

Bachelorarbeit

Aleksandr Sultanov

Evaluation einer Ende-zu-Ende-Kommunikation über LoRa
im IoT Umfeld

Aleksandr Sultanov

Evaluation einer Ende-zu-Ende-Kommunikation über LoRa im IoT Umfeld

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Bachelor of Science Technische Informatik
am Department Informatik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Martin Becke
Zweitgutachter: Prof. Dr. Kai von Luck

Eingereicht am: 22. Dezember 2021

Aleksandr Sultanov

Thema der Arbeit

Evaluation einer Ende-zu-Ende-Kommunikation über LoRa im IoT Umfeld

Stichworte

IoT, LoRa, LoRaWAN, IoT-Plattform

Kurzzusammenfassung

Die Entwicklung sowie der Einsatz von IoT-Technologien benötigen technische Einrichtungen, die es ermöglichen, dass Geräte, Maschinen, Objekte, Prozesse usw. in ein Netzwerk integriert werden können, um unterschiedlichste Anwendungen oder Systeme betreiben zu können. Eine dieser Technologien stellt die sogenannte LoRa-Technologie dar, wobei LoRa in erster Linie zur Übertragung von Daten und Informationen zum Einsatz kommt. Die LoRa-Technologie wird vor allem deshalb gerne verwendet, weil sie vergleichsweise einfach aufgebaut und leistungsstark ist und als sehr kostengünstig gilt.

In der vorliegenden Arbeit werden nach einer umfangreichen Betrachtung theoretischer Aspekte zur LoRa-Thematik zwei Experimente durchgeführt. Mit Hilfe dieser Experimente wird eine Ende-zu-Ende-Kommunikation im IoT-Umfeld evaluiert.

In den beiden Experimenten werden die Anwendungsfälle zum einen eines nicht beweglichen Senders und zum anderen eines winkelbeweglichen Senders betrachtet. Ein nicht beweglicher Sender ist ein LoRa-Endpunkt, dessen Standort im Laufe des Experiments nicht verändert wird. Bei einem winkelbeweglichen Sender handelt es sich um einen LoRa-Endpunkt, welcher auf einem Rad montiert ist und sich nur kreisförmig bewegen kann. Die Daten werden in diesem Fall während des Drehens an ein Gateway übermittelt.

Realisiert werden die beiden Experimente mittels eines durch den Verfasser der Arbeit selbst zusammengebauten Gateways, das mithilfe einer Server-Anwendung die empfangenen Nachrichten speichern und darstellen kann. Die Experimente zeigen auf, dass die Übertragungsqualität bei den nicht beweglichen LoRa-Endpunkten deutlich besser ist als bei den winkelbeweglichen LoRa-Endpunkten.

Aleksandr Sultanov

Title of Thesis

Evaluation of an end-to-end communication via LoRa in the IoT environment

Keywords

IoT, LoRa, LoRaWAN, IoT-Platform

Abstract

The development and use of IoT technologies require technical facilities which allow devices, machines, objects, processes, etc. to be integrated into a network to be able to operate a wide variety of applications or systems. One of these technologies is LoRa technology, whereby LoRa is primarily used for transmitting data and information. LoRa technology is used mainly because its structure is quite simple, powerful, and very cheap.

After extensive consideration of the theoretical aspects of LoRa technology, two experiments are carried out within the scope of the present thesis. These experiments are used to evaluate end-to-end communication within the IoT environment.

The two experiments consider the specific applications of a stationary transmitter and a transmitter with angular adjustment. A stationary transmitter is a LoRa endpoint, the location of which is not changed in the course of the experiment. A transmitter with angular adjustment is a LoRa endpoint that is mounted on a wheel and can only move in circles. In this case, the data is transmitted to a gateway while turning.

Both experiments are carried out by means of a gateway that the author of the thesis himself put together and which can store and display the received messages using a server application. The experiments show that the quality of transmission with the fixed LoRa endpoints is significantly better than with the LoRa endpoints with angular adjustment.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	viii
Listings	ix
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Motivation	3
1.3 Vorgehensweise und Zielsetzung	4
1.4 Aufbau der Arbeit	5
2 Theoretische Grundlagen	6
2.1 Grundlagen Internet der Dinge	6
2.1.1 Definition	6
2.1.2 Funktionsweise	10
2.2 Grundlagen Long Range Wide Area Network	12
2.2.1 Definition	13
2.2.2 Aufbau und Funktionsweise	14
2.2.3 Unterschied zu anderen Technologien	16
2.2.4 Long Range Wide Area Network Alliance	20
3 Forschungsstand	22
3.1 Stand der Technik und verwandte Arbeiten	22
3.1.1 Network Slicing	22
3.1.2 Integration der Multi-Radio-Access-Technologie	24
3.1.3 Integration mit anderen Technologien	26
3.2 Vor- und Nachteile Long Range Wide Area Network	27

4 Experiment	29
4.1 Vorgehensweise des Experiments	29
4.1.1 Beschreibung des ersten Experimentes	33
4.1.2 Beschreibung des zweiten Experimentes	34
4.2 Analyse der Daten	37
4.2.1 Daten des erstens Experimentes	40
4.2.2 Daten des zweiten Experimentes	42
5 Ergebnisse	45
5.1 Interpretation der Ergebnisse	45
6 Schlussfolgerungen	47
6.1 Fazit und Ausblick	47
Literaturverzeichnis	49
Selbstständigkeitserklärung	58

Abbildungsverzeichnis

2.1	Historische Entwicklung des IoT [25]	7
2.2	Verschmelzung der realen und virtuellen Welt [24, S. 8]	11
2.3	Value Cluster mit LoRa-Netzwerk als Basistechnologie [80, S. 650]	14
2.4	LoRa-Netzwerkarchitektur [47, S. 418]	15
4.1	Darstellung des Gateways für das Experiment (Eigene Darstellung)	31
4.2	Arduino Uno mit Dragino Shield [20]	33
4.3	Position des LoRa-Gateways und LoRa-Endpunktes auf dem Gelände während des ersten Experimentes [54]	34
4.4	Wireless Stick von der Firma Helteck (eigene Darstellung)	35
4.5	Darstellung der Montage von Akku, LoRa-Endpunkt und dem Gegengewicht (eigene Darstellung)	36
4.6	Durchführung des zweiten Experiments (Eigene Darstellung)	37

Tabellenverzeichnis

4.1	Aufgenommene Werte beim ersten Experiment (Eigene Darstellung) . . .	40
4.2	Aufgenommene Werte der Nachrichtenübertragung des ersten Experiments (Eigene Darstellung)	41
4.3	Darstellung der Drehzahl und der daraus errechneten Geschwindigkeit (Ei- gene Darstellung)	42
4.4	Aufgenommene Werte beim zweiten Experiment (Eigene Darstellung) . . .	43
4.5	Aufgenommene Werte der Nachrichtenübertragung des zweiten Experi- ments (Eigene Darstellung)	44

Listings

4.1	Darstellung der in Base64 codierten Nachricht (Eigene Darstellung). . . .	31
-----	---	----

1 Einleitung

Das erste Kapitel der vorliegenden Arbeit dient zur Einführung und soll einem Leser einen kurzen Überblick über die Problemstellung und Motivation geben, auf der diese Arbeit beruht. Danach werden in diesem einleitenden Kapitel noch die Vorgehensweise und Zielsetzung sowie der Aufbau der Arbeit dargestellt.

