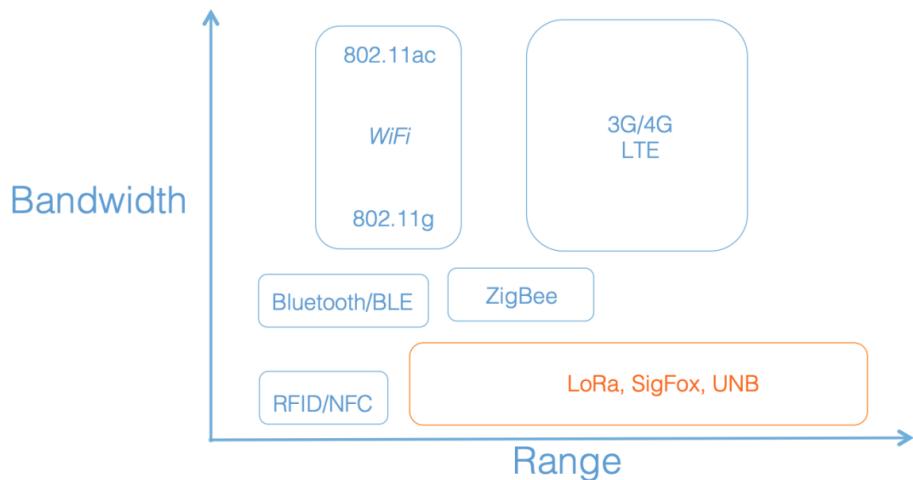


Abbildung 2.1.: Einordnung von LoRa in bestehende Kommunikationstechnologien [DD20, p. 4]

Es existieren mehrere LPWAN Standards. Die bekanntesten Vertreter lauten LoRa, Sigfox und NB-IoT. Jeder Standard hat als Ziel, Dinge bei geringem Energieverbrauch und großer Reichweite zu vernetzen.

Wie Telekom und Popli et al. beschreiben, basiert NB-IoT auf der LTE-Technologie, folgt den Anforderungen des 3GPP-Standard und wird im lizenzierten Spektrum betrieben. Mobilfunkanbieter können NB-IoT in ihre bestehende Infrastruktur integrieren, weshalb gute Zuverlässigkeit und Abdeckung gegeben ist. Eigene Infrastruktur bei nicht ausreichender Abdeckung kann auf Grund der Abhängigkeit vom Mobilfunkanbieter nicht installiert werden. Jedes Endgerät benötigt eine eSIM oder SIM-Karte. Die Übertragungskanäle sind jeweils 180 kHz breit und es werden Datenraten bis zu 150 kbps erreicht [Mag; PJJ19].

Sigfox ist für Funkübertragungen mit sehr geringen Datenmengen ausgelegt. Durch die Bandbreiten von 100 Hz und 600 Hz ist eine maximale Übertragungsrate von 600 bps möglich. Die Übertragungsrate ist regionsabhängig. Sigfox agiert im lizenzenfreien

2.2. Internet der Dinge

Frequenzspektrum unter einem Gigahertz. Die Nutzung eines Sigfox-Netzwerks ist an einen Netzwerkbetreiber und Kosten gebunden. Diese sind abhängig von der Anzahl zu verbindernder Geräte und der täglichen Nachrichtenanzahl. Je mehr Geräte und Nachrichten, desto teurer wird das Abonnement [Sig; LPP19]. Coman et al. stellen fest, dass Sigfox nicht für kritische Applikationen genutzt werden sollte, da ein Schutz vor Replay Angriffen fehlt [Com+19]. Dabei handelt es sich um das wiederholte Senden fremder Funkübertragungen, was zu einem Denial of Service führt.

Mioty stellt eine weitere Entwicklung im Bereich LPWAN dar. Es leitet sich von „My IoT“ ab und wurde vom Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen (IIS) entwickelt. Technisch befindet sich Mioty nah an LoRa. Beide arbeiten im gleichen Frequenzraum und nutzen Frequenzspreizverfahren. Derzeit ist noch wenig Hardware vorhanden und Interessenten benötigen eine Lizenz zur Nutzung von Mioty. Das initiale Aufsetzen eines Netzwerks ist daher mit hohem Aufwand und Kosten verbunden [mio; Fra].

2.2. Internet der Dinge

Für das IoT existiert keine eindeutige Definition. Im Kern werden Dinge (Things) aus der realen Welt mittels Sensoren digital abgebildet. Laut Weber hat das IoT den Zweck, eine IT-Infrastruktur bereitzustellen, die den Austausch von „Dingen“ auf sichere und zuverlässige Art ermöglicht. D.h. es soll die Lücke zwischen den Objekten in der physischen Welt und ihrer Darstellung in Informationssystemen überwunden werden [WW10].

Das Ökosystem von IoT umfasst die Datenerfassung mittels Sensoren und die Weiterleitung dieser in das Internet, wo sie verarbeitet, gespeichert und dargestellt werden. Die Standard-Kommunikationskette lässt sich durch vier Schritte beschreiben, dargestellt in Abbildung 2.2.

Das IIoT bezieht sich auf die Anwendung der IoT-Technologie in industriellen Umgebungen. Insbesondere in Bezug auf die Instrumentierung und Steuerung von Sensoren sowie auf Geräte, die Cloud Technologien einsetzen. Das IIoT befasst sich

2.2. Internet der Dinge



Abbildung 2.2.: Kommunikationskette IoT [OAA21]

nicht mit der Einzelperson als Endnutzer und grenzt sich damit vom IoT ab. Beide basieren auf den gleichen Technologien, weshalb das Industrial Internet of Things als Teilmenge des IoT verstanden wird.

Laut Riemann profitieren Unternehmen stark von dem durch IIoT geschaffenen geschäftlichen Nutzen. Um Beispiele zu nennen ließen sich Geschäftsprozesse durch datengestützte Einblicke besser verwalten oder neue Geschäftsmodelle und Einnahmequellen würden geschaffen¹.

2.2.1. Konnektivität

Um die generierten Daten von den Geräten und Sensoren an eine zentrale Instanz übermitteln zu können, werden standardisierte Transportmethoden benötigt. Jene sind in Form von Protokollen definiert. Diese Arbeit behandelt ausschließlich die Datenübermittlung von Endgeräten zu einem Gateway über LoRa. Da Maschinen standardmäßig keine LoRa-Schnittstelle besitzen, muss ein weiteres Protokoll genutzt werden, um Daten von einer Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) zu beziehen und anschließend über LoRa zu übermitteln.

Die SPS ist primär für die Steuerung einer Maschine verantwortlich und besitzt Variablen, welche den Zustand beschreiben und ausgelesen werden können. Eine Methode, diese zu übermitteln, ist OPC Unified Architecture (OPC UA). Laut Hoppe handelt es

¹Entnommen aus der Vorlesung von Ute Riemann: „Internet of Things: Grundlagen: Sommersemester 2022“

2.2. Internet der Dinge

sich dabei um einen Schnittstellenstandard, welcher unabhängig vom Hersteller einer Anwendung, der benutzten Programmiersprache, der Hardware und dem verwendeten Betriebssystem ist [HS19]. Eine Maschine wird inhaltlich modelliert, Attribute und zugehörige Werte sind abgebildet. Ein OPC UA-Server enthält alle Daten, ein OPC UA-Client greift auf die Daten im Server zu und kann sie weiter verarbeiten. So kann ein Gerät als OPC UA-Client agieren, welcher alle oder bestimmte SPS-Daten vom OPC UA-Server bezieht. Dabei gibt es mehrere Möglichkeiten, diese Kommunikation einzurichten. Auf der einen Seite kann ein Publisher-Subscriber-Modell eingesetzt werden, welches ausschließlich bei Statusänderung einer Variable ein Update sendet. Ein Client abonniert für ihn interessante Werte und bekommt diese bei veränderten Werten automatisch übermittelt. Andererseits kann der Datenaustausch auf Basis eines Client-Server-Modells stattfinden. Hierbei werden Informationsanfragen vom Client verarbeitet und vom Server beantwortet. Für die beiden Möglichkeiten, schematisch dargestellt in Abbildung 2.3, werden jeweils typische Vertreter als Beispiele genannt.

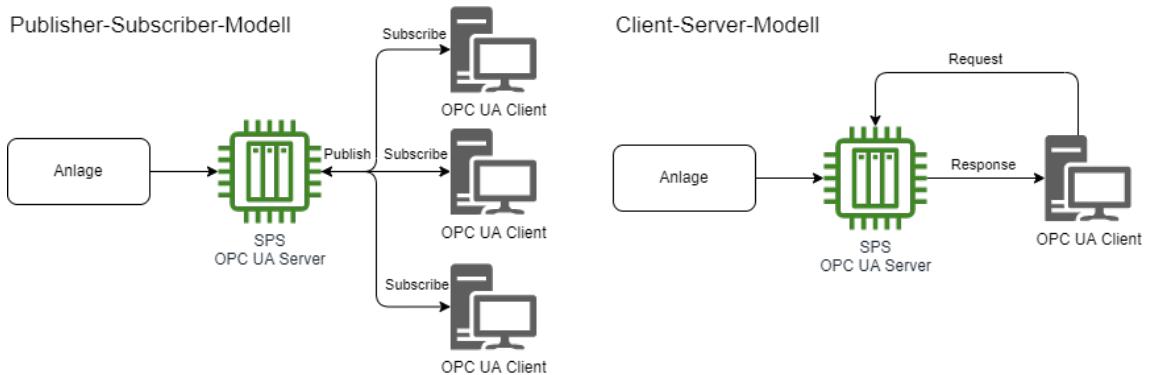


Abbildung 2.3.: OPC UA Konnektivitätsmodelle

Publisher-Subscriber-Modell:

- MQTT
- RSS

Client-Server-Modell:

- HTTPS
- SMTP

2.2.2. IIoT Anwendungen

Das IoT findet in verschiedensten gewerblichen Anwendungen Nutzen. Einige typische Vertreter lauten [GR18; WS16]:

- **Smart Industry:** Das digitale Abbilden von Maschinen (Maschinensteuerung, externe Sensoren, ...) generiert Daten, die im Nachgang analysiert werden können. Condition Monitoring stellt eine gefragte Anwendung dar und ermöglicht weiterführend Predictive Maintenance². Ein zweites Beispiel für Use Cases in diesem Gebiet ist die intelligente Überwachung der Produktion (z.B. Berechnung von Effizienzkennzahlen in Echtzeit).
- **Smart City:** In einer vernetzten Stadt werden Umgebungswerte wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und CO₂ protokolliert, um Einblicke in die Entwicklung der Lebensqualität in der Stadt zu erhalten. Weitere Anwendungen sind die automatisierte Steuerung von Laternen durch Lichtsensoren und das Messen der Füllstände von Müllbehältern.
- **Smart Agriculture:** Landwirte können auf digitale Lösungen zurückgreifen, um Umgebungsbedingungen besser einschätzen zu können. Durch die Auswertung der protokollierten Bodenqualität können zielgerichtete Maßnahmen zur Regenerierung des Bodens getroffen werden. Weiterhin ist eine nachhaltige Wassernutzung durch die Überwachung von Füllständen und Übertragungswegen möglich.
- **Smart Logistics:** Die Überwachung von Lieferketten ermöglicht eine Verfolgung von Sendungen in Echtzeit. Auch Kühlketten können durch Sensorik überwacht werden. So werden Lieferungen transparent abgebildet und Fehler erkannt.

²Entnommen aus der Hausarbeit von Nick Kramer vom 30.03.2022: „Predictive Maintenance in der Produktion“

2.3. LoRa

LoRa ist eine Modulationstechnologie für LPWAN. Sie arbeitet auf dem physischen Layer. Die Übertragung von Daten findet nicht kabelgebunden, sondern über die Luft (Funkwellen) statt. Der Frequenzbereich zur Funkübertragung befindet sich um 868 MHz und liegt damit im lizenzenfreien Spektrum. LoRa ist proprietär, kann also nicht frei angepasst werden. Entwickelt wird die Technologie durch die Semtech Corporation, welche in Ihrer Dokumentation auf die technischen Spezifikationen eingehen [Sem19a].

2.3.1. Regulation

Zum Zeitpunkt der Ausarbeitung gibt die EU mit ihren Standards ETSI EN 300 220-1 (technische Charakteristiken und Messmethoden) [ETSA] und ETSI EN 300 220-2 (Liste von Frequenzbändern mit Entscheidungen des europäischen Komitee) [ETSb] einen Rahmen für die Nutzung von Short Range Devices im Frequenzbereich um 868 MHz vor. Geräte, welche über LoRa kommunizieren, lassen sich in die Kategorie der Short Range Devices zuordnen.

Europäische Standards sind durch den Gesetzgeber umzusetzen. Die Bundesnetzagentur, welche u.a. für die Regulierung von Funkverbindungen verantwortlich ist, bestimmt die deutschen Frequenznutzungsbestimmungen. Aus diesem Grund ist die Bundesnetzagentur für die Umsetzung der Standards verantwortlich. In einer Allgemeinzuteilung von Frequenzen für Short Range Devices [Bun18] ist die Umsetzung zu finden. Die im Dokument angegebenen Frequenzen werden „[...] zur Nutzung durch die Allgemeinheit für Funkanwendungen (Geräte) geringer Reichweite zugeteilt“ [Bun18, p. 1]. Da sich die Frequenzbereiche von LoRa im für die Nutzung durch die Allgemeinheit freigegebenen Raum befinden, muss keine Funklizenz erworben werden. Dabei sind die Parameter, wie beispielsweise ein vorgegebener Arbeitszyklus (Duty-Cycle), einzuhalten.

2.3.2. Frequenzmodulation

Die LoRa-Modulation wurde vom bereits bestehenden Chirp Spread Spectrum (CSS) abgeleitet. Das CSS wurde für Radarapplikationen in den 1940er Jahren entwickelt und wird besonders im militärischen Bereich sowie in der Raumfahrt verwendet. Gründe dafür sind die Eigenschaften, weite Kommunikationsstrecken überbrücken zu können, dabei wenig Sendeenergie zu benötigen und wenige Interferenzen zu verursachen [Sen19].

LoRa arbeitet in Kanälen mit festgelegter Bandbreite. Die Bandbreiten unterscheiden sich abhängig von der Region. In Europa finden Uplinks (Übertragung vom Endgerät zum Gateway) und Downlinks (Übertragung vom Gateway zum Endgerät) ausschließlich in Kanälen mit 125 kHz oder 250 kHz Bandbreite statt. Eine Aufstellung, wann welche Bandbreite genutzt werden darf, ist in Tabelle 2.1 zu finden.

Semtech beschreibt LoRa als eine Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) Alternative [Sem19a]. In traditionellen DSSS Systemen findet eine Verbreiterung der Bandbreite um einen Spreizfaktor statt (siehe Abbildung 2.4). Das Ausgangssignal wird mit einem vordefinierten Bit-Muster mit einer viel höheren Rate (spreading code) multipliziert. Es entsteht ein Signal, welches statt der Ausgangssymbole viele wechselnde Pegel (Chips) beinhaltet. In anderen Worten ist das entstehende Signal „schneller“ als das Ausgangssignal, da es mit einem Bit-Muster multipliziert wird, welches eine höhere Rate aufweist. Dies hat zur Folge, dass die Signal-Bandbreite in Bezug auf das Ausgangssignal verbreitert wird. Ein enges Band (narrowband waveform) wird in ein breites Spektrum (spread waveform) überführt.

2.3. LoRa

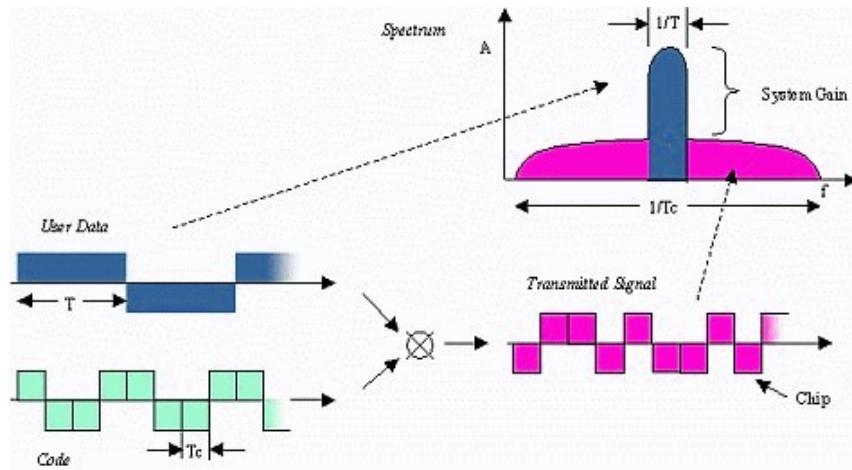


Abbildung 2.4.: Direct Sequence Spread Spectrum³

Die Multiplikation der Code-Sequenzen ist notwendig, um ein höheres Link-Budget (Streckenbilanz) zu erhalten. Laut Oberschmidt können Kanäle durch schmalbandige Störungen (z.B. Fading, Signale) betroffen sein. Ein eingehendes Signal würde so stark gestört werden, dass keine Übertragung stattfinden kann. Wird ein Signal gespreizt, teilt es sich über einen größeren Frequenzbereich auf. Der Empfänger rekonstruiert das Signal durch ein Entspreizen. Der Gewinn G entspricht der Aufspreizung des Senders (Spreizfaktor) und ist in der Formel 2.1 dargestellt [Obe19].

$$G \approx \frac{B_c}{B_m} = \frac{R_{ch}}{R_s} \quad (2.1)$$

Dabei entsprechen B_c und B_m den Bandbreiten des gespreizten und ungespreizten Kanals. R_{ch} und R_s bilden die Raten der Chips und des Signals ab. Durch den Gewinn ist eine Übertragung über längere Strecken möglich.

Für das Link-Budget ist die Bilanz der Übertragungskette zu bilden. Es sind alle Gewinne und Verluste einzubeziehen, welche in der Übertragung auftreten. Formel 2.2 stellt eine Übertragungsbilanz dar, welche für theoretische Betrachtungen geeignet ist. Dies ist durch die Annahme begründet, dass eine isotrope Abstrahlung und allseitige Ausbreitung der Funkwellen stattfindet [NR15].

³Bildquelle: <https://telecomabc.com/d/dsss.html>

2.3. LoRa

$$\text{RSSI} = P_r = P_t + G_t + G_r - PL - A \quad (2.2)$$

Mit

- RSSI - Relative Signal Strength Indication (RSSI) [dBm]
- P_r - Empfangsleistung Eingang Empfänger [dBm]
- P_t - Sendeleistung Ausgang Sender [dBm]
- G_t - Antennengewinn Senderantenne [dBi]
- G_r - Antennengewinn Empfängerantenne [dBi]
- PL - Freiraumdämpfung [dB]
- A - Verlust durch Verbindungen und Kabel [dB]

Mit Hilfe der Kennzahl RSSI und der Empfängersensibilität (minimal notwendige Signalstärke der empfangenen Übertragung) lässt sich eine Link-Margin bestimmen. Darunter ist die Differenz zwischen RSSI und Empfängersensibilität zu verstehen. Ist diese negativ, ist das Signal für den Empfänger zu schwach und die Übertragung schlägt fehl. Eine positive Link-Margin ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Je mehr sich der RSSI (negativer Wert) der Null nähert, desto stärker ist das empfangene Signal. Spätere Versuche müssen zeigen, welche Folgen verschiedene RSSI-Werte in realen Umgebungen hervorrufen.

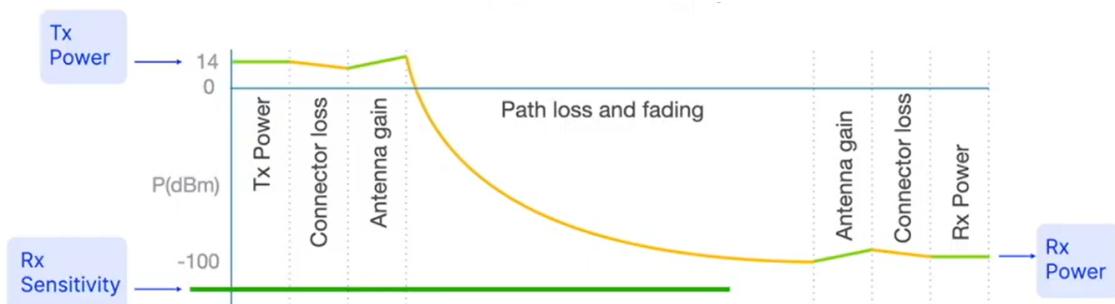


Abbildung 2.5.: Kenngrößen einer Funkübertragung⁴

2.3. LoRa

Semtech's CSS-Implementierung (LoRa) verfolgt ebenfalls den Ansatz der Signalspreizung. Die Aussagen über DSSS können auf LoRa übertragen werden, bis auf die Art der Modulierung. Anstelle eines festgelegten Codes wird das Signal auf einen Chirp-Impuls (Sinus-Funktion variierender Frequenz) moduliert [Ade+17]. Dies hat zur Folge, dass keine hochgenaue, teure Referenzzuhr und Kenntnis des Codes benötigt wird, wie es bei DSSS der Fall ist. Der Offset kann durch den „Stand“ der Sinus-Funktion bestimmt werden, um das Signal auf Empfängerseite zu entspreizen [Sem19a]. Dies verringert die Komplexität eines Empfängers.