1.1 Problemstellung

Der seit einigen Jahren bekannte Trend des Internet der Dinge (Internet of Things, IoT) bezieht sich auf ein Netzwerk von physischen Objekten, die Internet-Protocol-Adressen (IP-Adressen) für die Konnektivität im Internet sowie für die Kommunikation mit anderen internetfähigen Dingen, Geräten, Objekten oder Systemen nutzen [6]. Hierzu werden im Rahmen des IoT eine ganze Reihe an sehr guten Anwendungen zur Verfügung gestellt, um aus alltäglichen Dingen, Objekten etc. intelligente Geräte zu machen. Diese Objekte müssen neben einer sehr guten Konnektivität auch über ein drahtloses Kommunikationsprotokoll und niedrigen Energieverbrauch verfügen [35].

Aufgrund dieser zum Teil sehr einfach anmutenden Anforderungen hat sich das IoT mittlerweile weit in der heutigen Welt verbreitet. Zudem besitzt es die Fähigkeit, das alltägliche Leben der Menschen zu verbessern und zu vereinfachen. Dank der stetig besser werdenden drahtlosen Technologien kann laut Experten das Konzept des IoT immer mehr Wirklichkeit werden. Die Aktoren, Sensoren oder sensorischen Tags werden in unternehmenskritischen Geräten bzw. Objekten wie Fahrzeuge, Maschinen oder sogar Gebäuden eingesetzt [2].

Aufgrund seiner mittlerweile als einzigartig eingestuften Eigenschaften gewinnt das sogenannte Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) vermehrt an Bedeutung. Das ist vor allem der Fall, weil es über eine flächendeckende Abdeckung, niedrige Kosten, sowie einen sehr geringen Energieverbrauch verfügt [63].

Die besprochenen IoT-Netzwerke benötigen Geräte mit geringem Energieverbrauch, die über eine große Reichweite und über eine variable Datenübertragungsrate verfügen. Das LoRa (Long Range) eignet sich sehr gut für IoT-Anwendungen, weil kleine Datenmengen von einer großen Anzahl an räumlich verteilten Sensoren an Gateways und Cloud-Server übertragen werden können. Hierzu werden vom LoRa Sub-Gigahertz (GHz)-Frequenzen genutzt. Dieser vom LoRa benutzte Frequenzbereich ist im Gegensatz zum überfüllten 2,4 GHz-Spektrum mit sehr guten Übertragungseigenschaften ausgestattet und weist daher weniger Störungen auf [63].

Durch die Verwendung von sogenannten Spreizsequenzen, wie diese im Rahmen des LoRa verwendet werden, wird ermöglicht, dass Übertragungen mit großer Reichweite bei geringem Durchsatz realisiert werden. Hierbei sind in ländlichen Gebieten bei einem Durchsatz von 250 Bits pro Sekunde (bps) in günstigen Fällen sogar Reichweiten von 10 bis 20 Kilometer möglich. Die LoRa-Datenpakete können hierbei zudem, je nachdem, welche Sequenzspreizung verwendet wird, zwischen 59 bis 230 Byte an Daten und Informationen enthalten [77].

Das LoRa stellt ein dediziertes Protokollstack für LoRa-Netzwerke dar, das aufgrund seiner Charakteristik sehr gut IoT-Anwendungen mit Sterntopologien unterstützt. Ein solcher sehr häufig verwendeter Ansatz ermöglicht es, dass LoRa-fähige Endgeräte Daten und Informationen über LoRa-Funk an Gateways übertragen, welche die übertragenen Daten dann an das Internet und an LoRa-Server weiterleiten, wobei die LoRa-Server unter anderem für eine entsprechende Weiterleitung von Daten und Informationen, die Verwaltung des Gateway-Netzwerks sowie für die Gewährleistung der Kommunikationssicherheit zuständig sind [60].

Das LoRa stellt ein Physical Layer (PHY) und Media Gateway Control Protocol (MAC) für hochleistungsfähige Sternnetze mit einer wie schon dargestellten großen Reichweite und geringem Stromverbrauch dar. Für eine entsprechende Standardisierung des LoRa ist die LoRa-Alliance zuständig. Der LoRa-Ansatz verfügt über eine Vielzahl an Vorteilen, wie bspw. die schon angesprochene große Reichweite. In diesem Zusammenhang wird sowohl in der praxisnahen als auch wissenschaftlichen Literatur allerdings auch erwähnt, dass die Reichweite für die Kommunikation sehr stark von der jeweiligen Umgebung oder bestehenden Hindernissen an einem bestimmten Ort abhängig ist [66].

Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit die Frage gestellt, wie sich die Leistungsübertragungsbilanz eines LoRa bei unterschiedlichen Umgebungsverhältnissen in einem IoT Umfeld verändert.

1.2 Motivation

Seit vielen Jahren wird über die Thematik der Digitalisierung nicht nur in zahlreichen Publikationen diskutiert, sondern sie wird auch in der Praxis in zahlreichen Bereichen des alltäglichen Lebens vorangetrieben. Im Rahmen der Digitalisierung werden daher heutzutage viele an das Internet angebundene Dinge, Geräte, Objekte oder Systeme des alltäglichen Lebens intelligenter und übernehmen somit nach und nach Aufgaben, die zuvor von Menschen erledigt werden mussten [88]. Dadurch wird das alltägliche Leben sowohl im privaten als auch im beruflichen Bereich immer automatisierter. Durch diese zum Teil grundlegenden Veränderungen befinden sich viele Sektoren des täglichen Lebens im Wandel. Im Zuge dieses Wandels, der durch die zunehmende Digitalisierung ausgelöst wurde, werden im zunehmenden Maße die Prozesse nicht nur digitalisiert, sondern auch optimiert. Aufgrund dieser Automatisierung und Optimierung von alltäglichen Prozessen verbessern sich sowohl die Lebensqualität als auch die Arbeitsverhältnisse der Menschen [44]. Ein Großteil der heutzutage durch die Digitalisierung realisierbaren Anwendungen ist ohne das IoT sowie Funknetzwerken wie das LoRa nicht mehr vorstellbar [32].

Die Anzahl der Geräte, die im Rahmen von IoT-Netzwerken über das Internet bzw. auf internetbasierten Technologien aufbauen, hat zwischen den Jahren 2015 und 2020 ein enormes Wachstum erfahren. Sie ist in diesem Zeitraum von fünf Millionen auf etwa 23 Millionen Geräte gestiegen [34].

Die Ausbreitung der IoT- und verwandte Technologien stellt vor allem für viele industrielle Projekte ein ausschlaggebendes Kriterium dar, denn die Kosten könnten bei dem Aufbau einer IT-Infrastruktur das Budget von Unternehmen erheblich belasten, wodurch Projekte oftmals nur teilweise umgesetzt werden oder sogar komplett scheitern [10]. Bei der Planung von IoT-Projekten wird hauptsächlich auf die Kosten der einzelnen Endknoten, die dazugehörigen Gateways sowie die entsprechende Server-Infrastruktur geachtet. Zusätzlich müssen bei der Implementierung von IoT-Technologien auch die zukünftigen Wartungskosten berücksichtigt werden [33], die bspw. von der Anzahl und dem Energieverbrauch der einzelnen Endknoten abhängig sind. Diese Endknoten werden typischerweise mittels Batterien mit dem notwendigen Strom versorgt und auch der Batterieaustausch hat Einfluss auf die Kosten [79].

Vor allem für den kommerziellen Bereich werden für eine Ende-zu-Ende-Kommunikation Endpunkte mit LoRa-Chips verbaut, weil diese deutlich kostengünstiger sind als andere Varianten. Diese Endpunkte werden im Rahmen des LoRa in einem energiesparenden

Modus betrieben und besitzen hierbei wie schon dargelegt trotzdem die Fähigkeit, bei guten Umgebungsbedingungen über weite Distanzen Daten zu übertragen [45]. Hinzu kommt auch noch, dass die Datenübertragung im Rahmen der LoRa-Funktechnologie in einem lizenzfreien Frequenzbereich stattfindet. Dadurch wird ein Benutzer dieses Standards nicht dazu gezwungen, einen speziellen Vertrag abzuschließen und ist somit auch nicht von einem bestimmten Anbieter abhängig. Aufgrund dieser Situation verfügt ein Benutzer über die volle Flexibilität in Bezug auf den Aufbau eines eigenen Netzwerks. Dies macht LoRa zu einem sehr starken Konkurrenten auf dem Funkanbietermarkt [8].

Aufgrund all dieser Entwicklungen sollte sich nach Ansicht des Verfassers der vorliegenden Arbeit die Forschung damit auseinandersetzen, ob bei der Verwendung der aktuellen Technologien wie Bluetooth Low Energy, das IoT, Wireless Fidelity (WiFi) usw. die Standards in ausreichendem Maße die Anforderungen erfüllen. Oder ob es mittlerweile an der Zeit ist, sich mit Alternativen auseinanderzusetzen, die speziell für IoT-Technologien geschaffen sind.

1.3 Vorgehensweise und Zielsetzung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden zwei unterschiedliche Methoden der Datenerhebung angewendet. Zunächst wird, damit eine entsprechende theoretische Basis für die Arbeit gelegt werden kann, eine umfangreiche und systematische Literaturrecherche durchgeführt. Diese systematische Literaturrecherche hat das Ziel, für die theoretischen Teile der Arbeit entsprechende Literaturquellen zu sammeln und im Bezug auf die Thematik zu analysieren.

Danach erfolgt im Rahmen des Experimentes der Arbeit eine empirische Untersuchung, in der aus unterschiedlichen LoRa-Kommunikationszentren Übertragungsdaten analysiert und ausgewertet werden.

Das Ziel der vorliegenden Bachelorarbeit liegt in der Evaluation von LoRa-Technologien. Hierzu werden unter anderem die Bandbreite, die Kodierungsrate und der Streufaktor bei unterschiedlichen Anwendungsverhältnissen untersucht. Betrachtet werden hierbei Anwendungsfälle für winkelbewegliche und nicht bewegliche LoRa-Sender. Ein nicht beweglicher Sender ist ein LoRa-Endpunkt, dessen Standort im Laufe des Experimentes nicht verändert wird. Bei einem winkelbeweglichen Sender handelt es sich um einen LoRa-Endpunkt, welcher auf einem Rad montiert ist und sich nur kreisförmig bewegen kann.

Damit diese beiden Anwendungsfälle untersucht werden können, wird im Rahmen der Arbeit ein LoRa-Gateway, das mit Hilfe einer Server-Anwendung die empfangenen Daten abspeichert und diese darstellt, zusammengebaut. Am Ende werden diese Daten und Informationen präsentiert und analysiert.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Bachelorarbeit beinhaltet insgesamt sechs Kapitel und kann zudem in zwei unterschiedliche Abschnitte unterteilt werden, nämlich in einen rein theoretischen Teil, in dem nur Daten aus der Literatur verwendet werden, und einen empirischen Teil, bei dem die Daten aus dem durchgeführten Experiment analysiert und dargestellt werden.

Zu Beginn des ersten Kapitels der Arbeit werden im Zuge einer Einleitung die Problemstellung, Motivation sowie die Vorgehensweise und Zielsetzung dargestellt.

Das zweite Kapitel der Arbeit behandelt die theoretischen Grundlagen, in denen die Grundlagen des Long Range Wide Area Network, des Internet der Dinge, der Unterschied zu anderen Technologien sowie die Thematik der Long Range Wide Area Network Alliance erläutert werden.

Im Zuge des dritten Kapitels wird der aktuelle Forschungsstand bezüglich der behandelten Thematik kurz dargestellt. Hierzu werden in diesem Kapitel der Stand der Technik und verwandte Arbeiten sowie Vor- und Nachteile des Long Range Wide Area Network erörtert.

Kapitel vier, das gleichzeitig den zweiten Abschnitt der Arbeit einleitet, widmet sich dem Experiment mit der Übertragung der Daten in einem LoRa-Netzwerk. In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise des Experiments sowie die Analyse der erstellten Daten dargelegt.

Danach im fünften Kapitel werden auf Basis des im Kapitel vier aufgenommenen Datenmaterials die Ergebnisse dargestellt. Anhand der Ergebnisse werden die Schlüsse aus dem Experiment abgeleitet.

Im abschließenden sechsten Kapitel werden dann noch ein Fazit und Ausblick dargestellt.

2 Theoretische Grundlagen

Im zweiten Kapitel der Bachelor-Thesis werden die theoretischen Grundlagen für die Arbeit dargelegt. Dies geschieht, indem in diesem Kapitel einem Leser der Arbeit die Grundlagen des Long Range Wide Area Networks und des Internet der Dinge nähergebracht werden. Danach werden noch am Ende des Kapitels die Unterschiede zu anderen Technologien sowie die wichtigsten Aspekte der Long Range Wide Area Network Alliance erörtert.

2.1 Grundlagen Internet der Dinge

Im Rahmen dieses Abschnitts der Arbeit werden die Grundlagen des IoT etwas genauer betrachtet. Hierzu wird im Folgenden zunächst einmal der Begriff des IoT beschrieben bzw. definiert. Abschließend wird dann noch kurz die Funktionsweise des IoT beschrieben.