Der Spreading Factor (SF) setzt sich aus dem Verhältnis der Chips zu den Nutzdaten zusammen. In LoRa wird zwischen sechs SFs unterschieden. Die SFs sind orthogonal zueinander, was bedeutet, dass sich mehrere Signale im selben Kanal zur selben Zeit mit unterschiedlichen SF nicht gegenseitig stören. Vielmehr erscheinen sie als einfaches Rauschen zueinander. Die im europäischen Raum geltenden SFs sind zuzüglich ihrer Eigenschaften in Tabelle 2.1 dargestellt [TTIa; LoR19, p. 24].

Tabelle 2.1.: LoRa Spreizfaktoren in Europa

Spreading Factor	Datenrate	Kanal-Bandbreite [kHz]	Bitrate [bit/s]	time-on-air [ms] ⁵
SF7	6	250	11000	36,4
	5	125	5470	73,1
SF8	4	125	3125	128
SF9	3	125	1760	227,3
SF10	2	125	980	408,2
SF11	1	125	440	909,1
SF12	0	125	250	1600

Die Berechnung der Sendezeit (time-on-air) ergibt sich aus der zu übertragenden

⁴Bildquelle: <https://www.udemy.com/course/lorawan-fundamentals/learn/lecture/26213822>

⁵Für 50 Byte zu übertragende Daten

2.3. LoRa

Datenmenge und Bitrate, dargestellt in Formel 2.3.

$$time-on-air = \frac{Daten [bit]}{Bitrate [bit/s]} \quad (2.3)$$

Nach Formel 2.1 bedeutet ein höherer SF einen größeren Gewinn. Ein Signal kann mit weniger Fehlern und über weitere Strecken empfangen werden, da die Empfangssensibilität höher ist [TTIb].

Mit den verschiedenen Stufen verändert sich zudem die minimal notwendige Empfangsqualität, um ein Signal zu demodulieren. Tabelle 2.2 zeigt diese Kennzahlen [TTIb; TTIC]. Daraus geht auch hervor, dass LoRa dazu in der Lage ist, Signale unterhalb des Rauschpegels zu demodulieren. Es ist festzustellen, dass ein höherer SF einen niedrigeren SNR ermöglicht und die Empfangssensibilität (RSSI) erhöht.

Tabelle 2.2.: Minimal notwendige LoRa-Empfangsqualitäten

Spreading Factor	min. RSSI [dBm]	min. SNR [dB]
SF7	-123	-7,5
SF8	-126	-10
SF9	-129	-12,5
SF10	-132	-15
SF11	-134,5	-17,5
SF12	-137	-20

Größere SFs bedeuten zunehmende Sendezeit bzw. geringere Bitrate, da einzelne Signale über einen längeren Zeitraum gesendet werden. Die theoretische Grundlage für dieses Verhalten ist mit dem *Shannon-Hartley Theorem* [Wer17, p. 219] in Formel 2.4 beschrieben.

$$Bitrate [bit/s] = B [Hz] \times \log_2(1 + SNR) \quad (2.4)$$

Es beschreibt die maximale Datenrate eines Übertragungskanals in Abhängigkeit der Bandbreite B und des Signal-Rausch-Verhältnis (SNR). Ein größerer Abstand von

2.3. LoRa

Signal zu Rauschen bedeutet, dass eine höhere Datenrate auf dem Übertragungskanal möglich ist und umgekehrt. Die Bandbreite ist vorgegeben, daher sind die einzigen veränderlichen Parameter der SNR und die Datenrate.

Da LoRaWAN-Endgeräte batteriebetrieben arbeiten und eine längere Sendezzeit (time-on-air) einen höheren Energieverbrauch bedeutet, ist es erstrebenswert die höchstmögliche Datenrate zu verwenden.

2.3.3. Vorteile

Nach Semtech sind LoRa Übertragungen immun gegenüber Multipathing und daraus resultierendem Fading. Durch Reflexionen, Brechungen und Beugungen der Funkwellen von Oberflächen können mehrere „Kopien“ eines Ausgangssignals den Empfänger erreichen. Fading beschreibt die Erscheinung, dass eben diese Kopien konstruktive bzw. destruktive Interferenzen miteinander aufweisen [Bur96]. Auch mit auftretenden Verschiebungen auf Grund des Doppler-Effekts [GM20] kann LoRa umgehen, weshalb mobile Anwendungen möglich sind.

LoRa befindet sich im lizenzenfreien Spektrum, weshalb keine Kosten für einen Lizenz-erwerb anfallen. Zudem ist durch die im vorigen Abschnitt beschriebenen technischen Mittel ein gleichzeitiges Übertragen ohne Störung möglich. Die mit der Lizenzfreiheit einhergehende Problematik wird in Kapitel 2.3.4 aufgegriffen.

Durch die Modulation können große Reichweiten bei geringen Kosten (geringe Energie Nutzung und Empfängerkomplexität) erzielt werden, womit neue IIoT Use-Cases möglich sind. Zudem können Endgeräte in verschiedenen Stufen, den SFs, kommunizieren, um einen Kompromiss zwischen Energieverbrauch und Signalstärke zu finden. Dies gewährleistet Flexibilität.

2.3.4. Limitierungen

Der Einsatz von LoRa ist nicht in jedem Anwendungsfall das passende Mittel. Die hohe Reichweite mit einhergehendem niedrigen SNR bedingt laut Shannon und

2.4. LoRaWAN

Hartley eine geringe Datenrate (siehe Formel 2.4). Zusätzliche Einschränkungen gelten in Europa durch einen Duty-Cycle. Echtzeitanwendungen und durchgängige Verbindungen sind daher nicht möglich.

Werden gleichzeitig mehrere Pakete mit gleichem SF über den selben Kanal übermittelt, treten Kollisionen auf [Ade+17]. Die Übertragung wird dadurch gestört, gesendete Pakete können vom Empfänger nicht aufgelöst werden. Die gleichzeitige Übertragung ist eine Folge der Nutzung des ALOHA-Protokolls, welches im Folgekapitel 2.4 erläutert wird. Das Frequenzband befindet sich im lizenzenfreien Spektrum und wird mit anderen Nutzern geteilt. Bei vielen Netzteilnehmern und einer daraus folgenden hohen Anzahl von Übertragungen werden Kollisionen auftreten. Dies ist eine Ursache für Paketverlust. Hinzu kommt die große räumliche Ausdehnung eines LoRaWAN-Netzwerks. Ein LoRaWAN-Netzwerk besitzt physisch eine große räumliche Ausdehnung. Es ist daher wichtig, möglichst „sparsam“ mit den begrenzten Ressourcen umzugehen.

Neben gesetzlichen und physikalischen Einschränkungen können Netzwerkbetreiber zusätzliche Limitierungen festlegen. Das weit verbreitete öffentliche LoRaWAN-Netzwerk The Things Network (TTN) definiert beispielsweise eine „Fair-Use-Policy“. Diese beschränkt die tägliche Uplink-Sendezeit auf 30 s und erlaubt in diesem Zeitraum maximal 10 Downlink-Nachrichten [TTId]. Private LoRaWAN-Netzwerke betrifft dies nicht.

2.4. LoRaWAN

LoRaWAN setzt auf LoRa als physischen Layer auf und bildet die Media Access Control. Abbildung 2.6 zeigt die Architektur eines LoRaWAN Netzwerks. Zentrales Element ist der LoRaWAN Netzwerkserver (LNS). Dieser ist für die Verwaltung des Netzwerks zuständig. LoRaWAN ist in die Gruppe der LPWANs einzuordnen, welche sich durch eine geringe Energienutzung auszeichnet. Batteriebetriebene Geräte sollen Laufzeiten von mehreren Jahren erreichen. Dabei übertragen sie Daten mit geringen Kosten über Distanzen bis zu 14 Kilometern [Wor22, p. 16ff.]. Vermehrt wird die

2.4. LoRaWAN

Dokumentation der *LoRa Alliance* herangezogen [LoR15]. Der Verband besteht seit 2015 und hat als Aufgabe, den LoRaWAN-Standard zu entwickeln und zu verbreiten.

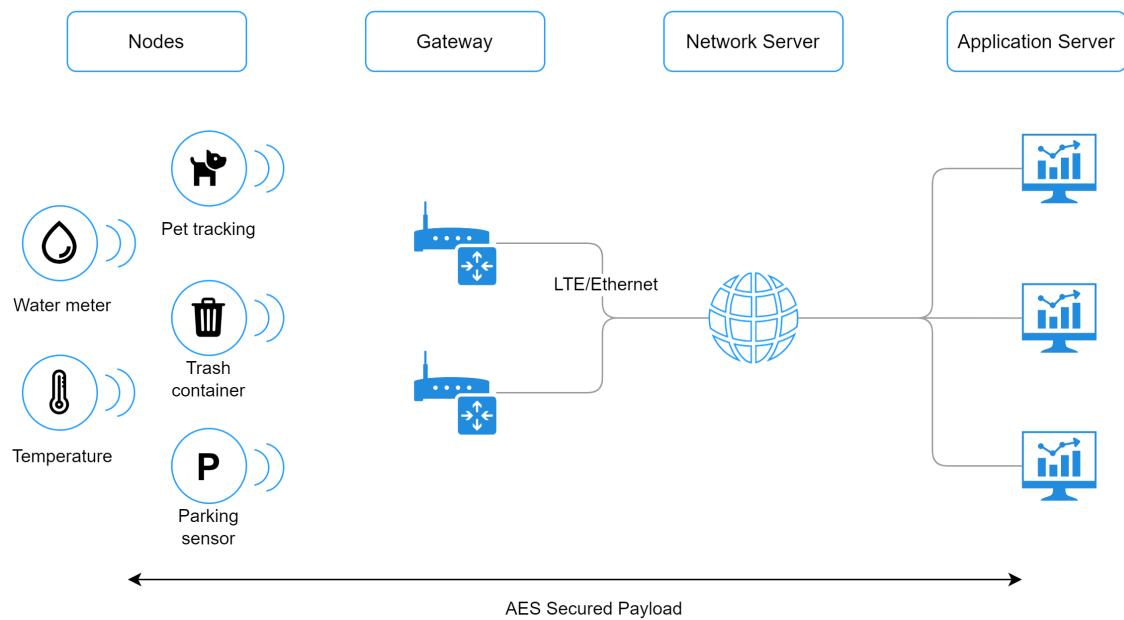


Abbildung 2.6.: LoRaWAN Architektur (siehe [TTIe])

Grundsätzlich existieren für jeden Use-Case unterschiedliche Nodes. Die Spanne reicht von Temperatursensoren über Sensoren zum Ablesen des Stromzählers bis hin zu Parksensoren. Diese kommunizieren mit dem LNS, welcher LoRa-Pakete durch ein oder mehrere LoRaWAN-Gateways sendet und empfängt. Von dort aus gelangen die Pakete zu einem Application-Server. Hier können Anwendungen entwickelt werden, welche die Daten verarbeiten und die Ergebnisse einem Nutzer präsentieren.

Die Netzwerktopologie entspricht einer *star of stars* Topologie. Im Zentrum des ersten Sterns steht ein Gateway, um dieses herum sind die Nodes angeordnet. Der zweite Stern stellt den Netzwerkserver dar, um welchen alle Gateways angeordnet sind [Hax+18, p. 4]. LoRaWAN basiert auf dem ALOHA-Protokoll, bei dem die Nodes ihre Nachrichten versenden, ohne zu wissen, ob andere Nodes gerade ebenfalls senden. Es existiert kein Mechanismus, um Kommunikationsslots zu reservieren und es wird keine Multiplexing-Technologie angewendet [Per18, LoRaWAN MAC layer].

2.4. LoRaWAN

2.4.1. Versionen

Die LoRa Alliance entwickelt LoRaWAN aktiv weiter. Alle Versionen werden in frei zugänglichen Spezifikationen veröffentlicht. Derzeit ist Version 1.0.4 die Aktuellste.

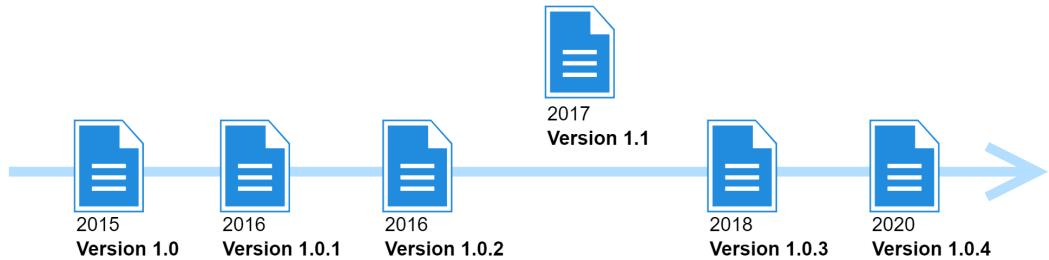


Abbildung 2.7.: LoRaWAN Versionsverlauf⁶

Version 1.1 suggeriert, dass es sich um eine neuere Version handelt. Wie Abbildung 2.7 zeigt, ist dies nicht zutreffend. Durch das Hinzufügen des Roaming-Features sind andere Anforderungen notwendig, die eine Kompatibilität von 1.0.x Versionen zu Version 1.1 verbietet. Dies ist der Grund, weshalb zwischen LoRaWAN v1.0.x und v1.1 unterschieden wird. Diese Arbeit beschäftigt sich nicht mit LoRaWAN Roaming und geht daher nicht auf Version 1.1 ein.

2.4.2. Endgeräte (Nodes)

Daten werden von Sensoren (Nodes/Devices) generiert. Eine Nachrichtenübermittlung vom Endgerät zu einem Gateway wird als Uplink bezeichnet, die umgekehrte Richtung als Downlink.

Es existieren drei Arten von Nodes, welche sich in ihrer aktiven Zeit und damit einhergehend ihrer Energieeffizienz unterscheiden.

- **Klasse A** - Nodes bestimmen Sendezeitpunkte, kurz nach dem Uplink ist ein Fenster für den Downlink geöffnet.

⁶Original: <https://www.thethingsnetwork.org/article/whats-new-in-lorawan-104-1>

2.4. LoRaWAN

- **Klasse B** - Zusätzlich zu den Eigenschaften von Klasse A besteht ein festgeschriebener Zeitpunkt, zu welchem Daten an die Nodes gesendet werden können.
- **Klasse C** - Nodes sind durchgehend offen für Downlinks. Durch die nicht zeitlich versetzte Übertragung von Downlinks besitzen Nodes dieser Klasse die geringste Latenz.

Es lässt sich feststellen, dass die Energieeffizienz mit aufsteigender Klasse abnimmt, da die aktive Zeit zunimmt. Eine Node ist aktiv, wenn sie sendet oder empfangsbereit ist. In nicht aktiven Zeiten fällt eine Node in „Tiefschlaf“, wodurch der Energieverbrauch minimiert wird. Endgeräte müssen vor dem Senden nicht mit dem Netzwerk synchronisiert werden, was die aktive Zeit verringert und Energie einspart.

Es ist wichtig zu verstehen, dass Nodes keinen Gateways zugeordnet sind. Sie senden ihre Pakete an alle Gateways, welche diese auf Grund ihrer Signalstärke empfangen. Zurecht eröffnet sich die Frage, inwiefern die Übertragung sicher ist, wenn jedes Gateway in der Nähe alle LoRaWAN-Nachrichten erhält. Jede LoRaWAN Kommunikation ist Ende-zu-Ende verschlüsselt. Ausschließlich der Netzwerkserver, bzw. Application-Server, bei welchem das Endgerät registriert ist, kann die Nachrichten entschlüsseln.

2.4.3. LoRaWAN Server

Ein LNS ist das zentrale Element jedes LoRaWAN-Netzwerkes. Er verwaltet Gateways, Nodes, Anwendungen und Nutzer im Netzwerk. Nach Amazon Web Services (AWS) und The Things Industries (TTI) besitzt ein LNS folgende Eigenschaften [AWS21; TT1e]:

- Deduplizierung von Nachrichten
- Sicherstellung der Integrität der Nachrichten und Authentizität der Nodes
- Durchführung von Downlinks über das geeignetste Gateway

2.4. LoRaWAN

- Optimierung der Datenrate einer Node mittels Adaptive Data Rate (ADR)-Befehlen
- Senden von Acknowledges (ACK) für bestätigte Uplinks
- Interaktion mit dem Join-Server während eines Beitrittsverfahrens
- Weiterleitung von Uplinks an den entsprechenden Application-Server

Die Deduplizierung ist notwendig, da eine Node mehrere Gateways erreichen kann. Würde jedes Paket an eine Anwendung weitergeleitet, treten unerwünschte Daten-Duplikate auf.

In einigen Fällen wird der LNS als Synonym für den gesamten Server genutzt. Dies ist nicht zutreffend, da mit Join- und Application-Server weitere Kernkomponenten existieren. Abbildung 2.8 zeigt die grundlegende LoRaWAN-Architektur mit Fokus auf die LoRaWAN-Server Komponenten auf der rechten Seite. Der LoRaWAN Join-Server verwaltet die Beitrittsanfragen von Geräten, welche „Over-the-air“ aktiviert werden (siehe 2.4.4). Ein LoRaWAN Application-Server lässt sich logisch hinter dem LNS einordnen. Es findet eine Verarbeitung der Uplinks statt und mit der Applikation verbundene Downlinks (keine Acknowleges oder ADR-Befehle) werden initiiert.

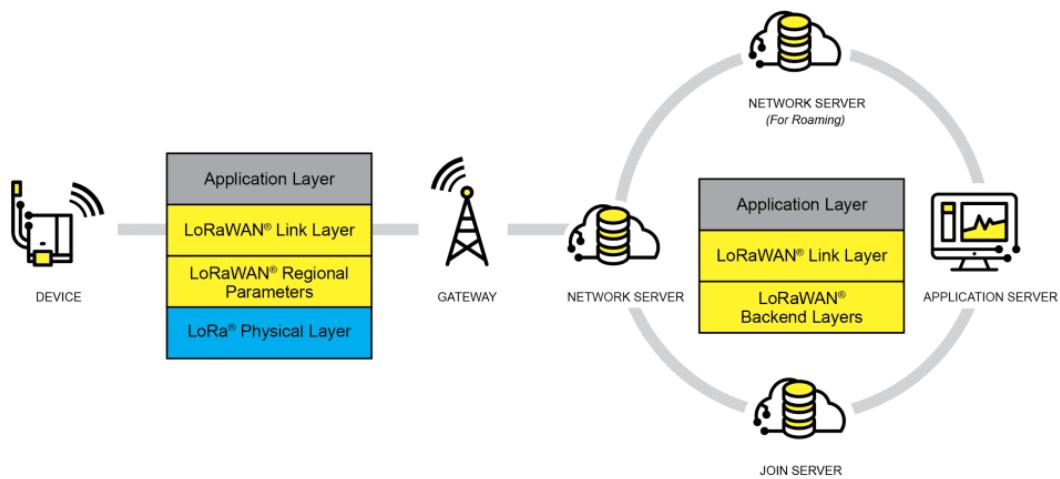


Abbildung 2.8.: LoRaWAN Server⁷

2.4.4. Geräteaktivierung und Sicherheit

Ein Endgerät kann durch Over-the-Air Activation (OTAA) oder Activation by Personalization (ABP) aktiviert werden. Ist der Vorgang erfolgreich, wird das Endgerät vom Netzwerk akzeptiert und leitet seine Daten an eine hinterlegte Applikation weiter. In jedem Fall wird das Endgerät nach der Aktivierung durch folgende Informationen definiert [LoR18; LoR20]:

Identifier des Endgeräts

Die **DevEUI** besteht aus 64 bit und identifiziert das Endgerät global eindeutig.

Adresse des Endgeräts

Die **DevAddr** besteht aus 32 bit und stellt die Netzwerkidentifikation dar. Sie besteht aus der Netzwerkadresse (NwkAddr) mit vorangestellter Netzwerk-ID (NwkID) [TTI21]. Die NwkID unterscheidet verschiedene Netzwerke, eine NwkAddr wird vom Netzwerk für das Endgerät vergeben.

Network Session Key

Der **NwkSKey** dient zur Ermittlung und Verifizierung des message integrity code (MIC). Das Endgerät und der zugehörige Netzwerkserver besitzen den Schlüssel. Dies stellt die Datenintegrität bis zum LNS sicher.

Application Session Key

Der **AppSKey** dient der Verschlüsselung der zu übertragenden Daten (Payload). Das Endgerät und der zugehörige Application-Server ver- und entschlüsseln die Nutzdaten. Dadurch wird eine Ende-zu-Ende Verschlüsselung (Endgerät bis Anwendung) erreicht. Netzwerkbetreiber können durch dieses Mittel keine Daten einsehen [LoR15].

Beide Schlüssel haben eine Länge von 128 bit. Die Verschlüsselung findet mittels AES-128 statt. Nach Herman et al. ist AES als sicher anzusehen [Isa+11]. Eine Literaturanalyse ergab keine Anhaltspunkte, dass dies heute nicht mehr der Fall ist. Neben den beiden genannten existieren weitere Schlüssel und Identifier, welche in den unterschiedlichen Aktivierungsverfahren genutzt werden. Eine Erläuterung findet an den Stellen statt, an welchen sie das erste Mal erwähnt werden.