2.1.1 Definition

Der Begriff des IoT wurde erstmals im Rahmen eines Artikels des Scientific American Journals zu Beginn der 1990er-Jahre publiziert. Weiser formulierte in diesem Artikel eine Vision, in der das damals neu entwickelte Internet mittels der dadurch entstandenen Möglichkeiten über die digitale Welt hinaus auf alltägliche Dinge der realen Welt zugreifen zu können [87].

Vor mittlerweile rund dreißig Jahren startete das Internet. Das Internet begann, wenn auch noch mit den isolierten Servern, seinen Aufbau mithilfe von Links, die sich nach und nach zu einem Netzwerk aufbauten. Mittlerweile ist dieses Netzwerk zu einem gewaltigen Netz ausgebaut worden, das laut Ansicht von Experten des Institute of Electrical and

Electronics Engineers (IEEE) in der heutigen Zeit weit mehr als 50 Milliarden Dinge miteinander verbindet [57]. Wissenschaftliche Autoren wie Andelfinger und Hänisch geben in diesem Zusammenhang an, dass die bis dato zu benutzenden Entwicklungen noch lange nicht das Ende sein werden, sondern vielmehr wohl erst den Anfang darstellen. Diese beiden Autoren und viele andere auch gehen davon aus, dass bis zum Jahr 2025 wohl mehr als 100 Milliarden physische Objekte der realen Welt miteinander vernetzt sein werden. Zudem gilt das IoT in Verbindung mit dem Internet als treibende Kraft, um den Trend zur weiteren Steigerung von miteinander vernetzten alltäglichen Dingen sowie auch den Menschen selbst weiter voranzutreiben [5]. In der nachfolgenden Abbildung 2.1 wird auf schematische Art und Weise die beschriebene Entwicklung des IoT dargestellt.

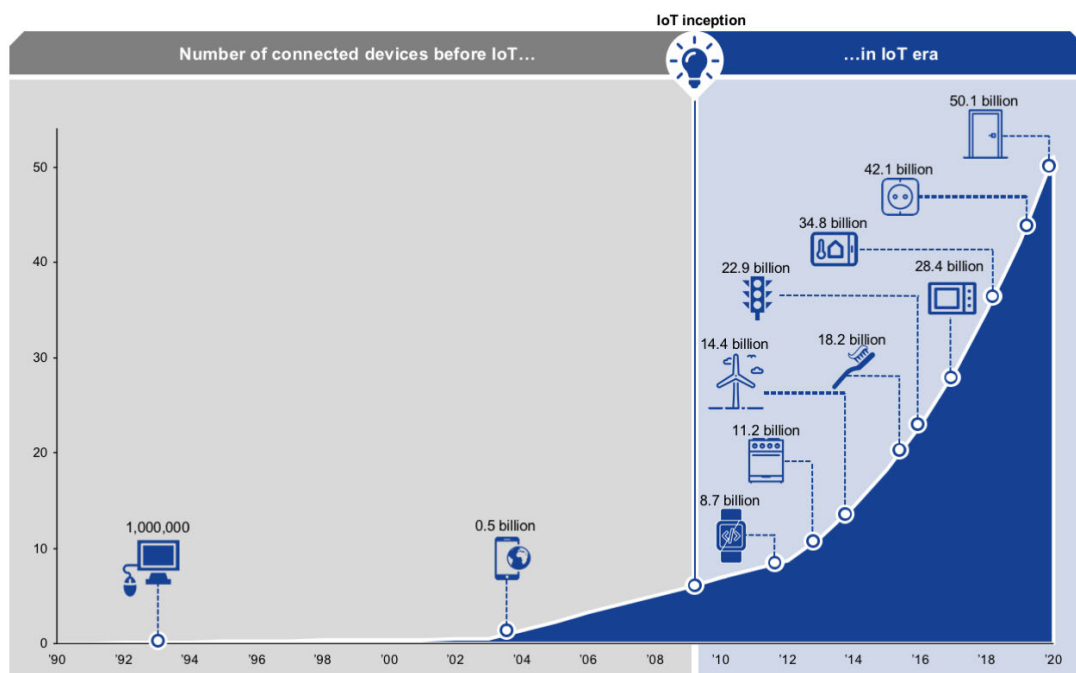


Abbildung 2.1: Historische Entwicklung des IoT [25]

Das IoT stellt ein Konzept dar, bei dem physische Objekte aus der realen Welt mit der virtuellen Welt verbunden werden. Hierbei werden smarte Dinge, Geräte, Maschinen, Objekte oder Systeme nicht nur miteinander, sondern auch mit dem Internet vernetzt. Die miteinander und mit dem Internet verbundenen Geräte, Objekte usw. erfassen relevanten Daten und Informationen in Bezug auf ihre unmittelbare Umgebung, analysieren diese und generieren daraus dann entsprechende Verknüpfungen [81].

Vor allem aus wissenschaftlicher Sicht wird das IoT als ein innovatives Konzept be-

schrieben, bei dem sich die digitale bzw. virtuelle Welt der Informationstechnologie (IT) praktisch nahtlos in die reale Welt der Dinge einfügt. Durch dieses konzeptionelle Vorgehen wird erreicht, dass die physische bzw. reale Welt mithilfe von Computer und smarten Dingen, Geräten, Objekten usw. in geschäftlichen und alltäglichen Situationen auf eine bessere, effizientere Art zugänglich gemacht wird [83].

Das heutige IoT zeichnet sich laut Experten durch die drei grundlegenden Charakteristika der technologischen Konvergenz, informatorischen Vernetzung und der Autonomie aus [1]. Im Folgenden werden diese drei Charakteristika kurz beschrieben:

- Technologische Konvergenz

Unter der technologischen Konvergenz, also einem Zusammenwachsen von technischen Innovationen, wird die Basis für signifikante Veränderungen verstanden [21]. Aus diesem Grund sehen Forscher das IoT auch nicht als eine geschlossene Einheit, sondern als eine Art von Entwicklungsstufe, im Zuge derer das Internet mit sämtlichen sozialen Medien fusioniert [7].

- Informationstechnische Vernetzung

In einer Vielzahl von Publikationen beziehen sich Autoren bei dem Begriff der informationstechnischen Vernetzung auf eine informationstechnische Kommunikation, die zwischen vernetzten Objekten und Menschen oder zwischen vernetzten Objekten untereinander stattfindet. Hierzu werden die drei Möglichkeiten der Vernetzung von Objekten gezählt: eine bilaterale Vernetzung, eine lokale Vernetzung und eine globale Vernetzung von Objekten. Die Grundvoraussetzung ist allerdings, dass jedes Objekt über eine eindeutige Identität verfügt [1].