⁷Bildquelle: <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>

Over-the-Air Activation

OTAA-Geräte sind vor der Aktivierung mit DevEUI, AppEUI und den Schlüsseln AppKey und NwkKey versehen. Die AppEUI ist eine global eindeutige ID, die dem LNS signalisiert, welcher Join-Server genutzt werden muss.

Der Beitrittsprozess besteht darin, dass eine Node eine Anfrage an den Server sendet. Der LNS leitet die Anfrage an den durch die AppEUI spezifizierten Join-Server weiter. Ausschließlich dieser kann die Beitrittsanfrage verarbeiten [LoR18]. Der Join-Server enthält folgende Informationen [Sem19a]:

- DevEUI
- AppKey: Anwendungs-Kodierungsschlüssel
- NwkKey: Netzwerk-Kodierungsschlüssel
- Serviceprofil: Verwaltungsinformationen (z.B. LoRaWAN-Version, Frequenzband)
- ID der zugehörigen Applikation

Er generiert eine DevAddr und nutzt die Schlüssel, um die Session-Keys (AppSKey, NwkSKey) abzuleiten. Bei jedem Beitritt werden die drei Werte neu generiert. Der Join-Server verteilt die Session-Keys im LoRaWAN-Server. Der LNS übermittelt der Node die Nachricht des erfolgreichen Beitritts und alle Informationen bezüglich der Session-Keys.

Activation by Personalization

ABP ist die zweite Möglichkeit der Aktivierung. Endgeräte werden vom Hersteller mit Session-Keys und einer DevAddr versehen. Diese Werte sind demnach nicht dynamisch. Das Endgerät muss keinen Join-Prozess durchlaufen, da die Schlüssel bereits vorhanden sind.

Fazit

OTAA ist ABP aus mehreren Gründen vorzuziehen [TTI21]. Die größte Einschränkung stellt die Bindung an ein Netzwerk dar. Da die DevAddr vorab festgelegt ist, sind alle Netzwerkparameter (NwkAddr, NwkID) unveränderlich. Pakete von ABP-Endgeräten, die in andere/falsche Netzwerke integriert sind, können nicht an den richtigen Server weitergeleitet werden.

Die Beschränkung auf eine Session ist eine weitere Einschränkung. Sollten die Session-Keys Dritten bekannt sein, stellt dies ein großes Sicherheitsrisiko dar. OTAA-Geräte können in diesem Fall erneut dem Netzwerk beitreten und dadurch neue Schlüssel erhalten. ABP-Geräte sind nach Veröffentlichung der Schlüssel kompromittiert. In diesem Zusammenhang ist der Frame Counter (16 oder 32 bit) als weiteres Sicherheitsfeature von Bedeutung. Funkübertragungen können von jedem Empfänger in Reichweite aufgezeichnet werden. Durch die Session-Keys ist eine Entschlüsselung nicht möglich, jedoch kann ein aufgezeichnetes Paket erneut übertragen werden (Replay Angriff). Erhält der Netzwerkserver Pakete mit nicht erwartetem Frame Counter, blockiert er diese. Bei jedem Uplink wird der Frame Counter um eins inkrementiert. Er gehört der Session an und kann daher bei ABP-Geräten nicht zurückgesetzt werden. Folglich ist ein solches Endgerät bei maximalem Frame Counter unbenutzbar.

2.4.5. Anpassung der Übertragungsparameter

Sind Geräte im Netzwerk aktiviert, kann die Datenrate und Sendeleistung des Endgeräts adaptiv angepasst werden. Ziel eines ADR-Algorithmus ist die optimale Anpassung der Datenrate an die Umgebung bzw. Entfernung vom Gateway. Es soll die maximale Energieeffizienz sicherstellen und die Belastung des Frequenzbands minimieren. Damit ist es ein zentraler Bestandteil von LoRaWAN, welcher das Netzwerk aktiv verbessern soll.

Laut Chao et al. [Jia+22] besteht das System ADR aus zwei Teilen: der Anpassung durch den Netzwerkserver und der Anpassung durch die Node. Der LNS hat die

2.4. LoRaWAN

Aufgabe, die Datenrate zu erhöhen, das Endgerät muss sie verringern. Hintergrund ist der Charakter der Übertragung. Sollte der LNS die Datenrate zu hoch setzen, was einen geringeren SF bedeutet, würde das Netzwerk keine weiteren Nachrichten des Endgeräts erhalten. Dies hätte zur Folge, dass kein weiterer Downlink zur Anpassung der Datenrate stattfinden könnte. Daher fordert das Endgerät nach einer gewissen Anzahl von Uplinks Acknowledgements an. Sendet der Netzwerkservicer keine Bestätigung, verringert es seine Datenrate selbstständig [Sem19b].

Der Algorithmus im LNS stellt den zweiten Teil dar. Jeder Netzwerkbetreiber kann eigene Algorithmen auf seinem Netzwerkservicer implementieren. Im Folgenden wird der Standard-Algorithmus dargestellt [Jia+22]. Aus den letzten 20 Uplinks wird der maximale SNR entnommen. Von diesem Wert wird der für die Übertragung notwendige SNR (siehe Tabelle 2.1) und 5 db als Puffer (Margin) abgezogen. Daraus wird die Anzahl der durchzuführenden Schritte berechnet. Die Gleichungen aus 2.5 stellen die beschriebene Berechnung dar.

$$\begin{aligned} SNR_{margin} &= SNR_{max} - SNR_{req} - Margin \\ NSteps &= \text{int}(SNR_{margin} - 1) \end{aligned} \tag{2.5}$$

Darauf folgt die Anpassung der Datenrate. Der SF wird um die Anzahl der Schritte $NSteps$ verringert. Sollte der minimale SF erreicht sein und es sind noch Schritte „übrig“, wird die Sendeleistung verringert. Die ermittelten Werte für SF und Sendeleistung werden an das Endgerät übermittelt.

Studien aus realen Umgebungen zeigen, dass eine adaptive Anpassung der Datenrate zu mehr Paketverlust führen kann [Ojo+22]. In Netzwerken mit wenigen Nodes ist das Frequenzband schwach ausgelastet. Dadurch können weniger Kollisionen stattfinden, was für eine Übertragung mit höherem SF eine höhere Erfolgsquote bei der Paketübermittlung bedeutet. Gleichzeitig verliert eine durch ADR angepasste Node mehr Pakete, da das Netzwerk Energieeffizienz und optimale Nutzung des Frequenzspektrums priorisiert.

ADR ist ausschließlich für Endgeräte in statischen Positionen geeignet. Sollte sich der Ort und damit einhergehend der SNR ständig verändern, kann keine angemessene Datenrate festgelegt werden.

3. Einsatz und Eignungsanalyse von LoRaWAN im industriellen Kontext

Dieses Kapitel behandelt die Umsetzung des praktischen LoRaWAN-Projekts und die Auswertung der Ergebnisse. Der Aufbau orientiert sich an den in 1.3 dargestellten Bearbeitungspunkten.

3.1. Definition

Um das Projekt durchführen zu können, müssen Anforderungen und Ziele definiert sein. Die folgenden Punkte stellen dies dar. Zudem wird gezeigt, dass die gesetzten Anforderungen umsetzbar sind.

3.1.1. Anforderungsanalyse

Um Anforderungen zu definieren, wird sich an der Methode der *Requirements Specification* aus der Softwareentwicklung orientiert. Nach Dörfler und Miadowicz handelt es sich um eine Methode der klassischen Anforderungsanalyse¹. Es wird zwischen User und System Requirements unterschieden. User Requirements beschreiben funktionale und nicht funktionale Anforderungen einer Lösung. Diese sind so zu formulieren,

¹Entnommen aus der Vorlesung von Marco Dörfler und Inga Miadowicz: „Software Engineering II: Sommersemester 2022“

3.1. Definition

dass sie für einen Nutzer ohne technischen Hintergrund verständlich sind. System Requirements stellen erweiterte User Requirements dar. Diese sollen dazu genutzt werden, die Art der Umsetzung darzustellen.

Im Folgenden werden die Anforderungen in Form von User Requirements aufgezeigt. Ausführlichere Beschreibungen im Sinne von System Requirements werden nicht aufgestellt, da die Ausarbeitung der Punkte erst zu einem späteren Zeitpunkt stattfindet. Zudem sollen durch Auswahlverfahren optimale technische Lösungen eingesetzt werden, was durch eine initiale Festlegung aller technischen Parameter nicht notwendig wäre.

Tabelle 3.1.: Anforderungsdefinition

ID	Name	Beschreibung
HW-1	Identifizierung benötigter Hardware	Anforderungen an Sensoren und Gateways führen zu einer Liste benötigter Hardware für das Netzwerk.
HW-2	Bestellung von Hardware	Identifizierte Hardware wird von Zulieferern bezogen.
HW-3	Positionierung am Standort	Durch Rücksprachen mit der für die Gebäudetechnik verantwortlichen Abteilung werden ideale Positionen für Sensoren festgelegt. Gateways werden so platziert, wie sie die Zielstellung am besten erfüllen können.
LNS-1	Kriterienkatalog	Ein Kriterienkatalog ist vorhanden, welcher verschiedene LNS (Konzepte und Anbieter) miteinander vergleichen lässt.
LNS-2.x	Vergleich diverser LNS-Konzepte	Vier LoRaWAN-Konzepte werden miteinander verglichen. Dazu wird der Kriterienkatalog herangezogen.

3.1. Definition

LNS-3	Auswahl Lösung / Anbieter	Das ausgewählte Konzept dient als Grundlage, Lösungen verschiedener Anbieter auszuwählen und zu vergleichen. Auf dieser Grundlage wird eine Entscheidung für die Verwendung eines expliziten LNS getroffen.
LNS-4	Installation LNS	Der Netzwerkserver wird eingerichtet. Die Funktionalität wird mittels eines Prototypen verifiziert. Sollte sich der LNS trotz intensiver Vorbetrachtung nicht als geeignet herausstellen, ist zu LNS-3 zurückzukehren.
MA-1	LoRaWAN Raspberry Pi	Ein Raspberry Pi (RPi) ist eingerichtet und kann über LoRaWAN kommunizieren.
MA-2	Abruf Maschinendaten RPi	Vorhandene Technologien an einer Maschine werden genutzt, um Maschinendaten zu beziehen. Der RPi ist in der Lage, sich mittels Software mit einer Maschine zu verbinden und Informationen abzurufen.
MA-3	Maschinendaten über LoRaWAN	Der RPi übermittelt Maschinendaten über LoRaWAN.
VA-1	Initiale Datenverarbeitung	Die Dekodierung übermittelter Sensordaten (Payload) findet statt.
VA-2	Vorverarbeitung	Der dekodierte Payload der Nodes wird in eine einheitliche Form überführt.
VA-3	Automatisierte Durchführung der Vorverarbeitung	Ankommende Nachrichten von Nodes werden automatisch dekodiert und verarbeitet.
DB-1	Ermittlung Datenstruktur	Für Sensordaten besteht eine geeignete, flexible und skalierbare Datenstruktur. Sie dient der Darstellung von Sensordaten aller Sensoren. Mindestens Payload und Zeitstempel sind enthalten.

3.1. Definition

DB-2	Bestimmung Datenbank	Bestehende Datenbanksysteme sind heranzuziehen und auf Eignung zu prüfen. Ein für die Häufigkeit der Schreib-/Lesevorgänge und Strukturiertheit der Daten geeignetes Datenbanksystem wird gewählt.
DB-3	Datenbank-Einrichtung	Es existieren Methoden zum Schreiben und Lesen von Daten aus der Datenbank.
DB-4	Hinzufügen von Daten	Sensordaten und ggf. Auswertungen werden automatisiert zur Datenbank hinzugefügt.
GUI-1	Technologie-Festlegung	Für die Bereitstellung einer Darstellung der Ergebnisse wird eine Technologie (z.B. mobile Applikation, Website, ...) ausgewählt.
GUI-2	Darstellung der Daten	Die festgelegte Technologie aus GUI-1 wird genutzt, um eine Darstellung der Informationen zu ermöglichen. Die erhaltenen Sensordaten werden so grafisch abgebildet.

Aus den definierten Anforderungen kann ein Abhängigkeitsgraph erstellt werden. Dieser zeigt auf, in welcher Reihenfolge die Anforderungen umgesetzt werden müssen. Die Abbildung ist in Anhang A zu finden.

Auf eine Angabe von Prioritäten für die Anforderungen wird verzichtet. Die stark sequentielle Abarbeitungsstruktur bedingt eine Bearbeitung der meisten Punkte, wodurch eine Priorisierung überflüssig ist.

3.1.2. Machbarkeitsanalyse

Nach Dörfler und Miadowicz ist die Machbarkeitsanalyse eine Studie, mit der die Realisierbarkeit eines Projekts ermittelt werden soll². Es sollen die Fragen

- „Ist eine Umsetzung der Anforderungen realistisch?“ und

²Entnommen aus der Vorlesung von Marco Dörfler und Inga Miadowicz: „Software Engineering II: Sommersemester 2022“

3.1. Definition

- „Wie kann eine Umsetzung erfolgen?“

beantwortet werden.

Das Ziel des Prototypen ist eine vollständige Abbildung der Kommunikationskette vom Endgerät in eine Anwendung. Dafür wird auf der physischen Seite ein LoRaWAN-Gateway (Dragino Outdoor Gateway) und eine Node (Dragino Temperatursensor) eingesetzt³. Die mittels LoRa übertragenen Pakete sollen an den LNS des TTN weitergegeben werden. Im Anschluss soll über eine Schnittstelle auf die Daten zugegriffen werden. Abschließend soll eine Speicherung und Darstellung der Daten innerhalb des Unternehmensnetzwerks stattfinden. Abbildung 3.1 stellt den Aufbau des Prototypen dar.

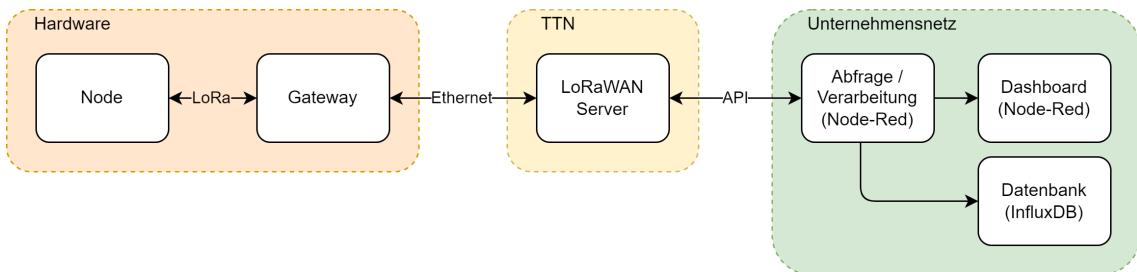


Abbildung 3.1.: Versuchsaufbau Prototyp

Die Node wird nach den Vorgaben des Herstellers durch ein langes Drücken des Aktionsknopfes in Betrieb genommen [Dra22]. Damit eine erfolgreiche Aktivierung mittels OTAA stattfinden kann, muss sich das Gateway in Reichweite befinden und erhaltene Pakete an die korrekte Adresse weiterleiten. Diese Adresse lautet im TTN standardmäßig `eu1.cloud.thethings.network`. Um zu garantieren, dass das Gateway die Pakete der Node empfängt, werden beide Elemente in einem Raum platziert (Abstand geringer als 1 Meter). Das TTN wird genutzt, da die Dokumentationen der Node und des Gateways dies als Beispiel aufführen und die Schritte zur Einrichtung beschreiben. Zudem ist die Verwendung in diesem Rahmen (Prototyp) nicht mit Kosten verbunden.

Im nächsten Schritt müssen Node und Gateway im LoRaWAN-Server registriert werden. Für die Node werden initial AppEUI, DevEUI und AppKey benötigt. Der

³Informationen zur Hardware-Auswahl folgen in Kapitel 3.2

3.1. Definition

verwendete Standard für regionale Parameter [TTIa], die implementierte LoRaWAN-Version und der verwendete Frequenzplan müssen darüber hinaus angegeben werden. Die Dokumentation des Herstellers gibt diese Werte vor [Dra22]. Für das Gateway ist die ID im LoRaWAN-Server einzutragen.

Nach Abschluss der Einrichtung wird das Gateway in der Übersicht des TTN als „Connected“ angezeigt. In der Übersicht der Node/Anwendung wird ebenfalls der aktive Status hervorgehoben. Das Dekodieren und Formatieren der übermittelten Daten übernimmt das TTN. Da ein vordefiniertes Profil vorhanden ist, müssen keine eigenen Funktionen für Formatierung der Nutzdaten erstellt werden.

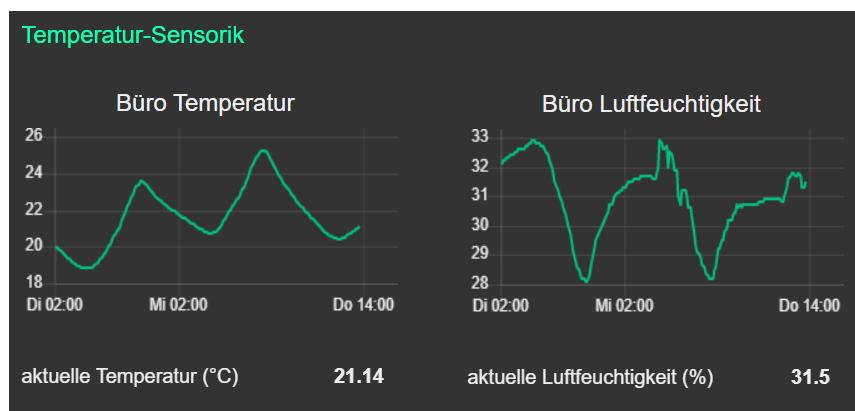


Abbildung 3.2.: LoRaWAN-Sensordaten im *Node-Red* Dashboard

Um die Daten von TTN abzurufen, wird die vorhandene *Storage Integration* genutzt. Der Server speichert die Daten aus den Uplinks der Node persistent ab, welche so im Nachgang über eine REST API abgerufen werden können. Im Netzwerk des Unternehmens befindet sich eine *Node-Red* Instanz. *Node-Red* ist ein Entwicklungs- tool, in welchem mittels Baukastenprinzip Funktionsabläufe für IoT-Anwendungen implementiert werden können. Um die Daten abzurufen, wird zyklisch eine Anfrage an die Schnittstelle der *Storage Integration* gesendet. Die in der Antwort enthaltenen Daten werden in einer Funktion verarbeitet und anschließend über weitere Bausteine in einer *InfluxDB* gespeichert. Durch die Dashboard-Funktion von *Node-Red* findet eine Darstellung statt (siehe Abbildung 3.2).

Damit sind die beiden Fragen vom Anfang beantwortet. Die Umsetzung ist realistisch

3.2. Netzwerkplanung

und ein möglicher Weg hierfür wurde vorgestellt. Das Vorhaben kann als „machbar“ betrachtet werden.

3.1.3. Zielstellung

Es soll die Frage geklärt werden, unter welcher Zielstellung Versuchsaufbauten erfolgen.

Als Ziel für die praktische Anwendung wird das Erreichen zufriedenstellender Paketankunftsrraten im Bereich der Werkshalle definiert. Ein Versuchsaufbau mit Gateway im Outdoor-Bereich soll zeigen, inwiefern die Werkshalle bzw. der gesamte Standort abgedeckt werden kann. Sollte sich herausstellen, dass keine zufriedenstellende Abdeckung erreicht wird, muss ein zweiter Versuch aufgebaut werden. Ein zweites Gateway wird hierfür direkt im Bereich der Werkshalle (Indoor) installiert.

Durch die Eigenschaften von LoRaWAN wird davon ausgegangen, dass neben der Werkshalle weitere Komplexe am Standort durch das Netzwerk abgedeckt werden. Um dies zu prüfen, müssen Sensoren über den Standort verteilt und in Versuchen über einen längeren Zeitraum betrachtet werden.

3.2. Netzwerkplanung

Das Kapitel beschäftigt sich mit der Planung des LoRaWAN-Netzwerkes auf der physischen Seite. Es wird Hardware ausgewählt und eine Standortanalyse liefert Rückschlüsse auf die Testumgebung.

3.2.1. Hardware

Um Testaufbauten zu ermöglichen, sind LoRaWAN Nodes und Gateways notwendig. Es bestehen Anforderungen an Nodes. Ein Teil muss Outdoor-fähig sein, um sich nicht auf den Indoor-Bereich beschränken zu müssen. Zudem sollen sofort benutzbare Nodes verwendet werden, da der Aufwand der Ersteinrichtung sonst massiv steigt

3.2. Netzwerkplanung

und die Projektzeit unnötig verkürzt. Diese Kriterien werden durch den *Dragino LHT65 Temperatur und Luftfeuchtigkeitssensor* erfüllt. Trotz dieser Qualifikation ist weitere Hardware nötig. Eine Anforderung ist die Anbindung einer Maschine bzw. der Bezug ihrer Daten. Da keine fertigen LoRaWAN Nodes zu diesem Zweck existieren, muss ein Endgerät eigenständig entwickelt werden. Dafür soll ein *Raspberry Pi 4* mit Hilfe einer *LoRa/GPS Hardware Attached on Top (HAT)* eingesetzt werden. Als letzte Node wird ein Sensor für die S0-Schnittstelle in Stromzählern identifiziert. Von ihr werden aussagekräftige Langzeitstudien zur Stromnutzung im Bürobereich erhofft, welche sich über den Zeitraum dieses Projektes hinaus erstrecken.

Zur Anbindung der Nodes an den Netzwerksserver wird mindestens ein Gateway benötigt. Zum Zeitpunkt der Ausarbeitung sind viele Gateways nicht zeitnah lieferbar, daher ist die Auswahl nicht umfangreich. Nichtsdestotrotz müssen Gateways Akzeptanzkriterien erfüllen. Zu diesen zählen ein angemessener Preis für einen Prototypen und die Möglichkeit, über Power-over-Ethernet mit Energie versorgt zu werden. Zudem soll mindestens ein Gateway für den Außeneinsatz vorhanden sein. Im Bereich der Outdoor-Gateways konnte mit dem *Dragino DLOS8* ein Gateway identifiziert werden, welches die Kriterien erfüllt. Da vorab keine Aussagen über die Funkqualität von LoRa am Standort getroffen werden kann, wird ein weiteres Gateway bestellt. Es soll die Abdeckung des Gateways im Innenbereich erweitern. Hierfür wird die Hardware-Liste um das *RAK7268 WisGate Edge Lite 2* ergänzt.

Tabelle 3.2.: Übersicht Hardware

Hersteller	Modell	Menge	Version
Dragino	DRA DLOS8 Outdoor Gateway	1	siehe Verweis ⁴
RAK	RAK7268 WisGate Edge Lite 2	1	WisGateOS V1.3.3
Dragino	DRA LHT65 Temperatursensor	3	v1.9.0
Sensing Labs	SL LED-LAB-41NS	1	
Raspberry Pi Foundation	Raspberry Pi 4	1	
Seeed	LoRa/GPS HAT	1	v1.4

3.2. Netzwerkplanung

Tabelle 3.2 listet die Hardware auf. Die ersten beiden Einträge stellen die LoRaWAN-Gateways dar. Darauf folgen die Nodes. Um Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten, sind die Versionen der installierten Firmware angegeben.

3.2.2. Standortanalyse

Das Firmengelände der Syntegon Technology GmbH zeichnet sich durch eine isolierte Lage aus. Ein Blick auf die Karte (Abbildungen C.1, C.2) zeigt, dass in der direkten Umgebung in allen Himmelsrichtungen keine anderen Gebäude vorhanden sind. Bei Betrachtung des Höhenprofils (Abbildung C.3) fällt auf, dass das Betriebsgelände 10 bis 15 Meter tiefer gelegen ist als seine Umgebung im Norden, Osten und Süden. Durch diese natürlichen Gegebenheiten ist es von umliegendem Funkverkehr teilweise isoliert. Momentaufnahmen der herangezogenen Karten sind in Anhang C dokumentiert.

Die Bebauung am Standort zeichnet sich dadurch aus, dass Gebäude meist mit einer Fassade aus geerdeter Blechhülle ummantelt sind. Im Innenbereich der Montagehalle sind viele Stahl- und Metallelemente vorzufinden.

Die Dächer der großen Gebäude im westlichen Bereich des Geländes sind begehbar. Durch Öffnungen können Kabel auf die Dachoberfläche geführt werden. Es ist somit möglich, ein Gateway auf dem Dach zu installieren. Auf den Dächern ist keine Möglichkeit vorhanden, das Gateway weit über der Dachoberfläche (höher als einen Meter) anzubringen.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse ist davon auszugehen, dass sich Kommunikation über Funk schwierig gestalten könnte. Durch das Vorhandensein von viel reflektierendem Material wird die Durchdringungsfähigkeit von LoRa eingeschränkt sein. Ein weiterer massiver Nachteil stellt die Bebauung des Umlands dar. Für Funktechnologien ist der Mehrwegeempfang essentiell, um Hindernisse auf dem direkten Weg zu umgehen. Durch die Aufteilung der Übertragung auf verschiedene Wege durch Reflexion, Brechung und Beugung gelangen viele zeitlich versetzte und phasenverschobene Kopien zum Empfänger [Wer17, p. 555f.]. Da in direkter Umgebung keine weitere

⁴Version: lgw-build-v5.4.1615882321-20210316-1613

3.3. Netzwerkserver

Bebauung stattfindet und der Standort tiefer gelegen ist als das Umland, beschränkt sich dieser Übertragungsweg auf ein Minimum.

3.3. Netzwerkserver

Als zentrale Instanz des LoRaWAN Netzwerkes muss ein LNS ausgewählt werden. Da mehrere Möglichkeiten bestehen, diesen zu implementieren, ist das Konzept festzulegen, bevor eine explizite Lösungsauswahl stattfindet. Der ausgewählte LNS wird anschließend im Detail betrachtet.

Im Folgenden wird meist der LNS genannt. Join und Application Server sind für die Auswahl des LoRaWAN Servers in wenigen Punkten relevant. Die Erläuterung der Komponenten ist im Grundlagenkapitel LoRaWAN aufzufinden (siehe 2.4.3).

3.3.1. Konzeptauswahl

Es existieren mehrere Möglichkeiten ein LoRaWAN-Netzwerk aufzubauen. Das Konzept wird durch den eingesetzten LNS bestimmt. Die Konzepte unterscheiden sich grundsätzlich darin, wie (öffentlich/privat) ein Netzwerkserver betrieben wird. Diese Arbeit betrachtet zudem den Aspekt, wo (Cloud/lokal) der Netzwerkserver betrieben wird.

Öffentliche LoRaWAN-Netzwerke

Nutzer teilen sich in einem öffentlichen Netzwerk LoRaWAN-Gateways und den Netzwerkserver. Folglich kann jeder Netzwerkteilnehmer alle Gateways des Netzwerks für Übertragungen verwenden. Außer eigenen Nodes ist zum Einstieg keine Hardware nötig, da große geographische Gebiete bereits abgedeckt werden. Der LNS wird durch einen Netzbetreiber als Software-as-a-Service (SAAS) zur Verfügung gestellt. Der Aufbau eines solchen Netzwerks ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Ein Vertreter ist das The Things Network (TTN).

3.3. Netzwerkserver

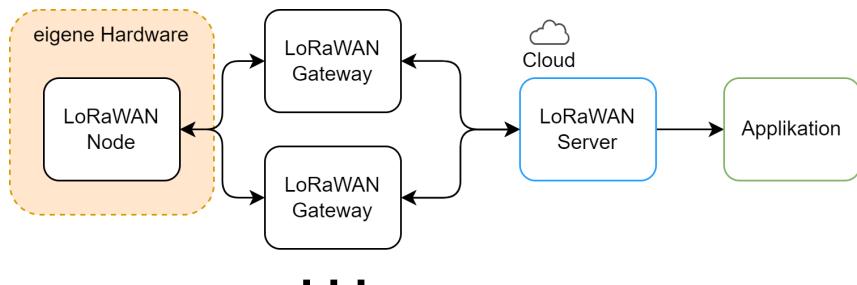


Abbildung 3.3.: Öffentliches LoRaWAN-Netzwerk

Der Einsatz eines öffentlichen Netzwerks ist als problemlos und wartungsarm einzuschätzen. Da bestenfalls viele Nutzer für eine große Abdeckung sorgen, werden potentielle Probleme schnell erkannt. Am Beispiel des TTN bedeutet dies, dass ca. 173.000 Mitglieder das rund 20.000 Gateways umfassende Netzwerk nutzen⁵.

Der Einsatz einer vorgefertigten Lösung (SAAS) bedeutet, dass keine direkten Änderungen an fundamentalen Einstellungen in der Software möglich sind. Nutzer müssen sich auf die Expertise des Betreibers verlassen. Es ist möglich, dass ein Netzwerkbetreiber Limitierungen festlegt, welche strenger sind als die gesetzlichen Vorschriften. Das Kapitel 2.3.4 stellt dies am Beispiel dar.

Die Anbindung des Netzwerkservers an externe Anwendungen ist ebenso vorgegeben. Große Lösungen wie das TTN stellen viele Integrationen zur Verfügung. Beispielsweise können eingehende Daten über MQTT weitergeleitet oder direkt an einen der drei großen Cloud-Plattformen (Microsoft Azure, Google Cloud, AWS) [SD20] übermittelt werden.

In Bezug auf die Sicherheit gelten die Vor- und Nachteile einer extern gewarteten Cloud-Lösung. Die Infrastruktur wird mit anderen Nutzern geteilt, das Verhindern von Datenlecks ist Aufgabe des Netzbetreibers. Eine Aktivierung der Endgeräte mittels OTAA ist Stand der Technik und wird als „Best Practice“ angesehen [TTI22a].

Öffentliche Netzwerke teilen sich in community und kommerzielle Netzwerke auf. Der Unterschied liegt im Betrieb der Gateways. Community Netzwerke lassen Nutzer

⁵Stand 06.07.2022, Quelle: <https://www.thethingsnetwork.org/>

3.3. Netzwerkserver

Gateways installieren und verwalten, während in kommerziellen Netzwerken der Netzwerkbetreiber dafür verantwortlich ist.

Um ein möglichst großes Netzwerk aufzubauen, ist der Beitritt eines öffentlichen community LoRaWAN-Netzwerks kostenfrei. Einige Anbieter besitzen ein zusätzliches, kostenpflichtiges Angebot. Dadurch wird eine Verfügbarkeit des Netzwerkservern garantiert. Dies garantiert jedoch nicht die Verfügbarkeit der Gateways anderer Nutzer. Auch kommerzielle öffentliche Netzwerke sind an Kosten gebunden, da für die Verfügbarkeit des Netzwerkservern und der Gateways garantiert wird. Die kostenpflichtigen Angebote sind nicht mit einem privaten LoRaWAN-Netzwerk zu verwechseln. Dieses Netzwerkkonzept wird im folgenden Abschnitt aufgegriffen. Im kostenfreien Modell bestehen keine Garantien. Ausfälle bzw. ein Verlust der Verfügbarkeit muss akzeptiert werden.

Der Einsatz eines öffentlichen community Netzwerks ist im kommerziellen Bereich neben Prototypen nicht praktikabel. Mit unklaren Verfügbarkeiten kann keine professionelle, auf LoRaWAN basierende IIoT-Lösung entwickelt werden. Ein kommerzielles Modell löst dieses Problem. Mögliche Einsatzgebiete sind mobile Anwendungen, welche sich über einen großen geographischen Raum erstrecken.

Private LoRaWAN-Netzwerke

Ein privates LoRaWAN-Netzwerk zeichnet sich durch den Aufbau einer eigenen Infrastruktur aus. Gateways sind durch den Nutzer zu installieren und mit dem LNS zu verbinden. Ein Netzbetreiber stellt die Infrastruktur bzw. den LNS zur Verfügung, welcher für die Verwaltung des privaten Netzwerks verantwortlich ist. Die Abdeckung wird durch die explizit für das eigene Netzwerk installierten Gateways bestimmt. Gateways fremder Nutzer haben keinen Einfluss auf die Abdeckung des Netzwerks und auch umgekehrt können die Gateways in privaten Netzwerken nicht durch Dritte genutzt werden. Abbildung 3.4 zeigt schematisch den Aufbau eines privaten LoRaWAN-Netzwerks.

Bei der Umsetzung eines privaten LoRaWAN-Netzwerks ist mit wenigen Problemen zu rechnen. Grund ist die Verwaltung des Servers durch einen externen Anbieter.

3.3. Netzwerkserver

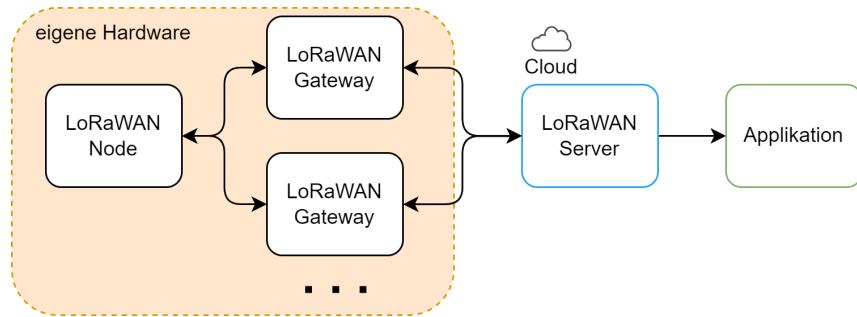


Abbildung 3.4.: Privates LoRaWAN-Netzwerk

Dadurch wird der Installations- und Wartungsaufwand auf ein Minimum reduziert.

Grundlegende Einstellungen eines LNS sind ebenso wenig flexibel wie in einem öffentlichen Netzwerk, da es sich um einen verwalteten Dienst handelt. Eine komplett eigenständige Kontrolle über Hardware und deren Positionierung garantiert jederzeit mögliche Anpassungen. Da eingesetzte Gateways nicht durch Dritte verwaltet werden, ist eine unangekündigte, nicht Umwelt-induzierte Abschaltung oder Neupositionierung ausgeschlossen.

Die Anbindung an externe Anwendungen und Datenbanken ist abhängig vom gewählten Anbieter des Netzwerkservers. Die aufgeführten Punkte im vorherigen Abschnitt sind daher auch hier gültig.

Im Punkt Sicherheit bietet eine private Lösung Vorteile gegenüber öffentlichen Netzwerken. Da die Infrastruktur mit niemandem geteilt wird, sind Sicherheitsrisiken als geringer einzuschätzen. Auch zusätzliche Sicherheitsfeatures können implementiert werden. In allen betrachteten privaten LNS wurde eine Aktivierung mittels OTAA oder ABP unterstützt.

Ein privates Netzwerk ist mit Kosten verbunden. Neben fixen monatlichen Preismodellen existieren auch flexible Kostenmodelle, in welchen ausschließlich genutzte Ressourcen berechnet werden. Für kleinere Anwendungen ist dies von Vorteil.

Ein privates Netzwerk stellt einen Kompromiss zwischen öffentlichem Netzwerk und selbst installiertem LNS dar. Die volle Kontrolle über die Netzwerkausdehnung und die installierten Gateways ermöglichen einen gezielten Einsatz im unternehmerischen

3.3. Netzwerkserver

Bereich. Gerade auf abgelegenen Betriebsgeländen, wo öffentliche Netzwerke keine ausreichende Abdeckung erreichen, kann ein privates Netzwerk aufgebaut werden.

Lokale LoRaWAN-Netzwerke

Das lokale LoRaWAN-Netzwerk stellt eine Sonderform des privaten Netzwerks dar. Der Netzwerkserver wird in Eigenverantwortung auf Hardware im lokalen Netzwerk oder einer vergleichbaren Umgebung betrieben. Eine Verwaltung durch einen externen Netzbetreiber findet nicht statt. Es besteht volle Kontrolle über die Implementierung des Servers. Folglich existieren mehr Fehlerquellen, die in einer verwalteten Umgebung nicht vorhanden sind.

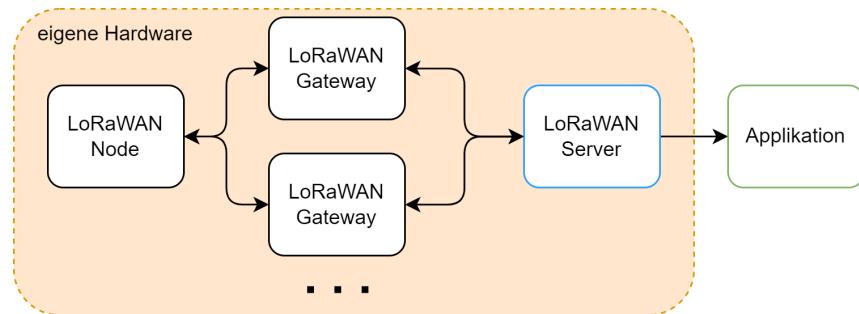


Abbildung 3.5.: Lokales LoRaWAN-Netzwerk

Den LNS in Eigenverantwortung einzurichten, stellt eine große Herausforderung dar und setzt umfangreiche LoRaWAN-Kenntnisse voraus. Der Wartungsaufwand ist entsprechend hoch. Updates müssen manuell verwaltet, auftretende Fehler manuell behoben werden. Die Liste möglicher Fehlerquellen im gesamten Netzwerk wird folglich durch den LNS erweitert.

Anpassbarkeit und Flexibilität sind die größten Vorteile dieses Netzwerkkonzepts. Selbst Kernelemente des LNS wie der ADR-Algorithmus sind anpassbar. Extern verwaltete öffentliche und private Netzwerkserver werden ausschließlich in Cloud-Ressourcen betrieben. Mit dieser Art von Netzwerken ist die Wahl der Umgebung frei, was einen Betrieb z.B. auf lokalen Ressourcen innerhalb eines Unternehmensnetzwerks ermöglicht.

3.3. Netzwerkserver

Die Anbindung an externe Anwendungen ist auch hier abhängig von der eingesetzten Lösung. Sollte der LNS in einem abgeschotteten Unternehmensnetzwerk installiert sein, ist die Anbindung an Cloud-Dienste möglicherweise erschwert. Die Netzwerkumgebung bestimmt die mögliche Anwendungsanbindung.

In Bezug auf Sicherheit ist zu erkennen, dass sich der Nutzer hier in der Rolle des Netzbetreibers befindet. Damit ist er eigener „Herr der Daten“. In jedem betrachteten Fall wurde eine Aktivierung mittels OTAA oder ABP unterstützt.

Neben kostenpflichtigen LNS-Abbildern ist *ChirpStack* als kostenfreie Open-Source Alternative vorzufinden. Soll der LNS auf eigener Hardware installiert werden, sind Wartung und Betrieb weitere Kostenfaktoren.

Kein LoRaWAN-Netzwerkserver

Eine Alternative zu den vorhergehenden Konzepten ist der Verzicht auf den Netzwerkserver. In diesem Szenario besitzt das Gateway, anstelle des LNS, die Session-Keys der Nodes und ist so in der Lage, eingehende LoRaWAN-Pakete dieser Geräte zu entschlüsseln.

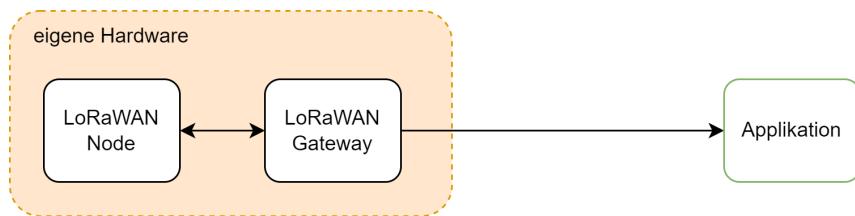


Abbildung 3.6.: Kein LoRaWAN-Netzwerkserver

Technisch ist das Konzept als die einfachste Lösung einzustufen (keine Installation und Einrichtung eines LNS). Es gehen jedoch einige Vorteile von LoRaWAN verloren. Die Erweiterung durch die Installation weiterer Gateways ist nicht trivial. Grund ist die fehlende Deduplizierung. Ist eine Node bei mehreren Gateways registriert, leitet jedes dieser Gateways die Pakete an die Anwendung weiter. Auch der Wartungsaufwand steigt. Statt einer zentralen Verwaltung der Gateways und Nodes im

3.3. Netzwerkserver

Netzwerkserver muss zur Verwaltung jedes einzelne Gateway manuell aufgerufen werden.

Anpassungsmöglichkeiten sind auf Grund der fehlenden Netzwerk-Verwaltungsebene nicht möglich. Durch den fehlenden LNS sind Kernfunktionen wie ADR oder OTAA nicht einsetzbar.

Je nach Netzwerkanbindung ist eine Integration der Daten möglich. Beide vorhandenen Gateways könnten entschlüsselte Pakete über MQTT weiterführenden Anwendungen zur Verfügung stellen.

Da OTAA als Aktivierungsmethode entfällt, muss sichergestellt werden, dass jedes Gateway vor fremdem Zugriff geschützt ist. Grund sind die dort abliegenden Session-Keys der Nodes. Sollen die Schlüssel öffentlich bekannt werden, kann jede Person im Sendegebiet ein Gateway aufstellen und die Einstellungen übernehmen. So könnten Uplinks entschlüsselt und Downlinks gesendet werden. Aus diesem Grund ist ein LoRaWAN-Netzwerk ohne Netzwerkserver als die unsicherste Variante einzuordnen.

Da kein Netzwerkserver benötigt wird, verursacht ausschließlich die Hardware Kosten. Bezogen auf den Netzwerkserver handelt es sich hierbei um das günstigste Konzept.

Fazit

Auf Grundlage der vorhergehenden Erläuterungen ist ein direkter Vergleich der Konzepte möglich. Tabelle 3.3 arbeitet die Unterschiede anhand festgelegter Kriterien auf.

Für die Umsetzung der Tests und einen späteren Betrieb wurde sich für das Konzept des privaten Netzwerks entschieden. Ausschlaggebend ist die eigene Auswahl und Positionierung der Gateways und der geringe Installations- und Wartungsaufwand.