- Autonomie

Aufgrund des schnellen Fortschritts im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) wurde in den letzten Jahren eine entsprechende Basis geschaffen, dass Objekte oder Systeme so entwickelt werden, die über eine Aktorik, Optik und Sensorik verfügen, um von einer lokalen Umgebung Daten und Informationen aufzunehmen, diese zu verarbeiten und danach auf autonome Art und Weise mit geeigneten Handlungen darauf zu reagieren [10]. Eine solche Autonomie im Sinne des IoT konnte erst dadurch geschaffen werden, indem jedes Objekt in einem Netzwerk eine eigene, eindeutig identifizierbare IP-Adresse zugewiesen bekam. Dadurch sind der Vision des IoT praktisch keine Grenzen mehr gesetzt, denn mittlerweile

kann jedes im täglichen Leben verwendete Objekt mit der entsprechenden Technologie ausgestattet werden, um eine entsprechende IoT-Kommunikation realisieren zu können [49].

Das primäre Ziel bei den Entwicklungen im Bereich des IoT ist es, dass die Informationssysteme ständig verbessert werden, damit dadurch neue Informationsmodelle geschaffen werden können [69]. Autoren wie bspw. Kaufmann geben an, dass aus diesem Grund heutzutage mit sogenannten eingebetteten Systemen gearbeitet wird. Mithilfe dieser eingebetteten Systeme kann problemlos ein Zusammenspiel zwischen Mensch und Maschine und M2M realisiert werden [40]. Damit das IoT in der vorgesehenen Art und Weise realisiert werden kann, ist ein effektives Zusammenspiel zwischen den einzelnen Komponenten notwendig. Dies kann heute bereits bei den meisten komplexen Funktionalitäten von IoT-Anwendungen beobachtet werden [38].

2.1.2 Funktionsweise

Aufgrund der neuen Möglichkeiten, welche durch die Trends im Bereich des IoT geboten werden, bietet sich unter anderem den Unternehmen die Möglichkeit, die aktuellen Geschäftsmodelle im Sinne des IoT verändern zu können. Dies hat unter anderem zur Folge, dass ständig neue Marktteilnehmer auf einem Markt eintreten können [12]. Genau aus diesem Grund, wie zuvor schon erwähnt, benötigen heutzutage viele Geräte eingebettete Systeme, denn diese Systeme ermöglichen ein solches reibungsloses Zusammenspiel zwischen allen beteiligten Objekten und Akteuren [39].

“Seit der Industrialisierung leben wir in einer zunehmend beschleunigten Welt.” So lautet ein Zitat der beiden Autoren Andelfinger und Hänisch. Sie verweisen hierbei darauf, dass sämtliche Technologien in immer kürzeren Intervallen von neuen noch innovativeren Technologien abgelöst werden. Am deutlichsten ist dies laut Experten vor allem auf dem Gebiet der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) zu beobachten. Denn gerade an den Entwicklungen, die im Zusammenhang mit dem Internet stehen, kann diese beschleunigte Entwicklung sehr gut beobachtet werden [5].

Forscher, die sich mit dem Bereich des IoT beschäftigen, teilen die Weiterentwicklungen und Funktionsweisen des IoT in Bezug auf die industrielle Nutzung in die nachfolgenden vier großen Bereiche ein [24]:

- Erweiterung des Integrationsbereichs,
- Verschmelzung von realer und virtueller Welt,
- Entstehung eines digitalen Managementregelkreises und
- in Nutzenstiftung durch die Erhöhung der Datengranularität.

Nachfolgend werden diese vier großen Bereiche des IoT, die in der Literatur auch als Säulen des IoT bezeichnet [27] werden, kurz erläutert:

- Die Erweiterung des Integrationsbereichs

Immer, wenn eine neue Generation von IKT-Systemen entsteht, geht mit einer solchen Entwicklung typischerweise eine Erweiterung des Integrationsbereichs einher. Sowohl in der wissenschaftlichen als auch in der praxisnahen Literatur wird dargestellt, dass sich diese Entwicklungen vor allem im Rahmen der betrieblichen

Informationsverarbeitungssystemen, wie z. B. bei der Automatisierung von Logistikbereichen oder auf dem Gebiet des Rechnungswesens, aufzeigen lassen [37].

- Die Verschmelzung von realer und virtueller Welt

Wie mittlerweile von einer Vielzahl an Forscher erörtert wird, konzentrieren sich viele Untersuchungen sehr intensiv mit der Thematik, auf welche Art und Weise eine totale Vernetzung von Menschen, Informationssystemen, Prozessen usw. realisiert werden kann, damit mithilfe der IT Medienbrüche verhindert werden können [9]. Durch den Einsatz der neuen IKT-Systeme, die auch als Cyber-Physische Systeme bezeichnet werden, soll heutzutage ermöglicht werden, dass die Lücke zwischen den physischen Prozessen aus der realen Welt mit den IT-Prozessen der virtuellen Welt geschlossen werden [13]. Das Konzept des IoT bietet viele Anwendungsmöglichkeiten, mit deren Hilfe ein Großteil der Medienbrüche als auch die Lücke zwischen der realen und virtuellen Welt geschlossen werden können [24, S. 7]. Die nachfolgende Abbildung 2.2 stellt schematisch die Vision der Verschmelzung zwischen der realen und virtuellen Welt dar.

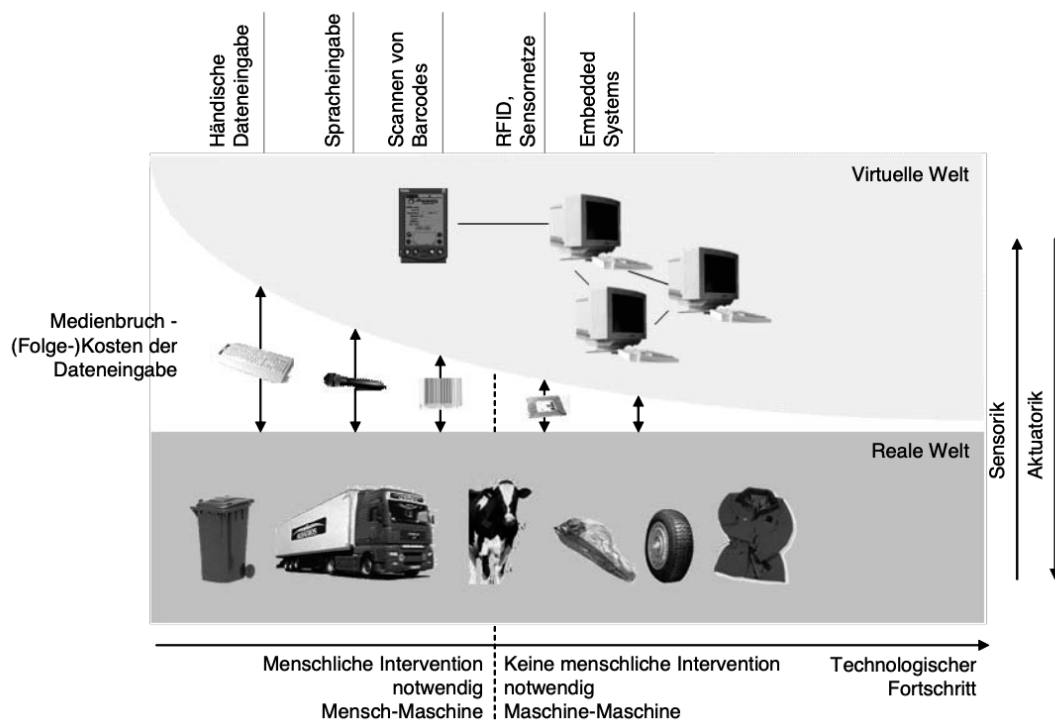


Abbildung 2.2: Verschmelzung der realen und virtuellen Welt [24, S. 8]