Die Ergebnisse der Untersuchung lassen die Einschätzung zu, dass ein privates Netzwerk eine ideale Lösung für Unternehmen darstellt, die LoRaWAN im unternehmenseigenen Umfeld einzusetzen wollen. Die zentrale Verwaltung des Netzwerks ermöglicht den Aufbau und die Verwaltung eines Unternehmensnetzes, welches sich über mehrere Standorte erstrecken kann.

3.3. Netzwerkserver

Tabelle 3.3.: LNS Konzeptauswahl

Kriterium	Öffentlicher LNS	Privater LNS	Lokaler LNS	Kein LNS
- Installation und Einrichtung	10/10	7/10	3/10	10/10
- Wartungsaufwand	10/10	8/10	1/10	5/10
- erwartetes Fehleraufkommen	10/10	8/10	3/10	5/10
Technische Komplexität (Umsetzbarkeit)	30/30	23/30	7/30	20/30
Anpassbarkeit, Flexibilität	5/20	15/20	20/20	0/20
Anbindung an Datenbank/Anwendung	20/20	20/20	10/20	10/20
- Aktivierungsmöglichkeiten	OTAA, ABP	OTAA, ABP	OTAA, ABP	ABP
Sicherheit	15/20	18/20	20/20	10/20
Kosten	4/10	5/10	8/10	10/10
Gesamt	74	81	65	50

3.3.2. Lösungsauswahl

Zum Zeitpunkt der Ausarbeitung bieten eine Vielzahl von Netzwerkanbietern einen privaten LNS an. Nach umfangreicher Recherche wurden drei Lösungen ausgewählt, welche im Folgenden verglichen werden. Sie gehören zu den bekanntesten Vertretern aus diesem Bereich.

Als erste Lösung wird *The Things Stack (TTS) Cloud* vorgestellt. TTI ist das entwickelnde Unternehmen. Es existieren Serverstandorte in Europa, Australien und den USA [TTI22b]. Daten aus dem LoRaWAN-Netzwerk können in Cloud-Lösungen (z.B.

3.3. Netzwerkserver

AWS, Microsoft Azure, Google Cloud Plattform) integriert werden. Auch plattformunabhängige Integrationen durch Standard-Schnittstellen sind möglich. Beispiele sind MQTT und Webhooks. Die Dokumentation ist umfangreich und stellt neben LNS-spezifischen Informationen eine große allgemeine LoRaWAN-Wissensdatenbank dar. Als SAAS ist keine Wartung des LNS auf Nutzerseite notwendig und die Bedienung kann als intuitiv bezeichnet werden. Kostenpunkt sind 190€ pro Monat für 1000 Geräte ohne technischen Support-Plan.

LORIOT ist ein weiterer Anbieter eines privaten LNS. Eine große Anzahl an Servern soll eine geringe Latenz in der Kommunikation sicherstellen. Die Regionen EMEA, Asien und Amerika besitzen jeweils mehrere Serverstandorte [LORA]. Es bestehen vielfältige Integrationsmöglichkeiten in Cloud-Lösungen und durch Standard-Schnittstellen wie MQTT [LORB]. Da eine vollständige SAAS Lösung eingesetzt wird, ist mit wenig Wartungsaufwand zu rechnen. Eine umfangreiche Dokumentation inklusive LoRaWAN-Wissensdatenbank und proprietären Dokumenten ist vorhanden. Im Gespräch mit Carles Gramage (Business Developer bei LORIOT) stellte sich heraus, dass LORIOT private LNS auf mehrere Arten bereitstellt. Sowohl eine lokale Installation als auch der Betrieb innerhalb der Cloud-Infrastruktur von LORIOT ist möglich. Auch zu voraussichtlichen Kosten wurde eine Aussage getroffen. So ist in der einfachsten Umgebung (keine Redundanz) mit einmaligen Installationskosten von 3.000€ zu rechnen. Im laufenden Betrieb werden rund 400-500€ pro Monat fällig. Die ausfallsicherste und performanteste Lösung bei vielen Nodes ist mit ca. 10.000€ für die Installation und 900€ monatlich erhältlich. Laut Gramage eignet sich diese Art des LNS für Telekommunikationsanbieter oder Länder, welche LoRaWAN im großen Stil einsetzen möchten. Die genannten Kosten sind nicht öffentlich einsehbar und wurden von Gramage zur groben Einordnung genannt.

AWS IoT Core for LoRaWAN stellt die dritte Möglichkeit eines privaten LNS dar. Die Integration des Netzwerkservers in die Cloud-Plattform soll „externe“ Anbieter überflüssig machen, da eine vollständige IoT Lösung auf einer Plattform realisiert werden kann. Es ist eine direkte Integration in andere AWS-Dienste und über Standard-Schnittstellen wie MQTT möglich. Die Dokumentation ist weniger umfangreich als bei den vorab genannten Lösungen. Ein bestehendes Grundverständnis von

3.4. Netzwerkinstallation und Tests

LoRaWAN und AWS ist für eine erfolgreiche Nutzung des Service notwendig. AWS verfolgt ein Kostenmodell nach dem Prinzip „Pay-as-you-go“. Dies bedeutet, dass ausschließlich genutzte Ressourcen berechnet werden. In einer Beispiel-Kostenrechnung⁶ mit 50 zu verbindenden Geräten sind 0,56 USD monatliche Kosten zu erwarten. In diesem Szenario werden pro Monat und pro Gerät 4320 Nachrichten ausgetauscht (6 pro Stunde). Dabei löst jede Nachricht, welche schätzungsweise 10 kB groß ist, eine weiterführende Aktion aus (z.B. Verbreitung über MQTT). Je mehr Geräte Nachrichten senden, desto mehr Kosten werden generiert.

Im Vergleich der vorgestellten Lösungen stellt sich heraus, dass *TTS Cloud* und LORIOTs LNS einen SAAS-Ansatz verfolgen, während AWS mit *IoT Core for LoRaWAN* den LNS als Plattform bereitstellt. Jede genannte Lösung ist laut Anbieter für den Einsatz im professionellen Bereich vorgesehen. *AWS IoT Core for LoRaWAN* grenzt sich durch Kostenmodell und Einsatzort deutlich von den beiden Anderen ab. Es wird vermutet, dass sich die Netzwerkserver in ihren technischen Details unterscheiden. Fehlende öffentliche Dokumente diesbezüglich erschweren einen Vergleich.

Für die weitere Verwendung wird *AWS IoT Core for LoRaWAN* gewählt. Hauptkriterium sind die anfallenden Kosten. Die Kontingente der Netzwerkserver mit fest vorgegebenen Kosten werden mit den wenigen vorliegenden Geräten schlicht nicht ausgenutzt. Weitere Unterschiede werden als marginal angesehen.

3.4. Netzwerkinstallation und Tests

Vorhergehende Kapitel liefern die Grundlage für einen physischen Netzwerkaufbau. Es soll erforscht werden, inwiefern LoRaWAN in der in 3.2.2 identifizierten, für Funktechnologien sehr herausfordernden Umgebung eingesetzt werden kann. Für Versuchsaufbauten steht die in 3.2.1 aufgelistete Hardware zur Verfügung. Dabei werden die drei *Dragino LHT65 Temperatur und Luftfeuchtigkeitssensoren* als Nodes und das *Dragino DLOS8 Outdoor Gateway* genutzt. Die letzte Node, welche zum

⁶Durchgeführte Kostenschätzung: <https://calculator.aws/#/estimate?id=c0b77391f6c2b5101db10adcd6d620b3a6049ecc>

3.4. Netzwerkinstallation und Tests

Übermitteln von Stromzählerständen eingesetzt werden soll, wird nicht in den Versuchsaufbauten eingesetzt. Grund ist die örtliche Bindung an einen Stromzähler mit S0-Schnittstelle. Für verschiedene Versuche sollen die Nodes an unterschiedlichen Stellen installiert werden, was örtliche Flexibilität voraussetzt.

Für die Bewertung von LoRaWAN müssen im Voraus Leistungskriterien und Erwartungen an das Netzwerk festgelegt werden. Die Paketankunftsrate, im weiteren Verlauf Packet Delivery Rate (PDR) genannt, stellt den prozentualen Anteil erfolgreich übermittelter Pakete dar [CNL20]. Die Grundlage zur Berechnung des PDR ist in Formel 3.1 dargestellt. Je höher der Wert, desto stabiler ist die Funkübertragung. Niedrige Werte bedeuten, dass viele Pakete auf der Funkübertragungsstrecke „verloren gehen“.

$$PDR [\%] = 100 \times \frac{n \text{ (Anzahl erhaltener Nachrichten)}}{n^* \text{ (Anzahl erwarteter Nachrichten)}} \quad (3.1)$$

RSSI, SNR und SF werden für jeden Uplink protokolliert. Es ist die Erwartung, dass mit zunehmender Entfernung vom Gateway die PDR, der SNR und der RSSI abnehmen. Um dies auszugleichen, sollte der durch ADR angepasste SF zunehmen, was zu einer Verbesserung des PDR führen sollte. Insgesamt werden im Außenbereich durch den großen Anteil von reflektierendem Baumaterial mittelmäßige, im Innenbereich sehr gute PDRs erwartet.

Die durch die Temperatursensoren ermittelten Werte sollen zeigen, ob eine Abhängigkeit zwischen PDR und Temperatur besteht. Während der Literaturrecherche konnte keine Aussage gefunden werden, welche auf diesen Aspekt eingeht.

3.4.1. Outdoor-Versuchsaufbau

Der erste Versuchsaufbau soll das Verhalten des LoRaWAN Netzwerks bestimmen, wenn das Gateway auf dem Dach eines zentral gelegenen Gebäudes installiert wird. Mit Hilfe der für die Gebäudetechnik verantwortlichen Abteilung kann ein Standort bestimmt werden, in welchem der Betrieb des Gateways möglich ist. Der festen

3.4. Netzwerkinstallation und Tests

Installation und damit dem Versuch über mehrere Tage wird ein temporärer Versuchsaufbau am selben Standort vorangestellt. Er dient der Generierung erster Erfahrungen bezüglich Netzqualität, Reichweite und Durchdringung im Rahmen eines nutzerbasierten Reichweitentests [LSL19].

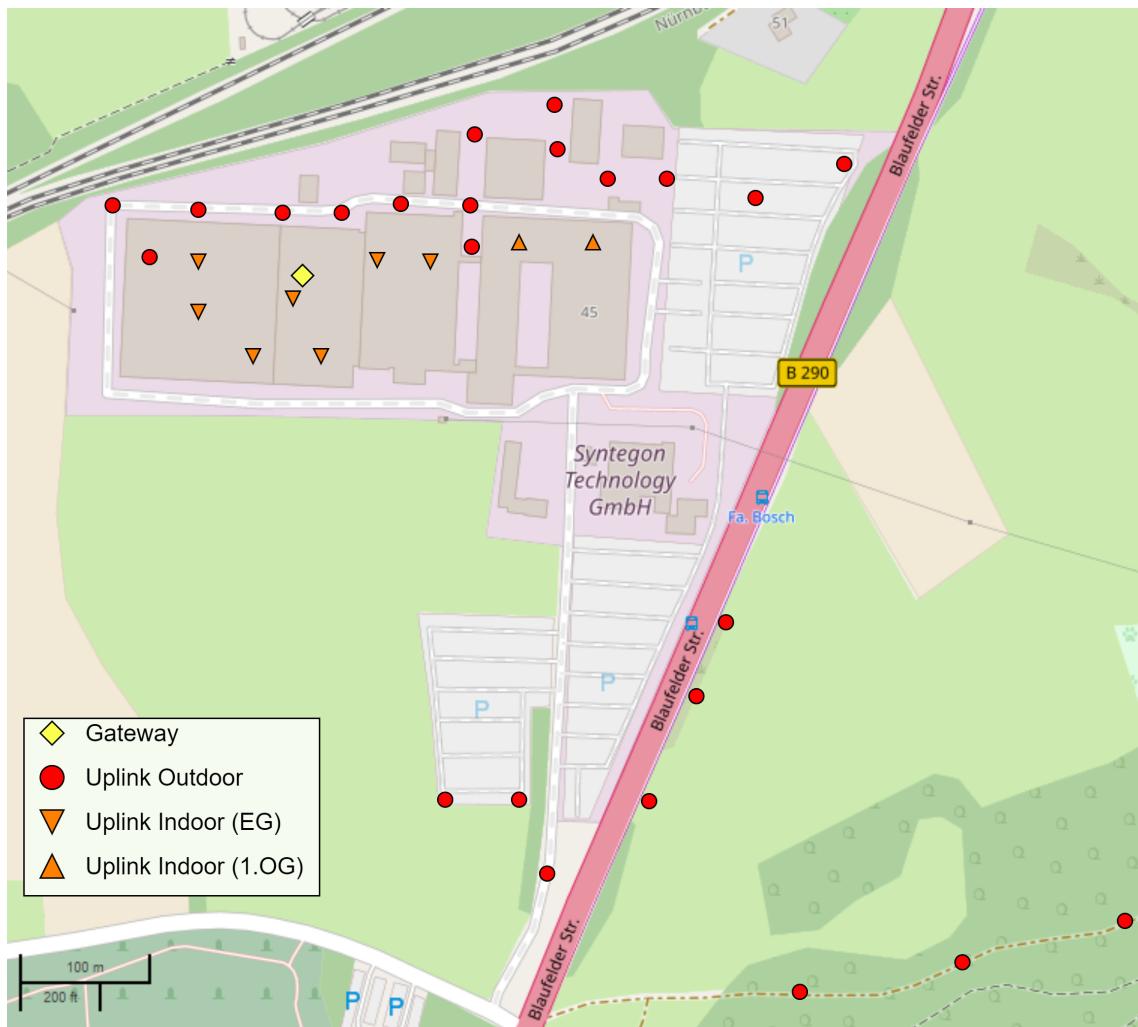


Abbildung 3.7.: Nutzerbasierter Reichweitentest mit Gateway im Außenbereich

Eine LHT65-Node wird manuell dazu genutzt, über den Standort verteilt Übertragungen zu generieren. Das Endgerät befindet sich zu jedem Zeitpunkt in der Hand der testenden Person. Auf der technischen Seite sendet die Node mit der höchsten Datenrate. Der Beitritt erfolgt vorab mittels OTAA in direkter Umgebung des Gate-

3.4. Netzwerkinstallation und Tests

ways. Abbildung 3.7 zeigt das Ergebnis des nutzerbasierten Reichweitentests. Dieser und alle im Folgenden genutzten Kartenausschnitte gehen aus den Abbildungen in Anhang C hervor. Jeder eingetragene Punkt steht für eine erfolgreiche Übertragung.

Das Gateway ist an der Position der gelben Raute auf dem Dach installiert. Rote Punkte stehen für Übertragungen im Außenbereich oder auf dem Dach. Dreiecke signalisieren den Innenbereich, wobei ein nach unten zeigendes Dreieck das Erdgeschoss und der Gegensatz das erste Obergeschoss darstellt.

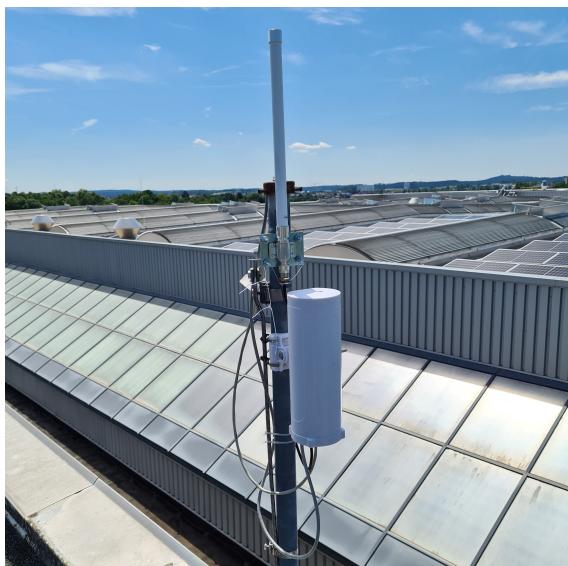


Abbildung 3.8.: Installiertes Gateway mit Antenne im Außenbereich

Auffällig ist die Abwesenheit erfolgreicher Übertragungen südöstlich des Gateways. Dies lässt sich durch die Positionierung erklären. Es ist an der westlichen Seite einer rechteckigen Erhöhung auf dem Dach angebracht. Abbildung 3.8 zeigt diese Position mit Blick in südöstliche Richtung. Nachträglich betrachtet hätte der Einsatz eines höheren SF im Bereich ohne erfolgreiche Uplinks möglicherweise zu einem besseren Ergebnis geführt. Es ist trotzdem festzustellen, dass viele erfolgreiche Übermittlungen stattfinden.

Die Durchführung des Tests an anderen Orten wäre mit viel zeitlichem Aufwand verbunden, da spezifische Netzwerk-Anforderungen bestehen. Aus diesem Grund wird die Position für den Versuchsaufbau als hinreichend angesehen.

3.4. Netzwerkinstallation und Tests

Positionierung der Hardware

Die Position des Gateways (Abbildung 3.8) steht durch den vorangestellten Reichweitentest bereits fest.

Die Position der Nodes ist so festzulegen, dass unterschiedliche Aspekte der Funkübertragung betrachtet werden. Daher wurde sich dazu entschieden, eine Node im Außenbereich und zwei im Innenbereich zu installieren. Im Innenbereich wird in der Entfernung unterschieden. Eine Node soll in großer Entfernung vom Gateway agieren, während die Zweite räumlich näher befestigt wird. Abbildung 3.9 zeigt die Verteilung der Hardware. Node 1 und 2 sind im Innenbereich auf Erdgeschoss-Ebene ca. 1 Meter erhöht installiert. Node 3 ist an einer Sitzmöglichkeit im Außenbereich angebracht.

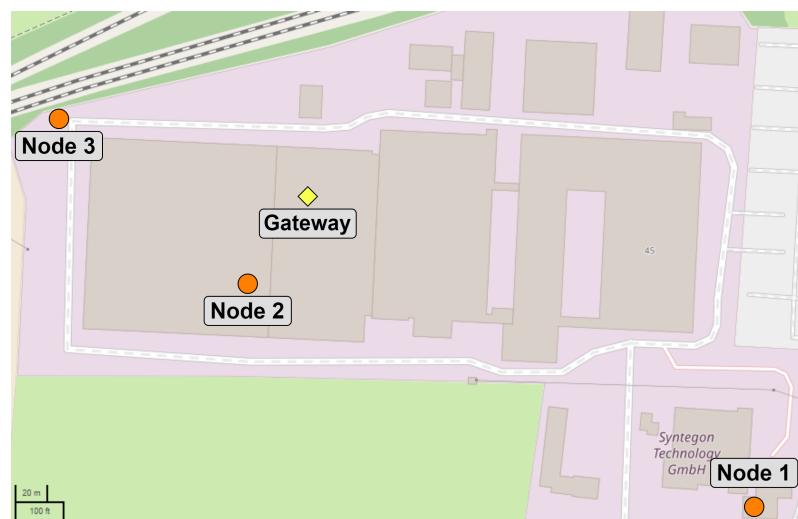


Abbildung 3.9.: Standorte für den Versuchsaufbau im Außenbereich

Der Versuchsaufbau soll über 14 Tage bestehen. Die Aktivierung der Nodes findet am 15.06.2022 um 12:30 (UTC) statt. Das Versuchsende ist auf den 29.06.2022 um 23:59 (UTC) datiert.

Auswertung

Zu keinem Zeitpunkt war die Verbindung des Gateways zum Netzwerkserver unterbrochen. Erreicht ein Uplink den Netzwerkserver nicht, ist dies auf die Funkübertragung

3.4. Netzwerkinstallation und Tests

über LoRa zurückzuführen.

Um ein Gefühl für die Performance des installierten LoRaWAN-Netzwerkes zu erhalten, werden die täglichen Uplinks miteinander verglichen. Abbildung 3.10a zeigt, dass starke tägliche Schwankungen vorliegen. Dabei agiert Node 1 auf dem niedrigsten Level mit maximal sieben Uplinks pro Tag. Node 2 und 3 unterscheiden sich weniger stark. Es ist trotzdem erkennbar, dass mehr Pakete von Node 3 den Netzwerkserver erreichen.

Die Übertragungsintervalle der Nodes sind bekannt. Alle 20 Minuten wird ein Paket gesendet. So ist es möglich die Performance der Nodes mit dem Optimum zu vergleichen. An einem Tag sind bei 20 Minuten zwischen den Uplinks maximal 72 Uplinks möglich:

$$\frac{24 \times 60 \text{ min}}{20 \frac{\text{min}}{\text{Uplink}}} = 72 \text{ Uplinks}$$

Am initialen Versuchstag ist die maximale Uplink-Anzahl geringer, da der Versuch nicht um Mitternacht startete. Abbildung 3.10b stellt den Uplinks der Nodes ihr Optimum gegenüber. Es ist erkennbar, dass die Kennlinie des Optimums einen sehr großen Abstand zu denen der erfolgreichen Übermittlungen besitzt.

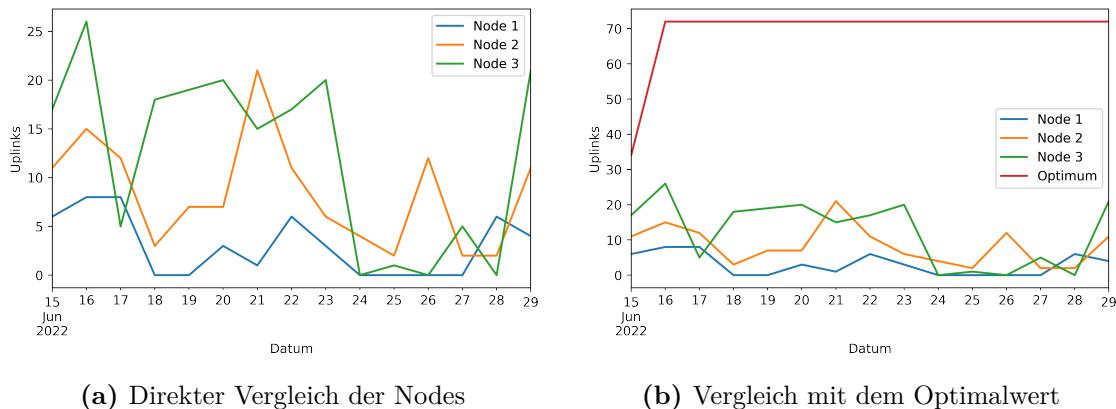


Abbildung 3.10.: Outdoor Versuchsaufbau: Übermittelte Pakete der Nodes im Vergleich

Die Abbildungen aus 3.10 allein sind nicht aussagekräftig. Es fehlt der Bezug zu technischen Übertragungsparametern. Durch ADR soll die Datenrate stets angepasst werden, um einen Kompromiss zwischen erfolgreichen Übertragungen und Energie-

3.4. Netzwerkinstallation und Tests

nutzung zu finden. Daher findet in Abbildung 3.11 eine Auswertung des PDR bezogen auf den genutzten SF statt.

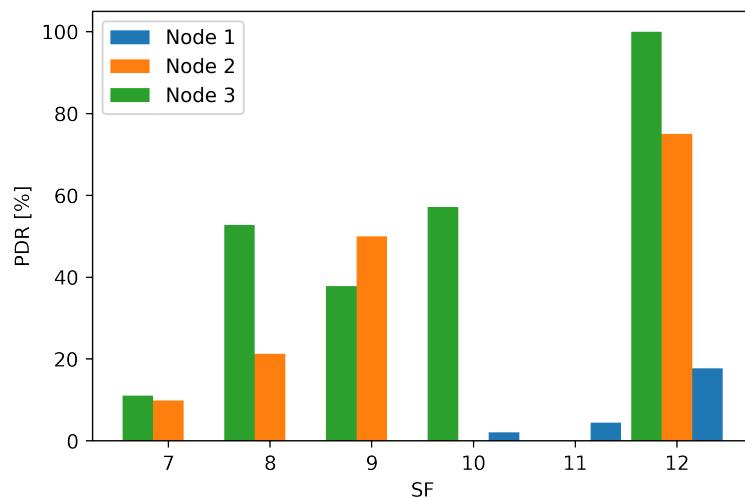


Abbildung 3.11.: Outdoor Versuchsaufbau: PDR in Abhängigkeit des genutzten SF

Wie erwartet führt ein höherer SF im Allgemeinen zu einer besseren PDR. Da es sich bei der PDR um einen relativen Wert handelt, werden in Tabelle 3.4 die absoluten Zahlen offengelegt. Aus ihr geht hervor, dass ein starkes Ungleichgewicht in übermittelten Paketen pro SF besteht. Besonders die PDRs der SFs, in welchen wenige Pakete gesendet werden (Anzahl erwarteter Uplinks), besitzen eine geringe Aussagekraft. Die Lösung für dieses Problem besteht darin, den Versuchsaufbau über einen längeren Zeitraum aufrecht zu erhalten. Dies ist durch den begrenzten Bearbeitungszeitraum jedoch nicht umsetzbar.

Mit großem Abstand wurden die meisten Pakete bei einem geringen SF übertragen, obwohl dies zu geringen PDRs führt. Darauf aufbauend ist fraglich, warum keine geringere Datenrate für eine deutlich bessere Performance verwendet wurde. Eine Node besitzt schließlich die Aufgabe, den SF durch den ADR-Algorithmus entsprechend nach oben anzupassen. Dies ist jedoch nicht geschehen, was in Abbildung 3.12 deutlich wird. Uplinks sind in dieser Abbildung durch Kreis dargestellt. Der SF wird immer dann auf zwölf zurückgesetzt, wenn die Node lange keine Verbindung zum

3.4. Netzwerkinstallation und Tests

Tabelle 3.4.: Outdoor-Versuchsaufbau: Anzahl an Uplinks je SF (erfolgreiche Uplinks/erwartete Anzahl Uplinks)

Spreading Factor	Node 1	Node 2	Node 3
SF7	0/0	85/860	93/843
SF8	0/0	34/160	65/120
SF9	0/0	4/8	14/37
SF10	3/144	0/0	8/14
SF11	16/357	0/0	0/0
SF12	25/141	3/4	3/3

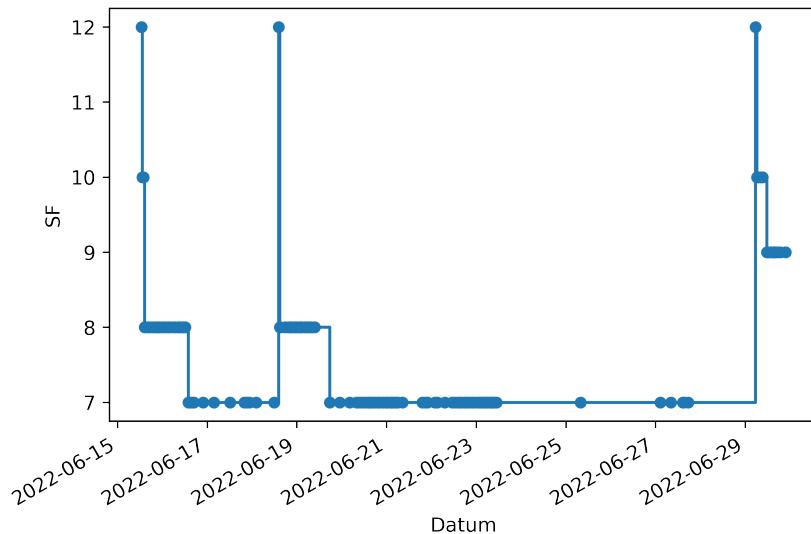
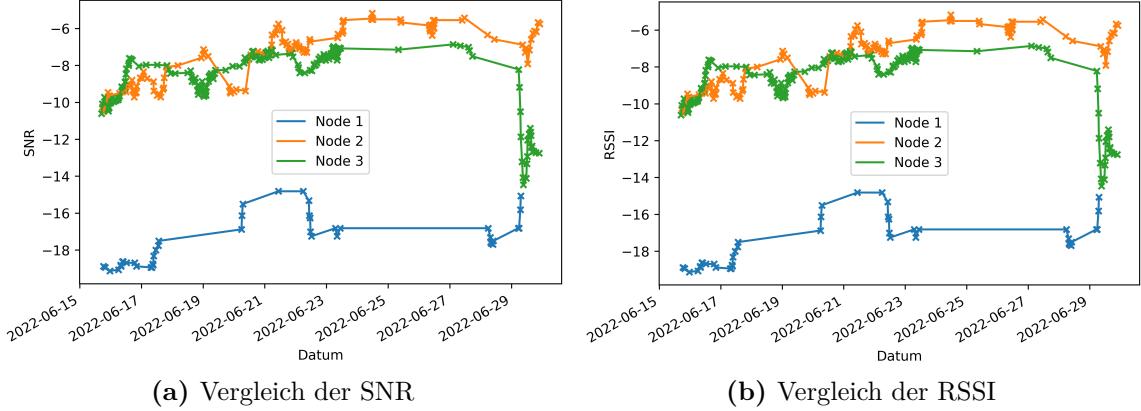


Abbildung 3.12.: Outdoor Versuchsaufbau: Verlauf des genutzten SF am Beispiel von Node 3

Gateway aufbauen konnte und aus diesem Grund ein neues Join-Verfahren beginnt. Der Netzwerkserver passt die Datenrate an. Sollte sie zu hoch eingestellt sein, setzt sie die Node wider Erwarten nicht zurück. So findet ein massiver Verfügbarkeitsverlust statt, was sich in den Uplinks (siehe 3.10) widerspiegelt. Eine Rücksprache mit AWS als Netzwerkbetreiber bestätigte die Erkenntnisse und schloss einen Fehler im LNS aus. Es ist festzustellen, dass sich die Nodes nicht wie erwartet verhalten. ADR wird

3.4. Netzwerkinstallation und Tests

daher in weiteren Versuchsaufbauten deaktiviert und ein konstanter SF festgelegt.



(a) Vergleich der SNR

(b) Vergleich der RSSI

Abbildung 3.13.: Outdoor Versuchsaufbau: SNR und RSSI der Nodes

Ein weiterer Auswertungsaspekt ist die Empfangsqualität der Funkübertragungen. Die Abbildungen aus 3.13 zeigen die Verläufe des SNR und RSSI je Node. Dabei sind die einzelnen Uplinks durch Kreuze in den jeweiligen Farben dargestellt. Zur Übersichtlichkeit werden die Punkte der Uplinks interpoliert. Es ist auffällig, dass in beiden Abbildungen fast einheitliche Kurvenverläufe vorzufinden sind. Der Grund für dieses Verhalten liegt im Aufgabengebiet beider Werte. Sie bilden die Empfangsqualität der Uplinks am Gateway ab. Node 1 weist in beiden Graphen deutlich geringere Empfangsqualitäten auf als die Nodes 2 und 3. Damit bewahrheitet sich die vorab getroffene Erwartung, dass größere Entfernung und mehr Störeinflüsse bei der Übertragung eine negative Auswirkung auf die Empfangsqualität besitzen.

Da im Außenbereich die größten Temperaturschwankungen auftreten, wird das Verhalten von LoRaWAN in Abhängigkeit von der Temperatur an Node 3 betrachtet. Abbildung 3.14 zeigt, dass keine starke Abhängigkeit von Temperatur und Uplinks besteht. Im Bereich von 5 °C bis 35 °C sind bei jeder Temperatur Übertragungen vorzufinden. Folglich ist LoRaWAN im betrachteten Fall nicht temperaturabhängig.

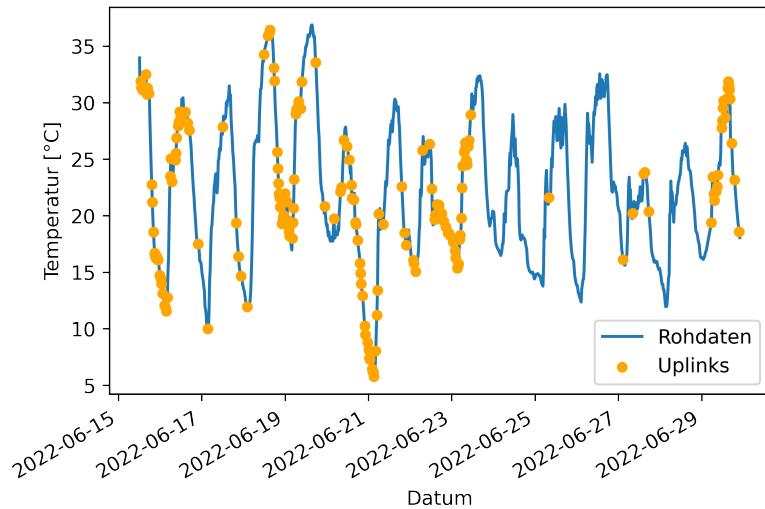


Abbildung 3.14.: Outdoor Versuchsaufbau: Uplinks in Abhängigkeit von der Temperatur am Beispiel von Node 3

Fazit

Insgesamt ist festzustellen, dass ein Gateway in der ausgewählten Position nicht in der Lage ist, den gesamten Standort oder die Montagehalle zufriedenstellend abzudecken. Besonders bei Nodes im Innenbereich und auf weitere Entfernung sind die Übertragungsraten ungenügend.

3.4.2. Indoor-Versuchsaufbau

Ein zweiter Versuchsaufbau soll die Abdeckung mit einem Gateway im Innenbereich feststellen. Dabei wird als Testumgebung die Werkshalle betrachtet. Wie in 3.2.2 beschrieben sind viele Stahl- und Metallelemente vorzufinden. Im gesamten Bereich werden Verpackungsmaschinen montiert, welche sich in ihrer Form und Höhe unterscheiden.

3.4. Netzwerkinstallation und Tests

Positionierung der Hardware

Es wird versucht, das Gateway so hoch wie möglich zu installieren. Studien zeigen, dass dies eine bessere Übertragungsqualität gewährleistet [FL18]. Da in der Werkshalle mit einer geringen Anzahl kabelgebundener Netzwerkzugänge gearbeitet wird, begrenzt sich die Positionierung des Gateways auf wenige Stellen. Ohne Netzwerkzugang kann das Gateway empfangene Uplinks nicht an den LNS weiterleiten. Schlussendlich wird es an einem Gerüst in einer Ecke der Halle auf ca. 5,20 m Höhe installiert. Abbildung 3.15 zeigt das Gateway mit Blick in die Werkshalle hinein. Die Position bietet die Möglichkeit, unterschiedliche Entfernung bis zur maximal möglichen Distanz (Diagonale der Halle) zu testen.



Abbildung 3.15.: Installiertes Gateway mit Antenne im Innenbereich

Die drei Nodes zur Generierung der Uplinks werden über die Halle verteilt an Stützpfählen in unterschiedlichen Höhen angebracht. Node 1 befindet sich auf 2,30 m, Node 2 auf 3 m und Node 3 auf 2,80 m Höhe. Abbildung 3.16 zeigt die Standorte auf. Die angegebenen Strecken sind die direkte Entfernung zwischen Gateway und der jeweiligen Node aus der Vogelperspektive. Hellgrüne Flächen stellen einen Maschinen-Montageplatz und damit ein Hindernis für die Funkübertragung dar.

3.4. Netzwerkinstallation und Tests

Die Positionen wurden unter dem Gesichtspunkt festgelegt, dass die Grenzen der Übertragung im Innenbereich sichtbar werden sollen. Node 1 besitzt die größte Entfernung und ist am niedrigsten installiert. Node 3 kreuzt die meisten Montageplätze. Der Versuch soll den Einfluss dieser Eigenschaften beurteilen.

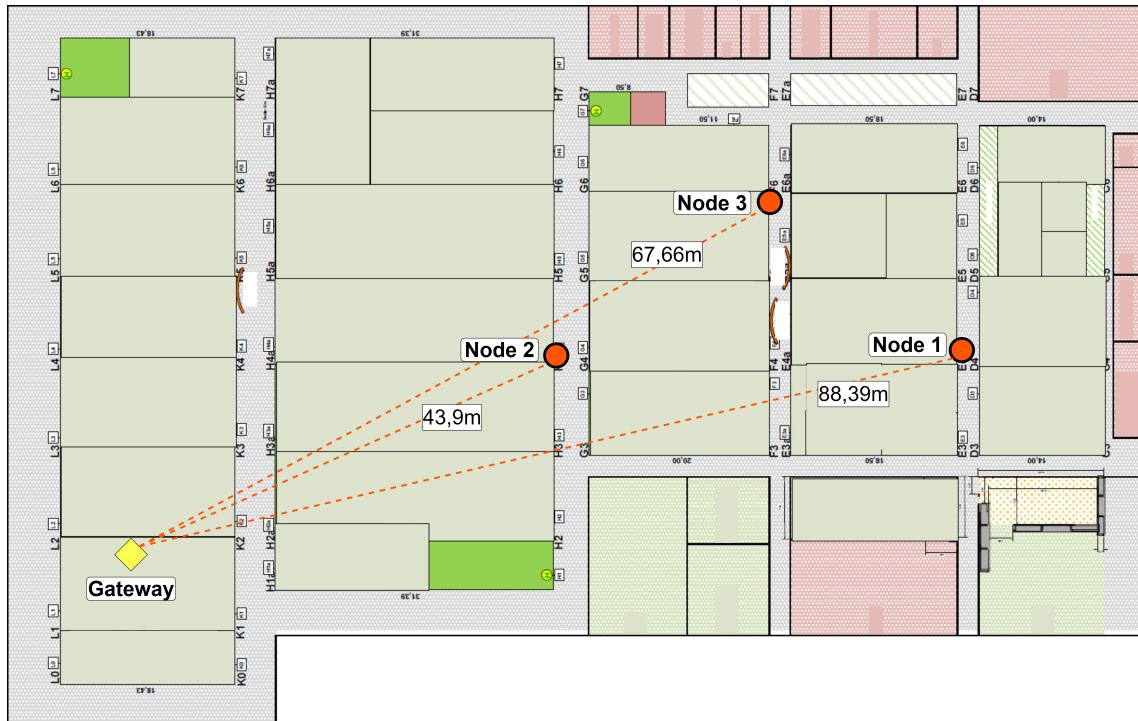


Abbildung 3.16.: Standorte für den Versuchsaufbau im Innenbereich

Der Versuchsaufbau soll über so viele Tage bestehen, bis stabile Aussagen über die Funkverbindung getroffen werden können. Die Aktivierung der Nodes findet am 14.07.2022 um 07:15 (UTC) statt. Durch ein stetiges Monitoring der Übertragungen wird das Versuchsende auf den 21.07.2022 um 12:00 (UTC) festgelegt.

Auswertung

Für eine erste Einschätzung wird die Anzahl der Uplinks dem Optimalwert von 100 % erfolgreichen Übertragungen gegenübergestellt (Abbildung 3.17). Start- und Endtag gehen nicht vollständig in den Versuch ein, daher weicht der Optimalwert an diesen Tagen ab. Die Grundlage der Berechnung ist in 3.4.1 auffindbar.

3.4. Netzwerkinstallation und Tests

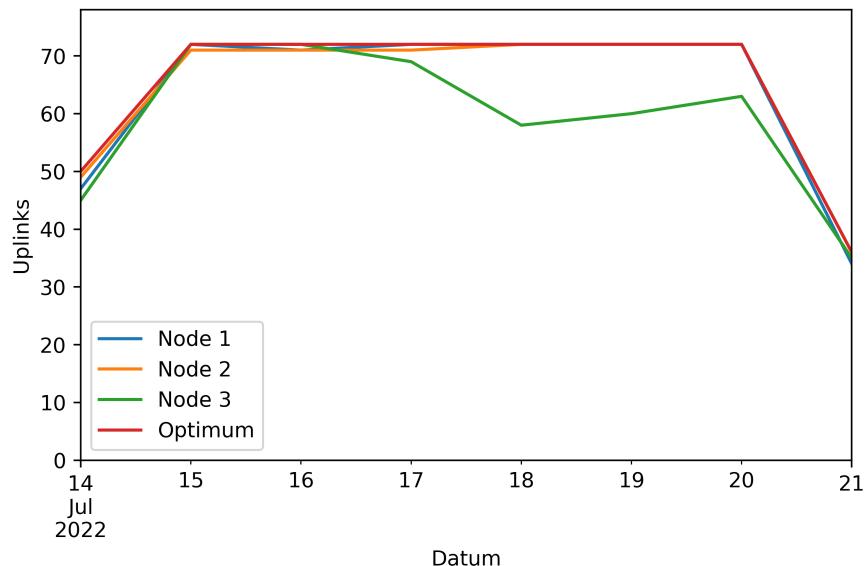


Abbildung 3.17.: Indoor Versuchsaufbau: Übermittelte Pakete der Nodes im Vergleich (inklusive Optimalwert)

Es ist deutlich erkennbar, dass die Kurven der Nodes sehr nah an oder auf der Optimalkurve liegen. Die Anzahl der Uplinks von Node 3 verringert sich mit dem Beginn der Woche. Es wird vermutet, dass dies auf die steigende Anzahl von Störeinflüssen auf die Funkübertragung zurückzuführen ist. Node 1 zeigt fast keine Abweichungen vom Optimum auf.

Abbildung 3.18 stellt die PDRs der Nodes gegenüber. ADR ist deaktiviert, keine der Nodes überträgt eine Nachricht mit einem SF größer als sieben. Einzige Ausnahme ist die Join-Nachricht mit SF12. Die absolute Verteilung der Uplinks ist in Tabelle 3.5 dargestellt. Node 1 und 2 besitzen eine PDR von rund 99 %, während Node 3 eine Nachricht zu 91 % erfolgreich übermittelt.

Trotz konstanter Umweltbedingungen im Innenbereich wird die LoRa-Funkübertragung durch Störeinflüsse (z.B. andere Funkübertragungen) zeitweise beeinflusst. Dies wird durch Node 3 und ihre Anzahl von Uplinks an Wochentagen in Vergleich zum Wochenende deutlich. Die durch ADR und die verschiedenen SFs gegebene Flexibilität bietet die Grundlage zeitweilige Störeinflüsse in LoRaWAN zu kompensieren. Da ADR auf Grund der fehlerhaften Implementierung (siehe 3.4.1) deaktiviert ist, konnte in diesem Versuch keine automatische Anpassung stattfinden.