- Die Entstehung eines digitalen Managementregelkreises

Durch die vermehrte Verschmelzung der realen mit der virtuellen Welt wird allmählich auch der digitale Managementregelkreis geschlossen. Modern ausgerichtete Unternehmen, die ganzheitlich auf innovative Technologien setzen, haben durch den Einsatz von IoT-Technologien die Möglichkeit, Echtzeitdaten zu verwenden [24, S. 5]. Dies geschieht bspw. im Bereich der Logistik bzw. Lagerwirtschaft, wo Daten mit einem Scanner am Point-of-Action (POA) aufgenommen und dann direkt in ein System zur Weiterverarbeitung übertragen werden. Dadurch können viel schneller unter anderem überbetriebliche Bestellungen bei einem Lieferanten ausgelöst werden, da die Warenbestände in Echtzeit überwacht werden können [23, S. 76].

- Die Nutzenstiftung durch die Erhöhung der Datengranularität

Obwohl die Vision in Bezug auf ein absolutes Echtzeitunternehmen im Moment noch nicht erreicht wurde, sind die heutzutage zum Einsatz kommenden IT-Systeme durchaus in der Lage, einen Großteil der Integrationsprobleme lösen zu können [86, S. 234-235]. Eines der größten Probleme bei der Integration von Daten liegt in den meisten Fällen in der mangelhaften Qualität von diesen. Diese mangelhaften Daten sowie aber auch oftmals das fehlende Wissen der beteiligten Akteure führen daher sehr häufig dazu, dass die Geschäftsprozesse in einem Unternehmen trotz einer digitalisierten Umgebung wenig effizient ablaufen [11, S. 175]. Innovationen aus dem Bereich des IoT stellen hierzu mittlerweile zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten zur Verfügung, damit gewisse Mangelerscheinungen ausgeglichen und dadurch Kosten reduziert werden können. Ein wichtiger Punkt dabei ist, dass relevante Teile der physischen in die virtuelle Welt übertragen werden, um auf diese Weise die Datengranularität optimieren zu können [30].

2.2 Grundlagen Long Range Wide Area Network

Dieser Abschnitt der Arbeit bringt einem Leser den Begriff und die Grundlagen des Long Range Area Network näher, indem der Terminus zunächst einmal definiert und anschließend noch der Aufbau und Funktionsweise diskutiert werden.

2.2.1 Definition

Das LoRa stellt einen offenen Funkstandard dar, der insbesondere für ein sogenanntes Low Power Wide Area Network (LPWAN) für eine Übertragung von kleinen Datenmengen auf eine hohe Reichweite konzipiert wurde. In allen Sendern und Empfängern eines LoRa ist laut Experten wie Meier und Zimmermann ein Chip eingebaut, der nur von einem einzigen Hersteller angeboten wird. Aus diesem Grund ist bei der Installation eines solchen Netzwerks ein Architekt von diesem von einem einzigen Hersteller abhängig [55, S. 8].

Mithilfe der LoRa-Funknetztechnologie wird eine sehr energieeffiziente Datenübertragung ermöglicht, weil die einzelnen Elemente – auch wegen der kleinen Datenmengen – ebenfalls mit einer sehr geringen Energiemenge auskommen. Aufgrund der einfachen, aber sehr effektiven Vernetzungsarchitektur wurde dieser Funkstandard speziell für das IoT entwickelt [22, S. 24]. Der LoRa-Funkstandard wird von vielen Experten aus dem Bereich der Netzwerktechnologie auch als 0G-Netz bezeichnet. Die Eignung für IoT- und Machine-to-Machine(M2M)-Netzwerke ergibt sich, weil es sich bei LoRa zum einen um einen offenen Funkstandard handelt und zum anderen, weil mit einem LoRa-Netzwerk eine bidirektionale Kommunikation aufgebaut werden kann. Zudem kann mithilfe eines LoRaNetzwerks eine sogenannte Community-basierte Lösung genutzt werden [73, S. 10-11]. Aufgrund der Spezifikation des LoRa-Funkstandards wird mittels dieses Standards eine praktisch nahtlose Zusammenarbeit von unterschiedlichen Systemen und Technologien ermöglicht. Genau deswegen erfüllt LoRa die wichtigsten Anforderungen für das IoT, denn der LoRa-Funkstandard ermöglicht eine bidirektionale Kommunikation, ermöglicht eine Lokalisierung und Mobilität von digitalen Dienstleistungen sowie eine entsprechende Ende-zu-Ende-Verschlüsselung [8, S. 63].

Da sich das LoRa laut Netzwerkspezialisten als Standard für das IoT etabliert hat, kann diese Netzwerktechnologie auch sehr gut für sogenannte Value Cluster als Kombination aus einer Smart-City-Basistechnologie des städtischen IoT eingesetzt werden. So wird ermöglicht, über das LoRa-Netzwerk bspw. Smart Energy, Smart Mobility, Smart Infrastructure oder Smart Living und die darin enthaltene Vielzahl an Anwendungen zu vernetzen [80, S. 650].

In der nachfolgenden Abbildung 2.3 wird schematisch der Value Cluster mit LoRa als Basistechnologie dargestellt.