Tabelle 3.5.: Indoor Versuchsaufbau: Anzahl an Uplinks je SF (erfolgreiche Uplinks/erwartete Anzahl Uplinks)

Spreading Factor	Node 1	Node 2	Node 3
SF7	511/517	513/518	473/517
SF12	1/1	1/1	1/1

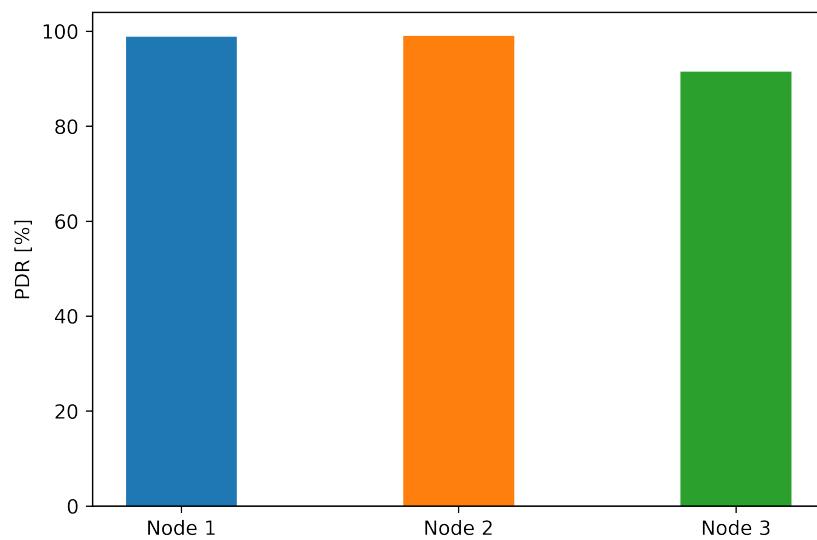


Abbildung 3.18.: Indoor Versuchsaufbau: Paketankunftsichten der Nodes mit SF7

Node 1 und ihre große Entfernung hat keinen bzw. nur einen geringen Einfluss auf die Ankunftsrate der Nachrichten. Deutlicher ist der Einfluss der mehreren Hindernisse bei Node 3 sichtbar.

Fazit

Das Fazit für den Einsatz von LoRaWAN im Indoor-Bereich in einer anspruchsvollen, industriellen Umgebung fällt positiv aus. Bei geringstem SF und verschiedenen Hindernissen werden PDR von über 90 % erreicht. Der Einsatz eines höheren SF könnte diese Kennzahl auf eine Übertragungsrate von annähernd 100 % verbessern. LoRa-

3.4. Netzwerkinstallation und Tests

WAN für IIoT Anwendungen wird daher als geeignet eingeordnet. Es ist trotzdem festzuhalten, dass LoRaWAN abhängig von Umgebung und Einsatzzweck ist. Ohne ausreichende Planung und Tests können die Ergebnisse in vergleichbaren Umgebungen stark abweichen. Der Unterschied zwischen Outdoor- und Indoor-Versuchsaufbau stellt dies deutlich dar.

3.4.3. Übertragung von Maschineninformationen

Ein IIoT Use-Case ist das Abbilden von Maschineninformationen zur Darstellung oder weiteren Auswertung. Dieser Abschnitt soll erläutern, wie diese Informationen über LoRaWAN übertragen werden können.

Umsetzung

Da bei LoRaWAN die Frequenz der Übertragungen eine Rolle spielt, werden Maschineninformationen in zwei Kategorien unterteilt. Die erste Kategorie bildet alle Werte mit Änderungen in kurzen Zeitabständen ab. Beispiele sind Objektzähler. Es ist meist nicht möglich, jede Wertänderung zu übermitteln. Sollten mehrere hundert Änderungen innerhalb kurzer Zeit auftreten, wäre der Duty-Cycle schnell überschritten. In der zweiten Kategorie sind die Werte zu finden, welche über längere Zeiträume gleich bleiben. Ein Beispiel ist der aktuelle Status einer Maschine (aktiv/nicht aktiv). Eine Übertragung kann, bei Beachtung des Duty-Cycles, zu jedem Event stattfinden. In dieser Kategorie ist es wichtig, dass Uplinks erfolgreich sind. Sollten viele Pakete verloren gehen, führen die fehlenden Events zu einer falschen Darstellung.

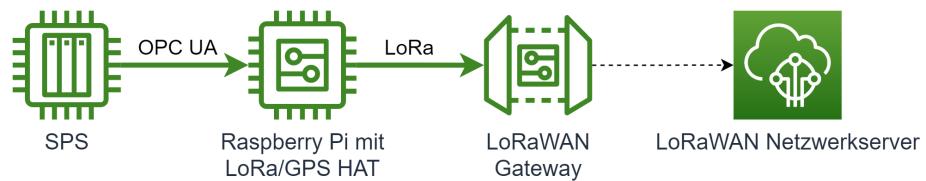


Abbildung 3.19.: Architektur für das Senden von Maschineninformationen über LoRa-WAN

3.4. Netzwerkinstallation und Tests

In der praktischen Umsetzung soll der in 3.2.1 aufgeführte *Raspberry Pi 4* über OPC UA Maschineninformationen erhalten und diese über LoRaWAN versenden (siehe Abbildung 3.19). Dafür wird er über seine GPIO-Pins mit dem *LoRa/GPS HAT* verbunden. Ausgangspunkt der Daten ist die SPS, welche die aktuellen Maschineninformationen hält.

Zur Umsetzung der Anforderungen wird die Programmiersprache Python verwendet. Sie zeichnet sich durch eine Vielzahl von Modulen für unterschiedlichste Anwendungsfälle aus. Ein OPC UA Client [Pyt16] und eine LoRaWAN-Implementation für den *LoRa/GPS HAT* [com] sind in Python vorhanden. Der Verbindungsauflauf zu einem OPC UA Server ist nach korrekter Konfiguration von Authentifizierung und Verschlüsselung möglich. Die Dokumentation der Entwickler zeigt hierfür Beispiele. Auch das Abrufen bestimmter Variablen kann erfolgen. Der RPi ist somit in der Lage, zuverlässig Maschinendaten abzurufen.

Im zweiten Schritt ist die Kommunikation über LoRaWAN herzustellen. Mit Hilfe eines GitHub-Repositorys [com] wird die Hardware so konfiguriert, dass ein Netzwerkbeitritt stattfinden kann. Nach Festlegung der LoRaWAN-spezifischen Geräteidentifikation kann der RPi im LNS registriert werden. Somit ist ein Beitrag in Reichweite eines zum Netzwerk gehörigen Gateways möglich.

Im Test ist der Beitrag über OTAA sofort erfolgreich und ein „Hallo Welt“ Paket wird übermittelt. Nach einiger Zeit wird der Vorgang ohne Erfolg wiederholt. Selbst im gleichen Versuchsaufbau ist keine Verbindung mehr möglich. Der Kontakt mit dem Hersteller lieferte keine Lösung. Test-Skripte zur Überprüfung der Hardware existieren nicht und weiterer Support ist nicht vorhanden. Aus diesen Gründen und nach Rücksprache mit einem Betreuer dieser Arbeit wird von einem Hardware-Defekt ausgegangen. Die vollständige Übertragungskette von Maschineninformationen über LoRaWAN ist so nicht darstellbar. Der Defekt wird erst im späteren Verlauf der Ausarbeitung identifiziert. Ein Nachbestellen der Hardware ist daher aus zeitlichen Gründen nicht möglich.

Umsetzung einer Alternativlösung

Um trotz des Hardwaredefekts praktische Erfahrungen zu sammeln, wird eine der Test-Nodes in einem geschlossenen Schaltschrank und in großer Entfernung zum Gateway installiert. Abbildung D.1 im Anhang zeigt die Position der Node und des Gateways aus der Vogelperspektive. Die abgebildete Umgebung entspricht den Beschreibungen aus 3.4.2. Da die Entfernung groß ist und viele reflektierende Elemente zwischen Node und Gateway liegen, wird der SF vor Untersuchungsbeginn auf 12 gesetzt.

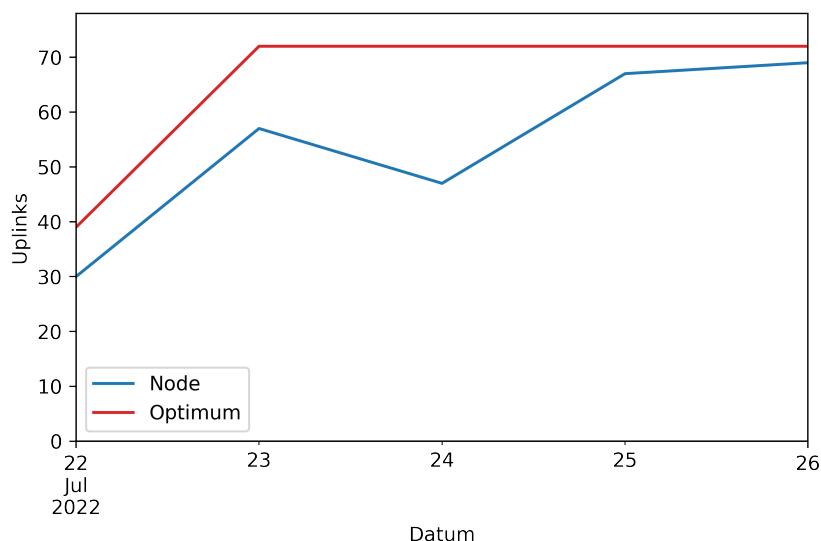


Abbildung 3.20.: Uplinks einer Node im geschlossenen Schaltschrank und mit großer Entfernung zum Gateway im Vergleich zum Optimalwert

Abbildung 3.20 stellt die erfolgreich übertragenen Pakete dar und stellt sie dem Optimalwert erfolgreicher Übertragungen gegenüber. Es ist deutlich zu erkennen, dass viele Pakete ihr Ziel erreichen. Die PDR beträgt 82,6 % (270 tatsächliche Uplinks zu 327 erwarteten Uplinks) und liegt so auf einem hohen Level.

Die praktische Anwendung zeigt, dass LoRaWAN auch in extrem anspruchsvollen Umgebungen mit akzeptablen Ergebnissen eingesetzt werden kann.

3.5. Entwicklung einer LoRaWAN-Anwendung

Fazit

Auch wenn die Anforderung nicht vollständig umgesetzt werden konnte, gehen einige Erkenntnisse daraus hervor. Der Einsatz von LoRaWAN zur Übertragung von Maschineninformationen ist grundsätzlich möglich. Abstand zwischen Node und Gateway, Frequenz der Datenänderungen und allgemeine Umgebungsbedingungen müssen dafür vorab berücksichtigt werden.

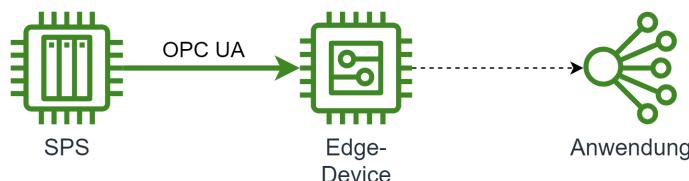


Abbildung 3.21.: Architektur für das Übermitteln von Maschineninformationen über ein Edge-Device

Mit Blick auf Alternativen wird eine Direktanbindung der SPS an ein Edge-Device betrachtet. Schematisch wird dies in Abbildung 3.21 dargestellt. Der direkte Weg über das Edge-Device in die Cloud ist als zuverlässiger einzuschätzen, da speziell für den industriellen Einsatz konzipierte Hard- und Software eine verlustfreie Kommunikation garantieren soll.

Es ist festzuhalten, dass die Stärke von LoRaWAN nicht darin besteht, bestehende Daten von einer SPS zu beziehen. Dafür existieren bereits passendere Lösungen. Vielmehr können Werte von externen Sensoren kabellos übermittelt werden. Das Installieren dieser Sensoren ist durch den geringen Energieverbrauch und nicht vorhandenen Verkabelungsaufwand komfortabler als kabelgebundene Lösungen. Besonders im Bereich der Digitalisierung von Bestandsmaschinen könnten so schnell neue Informationen erhoben werden.

3.5. Entwicklung einer LoRaWAN-Anwendung

Eine vollständige IoT-Lösung benötigt neben Sensoren und Konnektivität eine Ebene der Datenverarbeitung und der grafischen Darstellung (siehe Kapitel 2.2). Dieses

3.5. Entwicklung einer LoRaWAN-Anwendung

Kapitel beschäftigt sich mit den noch fehlenden Elementen.

Die Anwendung soll auf einem System mehrerer Container basieren, welche zentral orchestriert werden. Als Container-Plattform wird Docker [Doc] gewählt. In Zusammenarbeit mit weiteren Entwicklern im Unternehmen werden bereits vorhandene Ressourcen bei den Cloud-Diensten von Microsoft Azure [Mic] genutzt. Die vollständige Container-Lösung wird mittels Kubernetes [The] orchestriert. Da der Fokus dieser Arbeit nicht auf der Containerisierung liegt, wird für weitere Informationen auf die jeweiligen Dokumentationen verwiesen.

Um die Entwicklungszeit der LoRaWAN-Anwendung im angemessenen Rahmen zu halten, werden vordefinierte Container-Images verwendet. Diese müssen zur Nutzung konfiguriert werden. Der große Vorteil ist der geringere Programmieraufwand. Eine Skalierbarkeit der Lösung ist durch die Verwendung von Cloud-Computing gegeben. Das Hinzufügen von Ressourcen ist im Nachgang möglich.

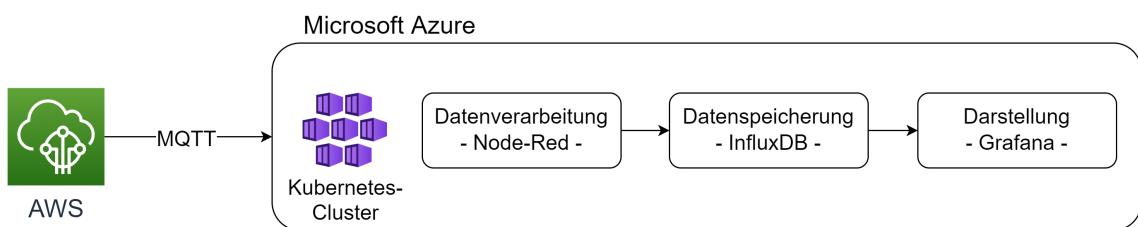


Abbildung 3.22.: Architektur der LoRaWAN-Anwendung

Abbildung 3.22 zeigt die Architektur der angestrebten Lösung auf. Die nachfolgenden Abschnitte gehen genauer auf die einzelnen Teilbereiche der Anwendung ein.

3.5.1. Datenverarbeitung

Die reine Datenverarbeitung beschäftigt sich mit der Informationsextraktion aus eingehenden Nachrichten. So soll auch im Nachgang eine eindeutige Zuweisung von Information zum aufzeichnenden Sensor stattfinden können. Zur Verarbeitung gehört zudem die Persistierung der Informationen, um auf vergangene Werte zugreifen zu können.

3.5. Entwicklung einer LoRaWAN-Anwendung

Die Verarbeitung findet in *Node-Red* statt. *Node-Red* ist ein grafisches Entwicklungs-tool, welches in IoT-Anwendungen eingesetzt werden kann. Über einen MQTT-Client gelangen die im LNS erhaltenen Uplinks zu *Node-Red* und damit in die Entwicklungsumgebung bei Microsoft Azure. Die Base64 kodierten Informationen werden dekodiert und in eine geeignete Struktur zur Speicherung in der Datenbank überführt. Abschließend wird die vorbereitete Information in die Datenbank geschrieben.

Als Datenbankmanagementsystem kommt *InfluxDB* zum Einsatz. Es handelt sich um eine Open Source Zeitreihendatenbank. Diese Art von Datenbank ist auf Zeitreihen optimiert. Beispiele sind Temperaturverläufe oder Sensordaten allgemein. Die Strukturierung der Daten findet in *buckets* und *measurements* statt. Ein *bucket* ist als übergeordneter Bezeichner mehrerer *measurements* anzusehen. Ein *measurement* bildet im vorliegenden Anwendungsfall einen Sensor ab und ist daher als eine abgeschlossene Zeitreihe zu betrachten. Es ist essentiell, dass mit jeder zu speichernden Information ein Zeitstempel übermittelt wird. An diesen Zeitstempel gekoppelt sind die Nutzinformationen abgelegt. So ist es möglich, viele Sensoren mit ihren jeweiligen Werten in Abhängigkeit zur Zeit abzubilden.

3.5.2. Grafische Darstellung

Die gespeicherten Informationen müssen übersichtlich dargestellt werden, um Einblicke in die aufgenommenen Sensorwerte zu erhalten. Die Darstellung der Werte in Form eines Dashboards stellt eine mögliche Lösung dar. Das Dashboard muss die Werte aus der verwendeten Datenbank beziehen können.

Für die Umsetzung wird *Grafana* verwendet. Die Open Source-Anwendung besitzt die Möglichkeit, Daten direkt aus der *InfluxDB* zu beziehen und darzustellen. Ein Element im Dashboard wird als *Panel* bezeichnet. Es existieren verschiedene Visualisierungsmöglichkeiten, welche für ein *Panel* auswählbar sind. Neben Graphen und Histogrammen sind auch Listen und einfacher Text darstellbar. Über eine Schaltfläche kann der betrachtete Zeitraum ausgewählt werden, woraufhin auch eine Anpassung der Darstellungen in den *Panels* stattfindet.

3.5. Entwicklung einer LoRaWAN-Anwendung

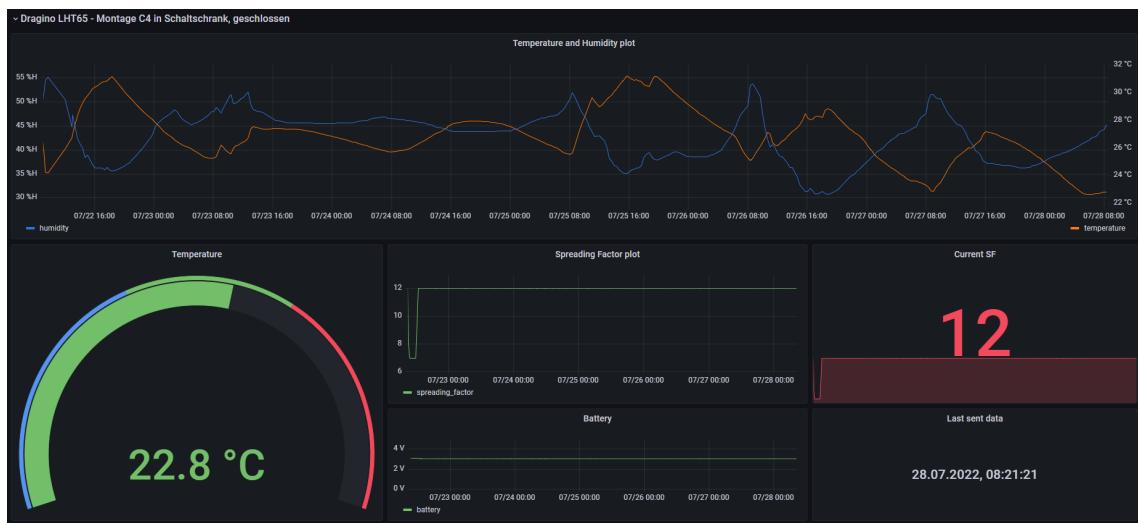


Abbildung 3.23.: Darstellung der Daten einer *Dragino LHT65* Node in *Grafana*

Abbildung 3.23 zeigt eine Möglichkeit der Darstellung einer LoRaWAN-Node. Die Abbildung soll einen Eindruck über die Möglichkeiten im Dashboard verschaffen. Aus diesem Grund sind die Beschriftungen von geringer Bedeutung. Der von oben erste Graph zeigt die Verläufe der Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Darunter folgt links die Abbildung der momentanen Temperatur. Darüber hinaus sind mehrere Graphen zum Batteriezustand und genutzten SF vorhanden und der Zeitpunkt des letzten Uplinks ist dargestellt.

4. Ergebnis und Ausblick

Diese Arbeit setzt sich mit der Technologie LoRaWAN auseinander. Dafür werden die Grundlagen ausführlich betrachtet und mehrere praktische Versuchsaufbauten in realen industriellen Umgebungen umgesetzt.

Die Funktechnologie zeichnet sich durch geringe Energienutzung und hohe Reichweiten aus, was batteriebetriebene Endgeräte in großer Entfernung zu einem Gateway ermöglicht. Dabei ist die Leistung stark abhängig von der Umgebung und Konfiguration des Netzwerks und seinen einzelnen Teilnehmern. Ein Testaufbau im Outdoor-Bereich zeigt, dass LoRaWAN in sehr schwierigen Umgebungen für Funktechnologien an seine Grenzen kommt. Weitere Versuchsaufbauten im Indoor-Bereich betrachten das Verhalten von LoRaWAN in einer Werkshalle. Ein Gateway reicht aus, um mehr als 90 % aller gesendeten Pakete zu empfangen. Daraus wurde abgeleitet, dass LoRaWAN für industrielle Anwendungen genutzt werden kann. Es ist dennoch anzumerken, dass in jedem Test Paketverlust mit unterschiedlichem Ausmaß stattfand.

Pauschale Aussagen zur Leistung von LoRaWAN in realen Anwendungen sind, wie auch bei anderen Funktechnologien, nicht möglich. Als Richtlinie kann festgehalten werden, dass LoRaWAN geeignet sein kann, wenn

- Datenübertragungen in geringer Übertragungsfrequenz stattfinden sollen.
- sich die zu übertragenen Datenmengen im Byte-Bereich befinden.
- der Verlust einiger Übertragungen akzeptabel ist.
- die physische Umgebung den Einsatz von LoRaWAN zulässt.

4. Ergebnis und Ausblick

Es ist kritisch zu betrachten, dass ein Großteil der Hardware von einem Hersteller bezogen wurde. Im Nachhinein wurden einige Mängel festgestellt, was durch eine diverse Herstellerlandschaft möglicherweise hätte vermieden werden können.

Diese Arbeit legt den Grundstein für ein unternehmensweites LoRaWAN-Netzwerk, welches in der Maschinenvernetzung oder Gebäudeautomatisierung zum Einsatz kommen kann. Je mehr das Netzwerk wächst, desto genauer kann die Skalierbarkeit von LoRaWAN betrachtet werden, was einer eigenständigen Untersuchung bedarf. Für diese Arbeit ist abschließend festzuhalten, dass LoRaWAN in industriellen Anwendungen eingesetzt werden kann. Dabei müssen die Ansprüche an das Funknetz mit den bekannten und hier dargestellten Einschränkungen vereinbar sein.

Literaturverzeichnis

- [New15] Jared Newman. *Right Now, The Internet of Things Is Like The Internet Of The 1990s: A world of connected devices are starting to come online. Don't mistake what they do now for what they'll accomplish in the future.* 2015. URL: <https://www.fastcompany.com/3044375/the-future-of-the-internet-of-things-is-like-the-internet-of-the-1990s> (besucht am 01.07.2022).
- [Rol08] W. Rollett. *Strategieeinsatz, erzeugte Information und Informationsnutzung bei der Exploration und Steuerung komplexer dynamischer Systeme.* Komplexe Welt - komplexes Denken. Lit, 2008. URL: <https://books.google.de/books?id=9KV9jCTEYx4C>.
- [Bec+01] Kent Beck u. a. *Manifesto for Agile Software Development.* 2001. URL: <https://agilemanifesto.org/> (besucht am 22.06.2022).
- [LSL19] Marcel Linnemann, Alexander Sommer und Ralf Leufkes. „LoRaWAN“. In: *Einsatzpotentiale von LoRaWAN in der Energiewirtschaft: Praxisbuch zu Technik, Anwendung und regulatorischen Randbedingungen.* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, S. 25–39.
- [DD20] Mallesham Dasari und Samir Das. *Wireless and Mobile Networks: IoT/Sensor Networks (LoRa & LoRaWAN).* 2020. URL: <https://www3.cs.stonybrook.edu/~mdasari/courses/cse570/lora.pdf> (besucht am 07.06.2022).
- [Mag] Magenta IoT Business. *NB-IoT: Wie Unternehmen mit NB-IoT heute das Morgen gestalten: Whitepaper.* URL: https://www.magenta.at/content/dam/magenta_at/pdfs/business/iot/iot/Magenta-Business-Whitepaper-NB-IoT.download.pdf (besucht am 24.08.2022).
- [PJJ19] Sakshi Popli, Rakesh Kumar Jha und Sanjeev Jain. „A Survey on Energy Efficient Narrowband Internet of Things (NB-IoT): Architecture, Application and Challenges“. In: *IEEE Access* 7 (2019), S. 16739–16776.
- [Sig] Sigfox. *Sigfox.* URL: <https://www.sigfox.com/en> (besucht am 23.06.2022).

- [LPP19] Lavric Alexandru, Petrariu Adrian I. und Popa Valentin. „SigFox Communication Protocol: The New Era of IoT?“ In: *2019 International Conference on Sensing and Instrumentation in IoT Era (ISSI)*. 2019, S. 1–4.
- [Com+19] Florian Laurentiu Coman u. a. „Security Issues in Internet of Things: Vulnerability Analysis of LoRaWAN, Sigfox and NB-IoT“. In: *2019 Global IoT Summit (GIoTS)*. 2019, S. 1–6.
- [mio] mioty alliance. *mioty*. URL: <https://mioty-alliance.com/> (besucht am 23. 06. 2022).
- [Fra] Frauenhofer IIS. *mioty: Die drahtlose IoT-Technologie*. URL: <https://www.iis.fraunhofer.de/de/ff/lv/net/telemetrie.html> (besucht am 23. 06. 2022).
- [WW10] Rolf H. Weber und Romana Weber. *Internet of things: Legal perspectives*. 1. Aufl. Bd. 49. Publikationen aus dem Zentrum für Informations- und Kommunikationsrecht der Universität Zürich. Zürich und Berlin: Schulthess and Springer, 2010. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-642-11710-7.pdf> (besucht am 11. 06. 2022).
- [OAA21] Asabia Omoniyi, Oludele Awodele und Adenrele Afolorunso. „A Survey of IoT trends and use cases American Journal of Computer Sciences and Applications (ISSN: 2575-775X)“. In: (2021).
- [HS19] Stefan Hoppe und Jürgen Schreier. *Was ist OPC UA? Definition, Architektur und Anwendung: IoT-Basics*. 2019. URL: <https://www.industry-of-things.de/was-ist-opc-ua-definition-architektur-und-anwendung-a-727188/> (besucht am 22. 06. 2022).
- [GR18] Sarath Chandu Gaddam und Mritunjay Kumar Rai. „A Comparative Study on Various LPWAN and Cellular Communication Technologies for IoT Based Smart Applications“. In: *2018 International Conference on Emerging Trends and Innovations In Engineering And Technological Research (ICETIETR)*. 2018, S. 1–8.
- [WS16] Andrianto Adi Wibowo und Muhammad Suryanegara. „On developing the model of Smart Logistic Transport in Indonesia“. In: *2016 IEEE International Conference on Management of Innovation and Technology (ICMIT)*. 2016, S. 99–104.
- [Sem19a] Semtech. *LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview*. 2019. URL: <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/> (besucht am 07. 06. 2022).

Literaturverzeichnis

- [ETSa] ETSI - Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen. *ETSI EN 300 220-1*. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300200_300299/30022001/03.01.01_60/en_30022001v030101p.pdf (besucht am 07. 06. 2022).
- [ETSb] ETSI - Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen. *ETSI EN 300 220-2*. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300200_300299/30022002/03.02.01_60/en_30022002v030201p.pdf (besucht am 07. 06. 2022).
- [Bun18] Bundesnetzagentur. *Allgemeinzuteilung von Frequenzen zur Nutzung durch Funkanwendungen geringer Reichweite (SRD)*. Hrsg. von Bundesnetzagentur. 2018. URL: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Allgemeinzuteilungen/FunkanlagenGeringerReichweite/2018_05_SRD_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=7 (besucht am 07. 06. 2022).
- [Sen19] Pradeeka Seneviratne. „Introduction to LoRa and LoRaWAN“. In: *Beginning LoRa Radio Networks with Arduino: Build Long Range, Low Power Wireless IoT Networks*. Berkeley, CA: Apress, 2019, S. 1–22.
- [Obe19] Gerald Oberschmidt. *Grundlagen der Übertragungstechnik: Vorlesung an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg, Karlsruhe: Kurs: Tel16NT*. Karlsruhe, 2019. URL: https://dualplus.ibdrigo.de/ueb_19/uebertragung.pdf (besucht am 09. 06. 2022).
- [NR15] D. Nalineswari und N. Rakesh. „Link budget analysis on various terrains using IEEE 802.16 WIMAX standard for 3.5 GHz frequency“. In: *2015 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*. 2015, S. 1–5.
- [Ade+17] Ferran Adelantado u. a. „Understanding the Limits of LoRaWAN“. In: *IEEE Communications Magazine* 55.9 (2017), S. 34–40.
- [TTIa] TTI - The Things Industries. *Regional Parameters*. URL: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/regional-parameters/> (besucht am 07. 06. 2022).
- [LoR19] LoRa Alliance. *RP002-1.0.0 LoRaWAN Regional Parameters*. 2019. URL: <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp002-1-0-0-lorawan-regional-parameters> (besucht am 10. 06. 2022).

Literaturverzeichnis

- [TTIb] TTI - The Things Industries. *Spreading Factors*. URL: <https://www.thethingsnetwork.org/docs lorawan/spreading-factors/> (besucht am 07.06.2022).
- [TTIc] TTI - The Things Industries. *RSSI and SNR*. URL: <https://www.thethingsnetwork.org/docs lorawan/rssi-and-snr/> (besucht am 24.06.2022).
- [Wer17] Martin Werner. *Nachrichtentechnik : Eine Einführung für alle Studiengänge / von Martin Werner*. SpringerLink Bücher. Springer Vieweg, 2017. URL: <https://login.ezproxy-dhma.redi-bw.de/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat08845a&AN=bkm.1653921994&lang=de&site=eds-live>.
- [Bur96] A.G. Burr. „The multipath problem: an overview“. In: *IEE Colloquium on Multipath Countermeasures*. 1996, S. 1/1–1/7.
- [GM20] Helmut Günther und Volker Müller. „Die klassische Theorie des Doppler-Effektes – Schallwellen“. In: *Doppler-Effekt und Rotverschiebung: Klassische Theorie und Einsteinsche Effekte*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020, S. 5–14.
- [TTId] TTI - The Things Industries. *Duty Cycle: Fair Use Policy*. URL: <https://www.thethingsnetwork.org/docs lorawan/duty-cycle/#fair-use-policy> (besucht am 07.06.2022).
- [Wor22] Working Group Wireless Communications for Machines. *Handbook of Wireless Communications Technologies for Mechanical and Plant Engineering*. Hrsg. von VDMA - Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. 17.05.2022. URL: <https://vdma.org/viewer/-/v2article/render/51757218> (besucht am 06.07.2022).
- [LoR15] LoRa Alliance Technical Marketing Workgroup. *LoRaWAN: A technical overview of LoRa and LoRaWAN*. 2015. URL: <https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/what-is-lorawan.pdf> (besucht am 07.06.2022).
- [TTIe] TTI - The Things Industries. *LoRaWAN Architecture*. URL: <https://www.thethingsnetwork.org/docs lorawan/architecture/> (besucht am 13.06.2022).
- [Hax+18] Jetmir Haxhibeqiri u. a. „A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application“. In: *Sensors* 18.11 (2018). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/11/3995> (besucht am 24.08.2022).

- [Per18] Lea Perry. *Internet of Things for Architects*. o. O.: Packt, 2018. URL: <https://learning.oreilly.com/library/view/internet-of-things/9781788470599/> (besucht am 07.06.2022).
- [AWS21] AWS - Amazon Web Services. *Implementing Low-Power Wide-Area Network (LPWAN) Solutions with AWS IoT: AWS Whitepaper*. Hrsg. von AWS - Amazon Web Services. 2021. URL: <https://docs.aws.amazon.com/whitepapers/latest/implementing-lpwan-solutions-with-aws/implementing-lpwan-solutions-with-aws.pdf> (besucht am 13.06.2022).
- [LoR18] LoRa Alliance. *LoRaWAN 1.0.3 Specification*. 2018. URL: <https://resources.lora-alliance.org/home/lorawan-specification-v1-0-3> (besucht am 21.06.2022).
- [LoR20] LoRa Alliance. *LoRaWAN L2 1.0.4 Specification (TS001-1.0.4)*. 2020. URL: <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/ts001-1-0-4-lorawan-l2-1-0-4-specification> (besucht am 21.06.2022).
- [TTI21] TTI - The Things Industries. *ABP vs OTAA*. 2021. URL: <https://www.thethingsindustries.com/docs/devices/abp-vs-otaa/> (besucht am 20.06.2022).
- [Isa+11] Herman Isa u. a. „AES: Current security and efficiency analysis of its alternatives“. In: *2011 7th International Conference on Information Assurance and Security (IAS)*. 2011, S. 267–274.
- [Jia+22] Jiang Chao u. a. „A New-Dynamic Adaptive Data Rate Algorithm of LoRaWAN in Harsh Environment“. In: *IEEE Internet of Things Journal* 9.11 (2022), S. 8989–9001.
- [Sem19b] Semtech. *Understanding the LoRa Adaptive Data Rate*. 2019. URL: https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/Understanding_LoRa_Adaptive_Data_Rate_Downloadable.pdf (besucht am 22.06.2022).
- [Ojo+22] Mike O. Ojo u. a. „Practical Experiences of a Smart Livestock Location Monitoring System Leveraging GNSS, LoRaWAN and Cloud Services“. In: *Sensors* 22.1 (2022). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/1/273>.
- [Dra22] Dragino. *LHT65 Temperature & Humidity Sensor User Manual*. 2022. URL: https://www.dragino.com/downloads/downloads/LHT65/UserManual/LHT65_Temperature_Humidity_Sensor_UserManual_v1.8.5.pdf (besucht am 29.06.2022).

- [SD20] Muhammed Aina'u Shehu und Ucuz Derya. „Comparison of the IoT Platform Vendors, Microsoft Azure, Amazon Web Services, and Google Cloud, from Users' Perspectives“. In: *2020 8th International Symposium on Digital Forensics and Security (ISDFS)*. 2020, S. 1–4.
- [TTI22a] TTI - The Things Industries. *Best Practices*. 18.03.2022. URL: <https://www.thethingsindustries.com/docs/devices/best-practices/> (besucht am 06.07.2022).
- [TTI22b] TTI - The Things Industries. *The Things Stack Cloud*. 09.04.2022. URL: <https://www.thethingsindustries.com/docs/getting-started/cloud-hosted/> (besucht am 12.07.2022).
- [LORA] LORIOT AG. *Log into the Loriot Network Server: Worldwide, publicly accessible, low-latency LoRaWAN servers*. URL: <https://www.loriot.io/login.html> (besucht am 18.07.2022).
- [LORB] LORIOT AG. *Connecting the Internet of Things*. URL: <https://www.loriot.io/> (besucht am 18.07.2022).
- [CNL20] Che Cameron, Wasif Naeem und Kang Li. „Functional Qos Metric For Lorawan Applications In Challenging Industrial Environment“. In: *2020 16th IEEE International Conference on Factory Communication Systems (WFCS)*. 2020, S. 1–6.
- [FL18] Robin Franksson und Alexander Liljegren. „Measuring a LoRa Network: Performance, Possibilities and Limitations“. Bachelorarbeit. Karlskrona, Sweden: Blekinge Tekniska Högskola, 2018. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1219450/fulltext01.pdf> (besucht am 08.06.2022).
- [Pyt16] Python OPC-UA. *OPC-UA Client Class*. 25.01.2016. URL: <https://python-opcua.readthedocs.io/en/latest/client.html> (besucht am 25.07.2022).
- [com] computenodes. *LoRaWAN implementation for dragino HAT: GitHub code repository*. URL: <https://github.com/computenodes/dragino> (besucht am 25.07.2022).
- [Doc] Docker Inc. *Docker*. URL: <https://www.docker.com/> (besucht am 27.07.2022).
- [Mic] Microsoft. *Azure*. URL: <https://azure.microsoft.com/de-de/> (besucht am 27.07.2022).
- [The] The Kubernetes Authors. *Kubernetes*. URL: <https://kubernetes.io/de/> (besucht am 27.07.2022).

Anhang A.

Abhängigkeitsgraph

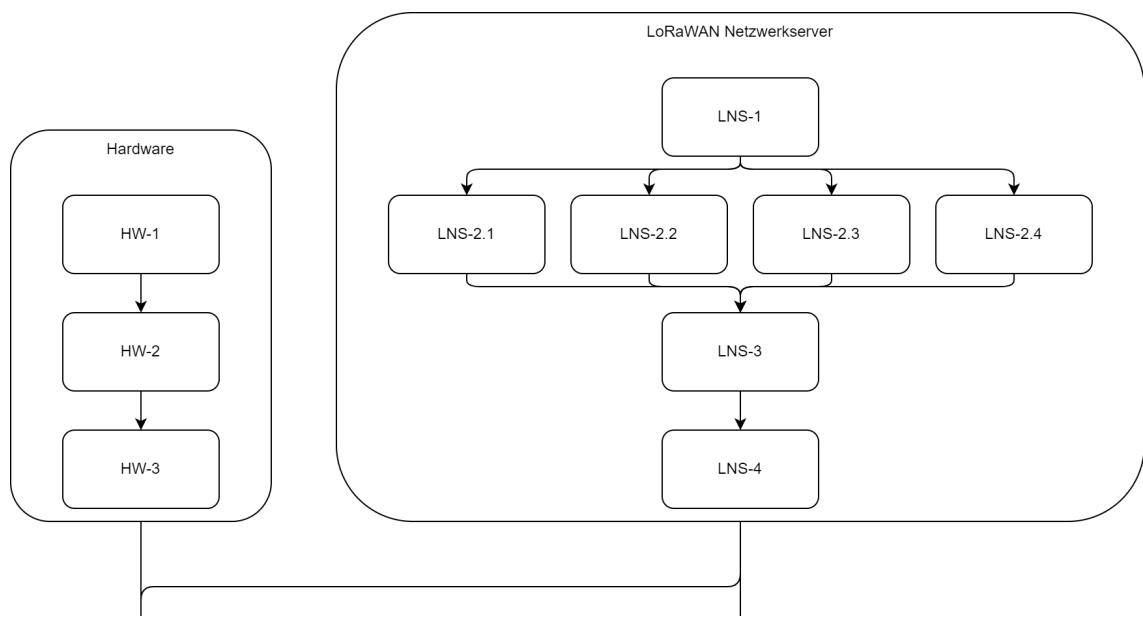


Abbildung A.1.: Projekt-Abhängigkeitsgraph (Teil 1)

Anhang A. Abhängigkeitsgraph

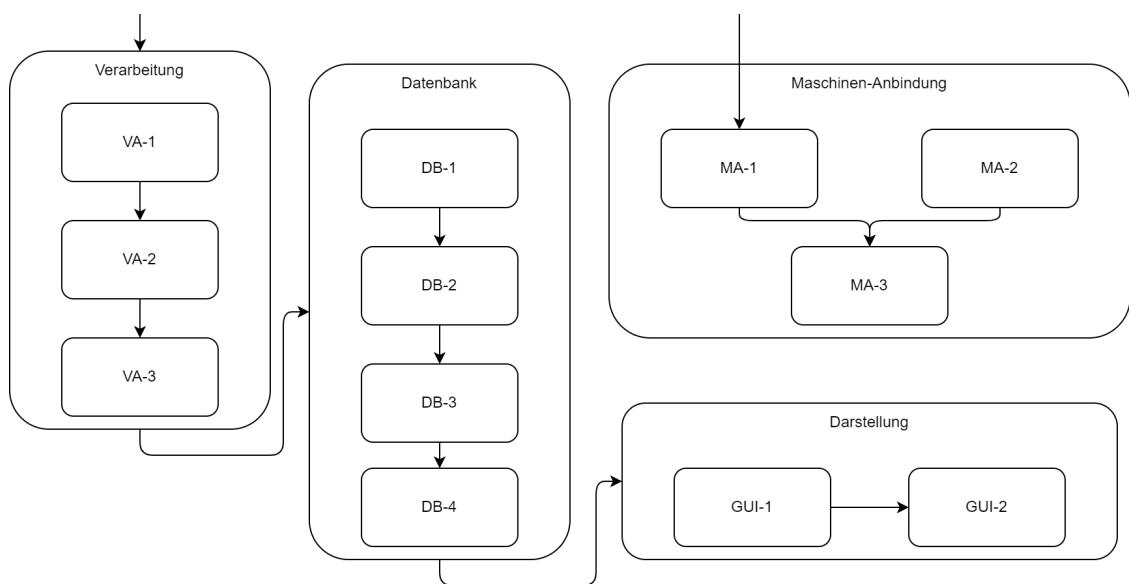


Abbildung A.2.: Projekt-Abhängigkeitsgraph (Teil 2)

Anhang B.

Software und Versionen

Tabelle B.1.: Übersicht Software

Bezeichnung	Entwickler	Cloud-Dienst	Version
IoT Core for LoRaWAN	AWS	Ja	
Azure Cloud	Microsoft	Ja	
TTN	TTI	Ja	
Docker Desktop	Docker	Nein	4.8.2
Node-Red	IBM	Nein	2.2.0
InfluxDB	InfluxData	Nein	2.0.8
Grafana	Grafana Labs	Nein	8.5.0

Anhang C.

Abbildungen zur Standortanalyse



Abbildung C.1.: Detailaufnahme Firmengelände¹

¹Internetlink zum Kartenausschnitt: <https://www.openstreetmap.de/karte/?zoom=18&lat=49.14965&lon=10.07198&layers=B00TT>

Anhang C. Abbildungen zur Standortanalyse



Abbildung C.2.: Einordnung Firmengelände in Umgebung²

²Internetlink zum Kartenausschnitt: <https://www.openstreetmap.de/karte/?zoom=16&lat=49.14878&lon=10.06998&layers=B00TT>

Anhang C. Abbildungen zur Standortanalyse



Abbildung C.3.: Topologische Einordnung³

³Internetlink zum Kartenausschnitt: <https://de-de.topographic-map.com/maps/6j36/Crailsheim/>

Anhang D.

Zusätzliche Abbildungen für Netzwerktests



Abbildung D.1.: Standorte für einen erweiterten Versuchsaufbau im Innenbereich