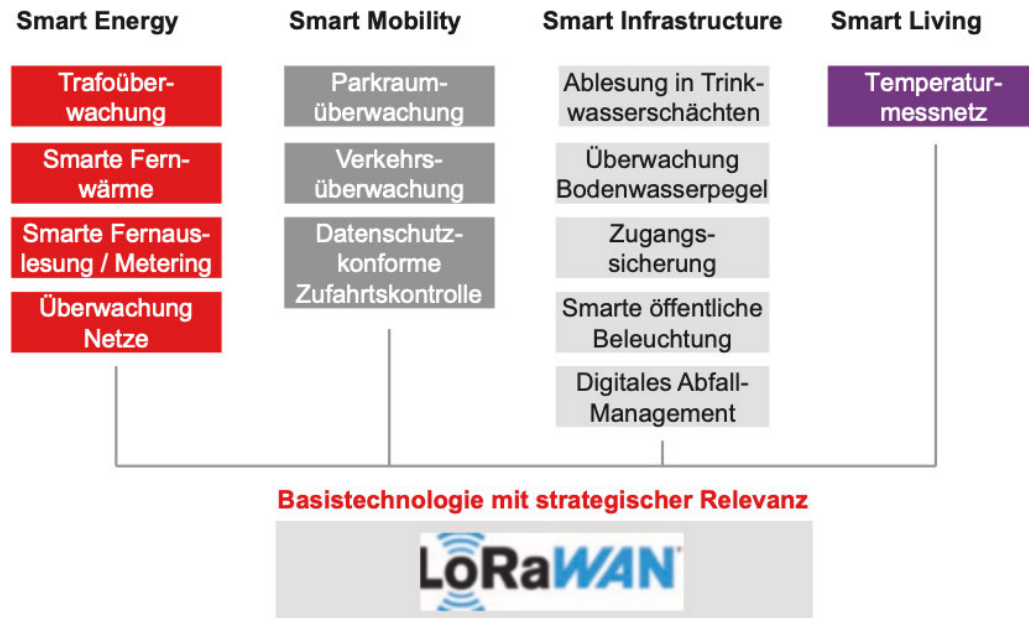


Abbildung 2.3: Value Cluster mit LoRa-Netzwerk als Basistechnologie [80, S. 650]

Laut Autoren wie Schumacher und Selchert kann in einem LoRa-Netzwerk mit jeder einzelnen Anwendung die Effizienz gesteigert werden. Allerdings stellt das LoRa-Netzwerk eben nur die Basistechnologie für einen Value Cluster eines städtischen IoT dar, damit alle Anwendungen in einem solchen Netzwerk einen entsprechenden Mehrwert darstellen können. Es wird auch noch eine Datenplattform und -analytik benötigt. Aber wie schon erörtert, stellt das LoRa-Netzwerk eine sehr gute Basistechnologie dar, die sehr schnell und relativ kostengünstig als Startpunkt für einen Bebauungsplan einer Smart City realisiert werden kann [80, S. 650-651].

2.2.2 Aufbau und Funktionsweise

Typischerweise ist die Architektur eines LoRa-Netzwerkes in Form einer Sterntopologie angeordnet, wobei bei dieser Topologie die Gateways die Verbindungen zwischen den einzelnen in das Netzwerk eingebundenen Geräte oder Objekte sowie dem zentralen Netzwerkservers herstellen. Hierbei werden die Gateways mittels einer Standard-IP-Verbindung mit einem Netzwerkservers verbunden [79, S. 679-680]. Die jeweiligen End-

punkte bzw. Endgeräte in einem LoRa-Netzwerk, also im Grunde die Sensoren, werden mittels einer sogenannten Single-Hop-Verbindung mit den im Netzwerk befindlichen Gateways verbunden. Damit werden die einzelnen Endpunkte ohne Zwischenstation mit den Gateways, die in weiterer Folge über IP mit einem Netzwerkservers verbunden sind, verbunden. Dadurch wird die Kommunikation zwischen den einzelnen Endpunkten und den Gateways auf eine Vielzahl von Frequenzkanälen, die üblicherweise über unterschiedliche Datenraten verfügen, verteilt. Aufgrund dieser Funktionsweise kann es normalerweise nicht vorkommen, dass sich die Sensoren gegenseitig stören. Auch wenn eine sehr große Anzahl von Geräten bzw. Objekten in ein Netzwerk eingebunden sind und sogar gleichzeitig kommunizieren [89].

Grundsätzlich besteht die Architektur eines LoRa-Netzwerks aus einer Vielzahl an Endpunkten bzw. Endgeräten in Form von Sensoren und Aktoren, ebenfalls über eine Vielzahl an Gateways und einem zentralen Netzwerkservers. Wie zuvor schon dargestellt, kommunizieren in einem solchen Netzwerk die Endpunkte respektive Endgeräte direkt mit den Gateways und die Gateways sind hierbei mit einem Netzwerkservers verbunden [42, S. 664-665]. Der Netzwerkservers selbst bei einem LoRa-Netzwerk kommuniziert über die unterschiedlichsten Protokolle mit Anwendungen (Applikationen auf einem Servers), die im Rahmen einer Cloud betrieben werden. Auf diese Art und Weise kommuniziert der Netzwerkservers mit dem Internet [76, S. 322-323]. Die nachfolgende Abbildung 2.4 stellt die beschriebene Netzarchitektur eines LoRa-Netzwerks in übersichtlicher Form dar.

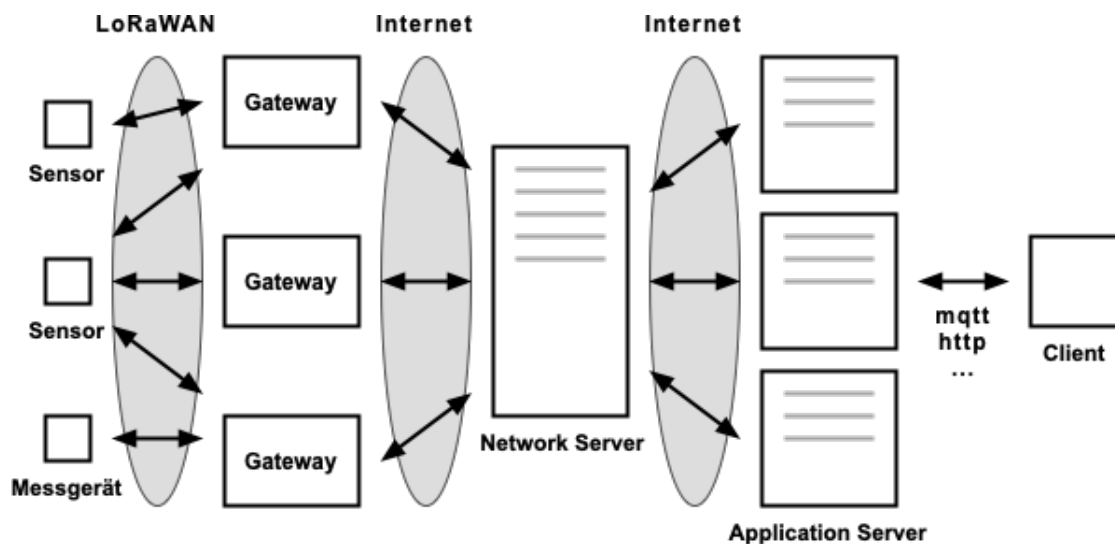


Abbildung 2.4: LoRa-Netzwerkarchitektur [47, S. 418]

Wie ebenfalls schon einmal kurz dargestellt, wird im Rahmen eines LoRa-Netzwerkes trotz eines sehr geringen Energieverbrauchs nicht nur eine hohe Effizienz beim Datentransfer, sondern auch eine relativ große Reichweite erreicht. Zusätzlich wird von einem LoRa-Netzwerk eine Frequenzspreizung genutzt, wodurch Interferenzen zum überwiegenden Teil vermieden werden können [85, S. 85].

Dieses Übertragungsverfahren, das von LoRa genutzt wird, wird als sogenanntes Chirp Spread Spectrum (auf Deutsch Zirpenfrequenzspreizung) bezeichnet. Eine Signalübertragung erfolgt beim LoRa also als eine Art von Zirpen, wobei dieser zirpende Impuls eben über einen großen Frequenzbereich ausgeweitet wird. Die jeweilige Bandbreite kann hierbei laut Experten entweder für eine hohe Datenrate oder für eine robuste Übertragungsform verwendet werden. Somit bestimmen also der Faktor der Frequenzspreizung sowie die Bandbreite wie hoch eine Datenrate ist und wie hoch eine Empfangswahrscheinlichkeit anhand einer gewählten Datenrate ist [53, S. 87].

Auf diese Art und Weise stören sich dann die Signale, die anhand von unterschiedlichen Spreizfaktoren moduliert wurden, obwohl diese über einen gleichen Frequenzkanal übertragen werden, nicht gegenseitig. Anhand der Orthogonalität, über welche die Spreizfaktoren bei der LoRa-Technologie verfügen, wird ein gleichzeitiges Senden von mehreren Endpunkten bzw. -geräten auf dem gleichen Kanal möglich gemacht [43, S. 6]. Neben den störungsfreien Übertragungsmöglichkeiten gelten die Signale der LoRa-Technologie als sehr robust gegen In-Band- sowie Out-of-Band-Interferenzen. Dies ist auch der Grund, warum die LoRa-Netzwerke, da sie ja als unempfindlich gegen einen Mehrwegempfang oder Fading gelten, im städtischen Raum für große Reichweiten zum Einsatz gebracht werden [61, S. 134].

2.2.3 Unterschied zu anderen Technologien

Im Laufe der letzten Jahre wurden mittlerweile viele verschiedene LPWAN-Technologien und sogenannte Authentication-Centre(AUC)-Standards entwickelt. Während eine Vielzahl von den Entwicklungen im Bereich der leitungslosen Übertragungsverfahren aktiv entwickelt oder implementiert werden, verschwinden andere Technologien sehr schnell wieder vom Markt bzw. kommen kaum aktiv zum Einsatz. Neben LoRa zählen laut Experten Nwave, Random-Phase-Multiple-Access (RPMA), SigFox, Symphony Link, Weightless Special Interest Group (WSIG) und Weightless-P zu den im Moment bekanntesten und auch sehr häufig eingesetzten kabellosen Übertragungsverfahren [14, S. 117]. Obwohl

aktuell noch viele andere leitungslose Übertragungsverfahren existieren, können sich die meisten von ihnen nicht annähernd so durchsetzen als die zuvor genannten Technologien. Eine große Anzahl an anderen proprietären Protokollen und Stacks wie bspw. das Dash7 Alliance Protokoll kamen in der Vergangenheit niemals in dem Maße zum Einsatz und werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht näher betrachtet [56, S. 65].

Im Folgenden werden die genannten kabellosen Übertragungsverfahren (inklusive der LoRaTechnologie) hinsichtlich deren Eigenschaften sowie deren Vor- und Nachteile kurz diskutiert, um die wichtigsten Unterschiede aufzeigen zu können:

- LoRa

Wie schon zuvor einmal erörtert, stellt LoRa einen offenen funkbasierten Übertragungsstandard dar, mit dessen Hilfe ein Ökosystem von bestimmten LPWAN-Technologien gefördert werden kann. Zu den Unternehmen, die bei der Entwicklung maßgeblich beteiligt waren, zählen Belgacom, Bouygues Telecom, Cisco, Fastnet, IBM, Koninklijke PTT Nederland (KPN), MicroChip, Semtech, Singtel und Swisscom. Die LoRa-Technologie stellt grundsätzlich, wie ebenfalls schon kurz erläutert, ein Open-Standard-Netzwerk dar, wobei der Standard allerdings nicht wirklich offen ist, da der verwendete Chip für eine vollständige Implementierung eines Netzwerks ja nur über das Unternehmen Semtech verfügbar ist. Der Chip ist notwendig, damit die physische Schicht LoRa mit der MAC-Schicht des LPWAN verbunden werden kann [56, S. 64-65].

- Nwave

Diese Technologie operiert im sogenannten Ultra-Narrow-Band(UNB)-Funkspektrum, wobei dieses Funkspektrum im Industrial, Scientific and Medical Band (ISM-Band) in einer Bandbreite unter einem GHz sendet. Nwave verwendet laut Angaben der Hersteller eine sehr fortschrittliche Demodulationstechnik, die diesem Standard dabei hilft, dass Nwave ohne Probleme mit anderen Funktechnologien koexistieren kann. Eine solche Koexistenz funktioniert zudem ohne zusätzliches Rauschen oder Verzerrungen bei der Übertragung [74, S. 58]. Bei Nwave handelt es sich um eine proprietäre LPWAN-Technologie, die in erster Linie als Lösung für intelligente Parksysteme entwickelt wurde. Nwave repräsentiert eine sogenannte Ultra-Narrowband-Technologie und basiert wie schon Nwave auf dem unlicenzierten ISM-Band unter einem GHz. Die Hersteller von Nwave versprechen den Benutzern eine große Reichweite sowie eine hohe Knotenpunktdichte, die im Vergleich zu

anderen LPWAN-Standards auf Kosten eines höheren Energieverbrauchs geht. Wie viele andere LPWAN-Technologien arbeitet auch Nwave in Form einer Sterntopologie und unterstützt hierbei die Mobilität der einzelnen Knoten. Die Endknoten senden mit einer Leistung von 25 bis 100 Milliwatt (mW) und sind damit in der Lage, größere Distanzen bei einer Datenrate von bis zu 100 bps abzudecken. Nwave verfügt über ein eigenes Echtzeit-Datenerfassungs- und Verwaltungssoftwaresystem für die Überwachung und Steuerung [15, S. 30].

- RPMA

Auch bei RPMA handelt es sich um eine proprietäre LPWAN-Technologie. Diese wurde von dem Unternehmen Ingenu bereits im Jahr 2008 entwickelt. Das Unternehmen Ingenu ist ein Gründungsmitglied der Aufgabengruppe IEEE 802.15.4k und hat sich im Gegensatz zu anderen Anbietern nicht auf eine schnelle Markteinführung, sondern auf die Entwicklung der Technologie selbst konzentriert. Wie der Hersteller Ingenu angibt, verfügt RPMA wegen seiner Architektur über eine bessere Up- und Downlink-Kapazität als eine Vielzahl von anderen LPWAN-Technologien. Zudem wird von Seiten der Hersteller angegeben, dass die RPMA-Technologie über eine sehr bessere Doppler-, Interferenz- und Terminierungsrobustheit verfügt. Hierbei operiert RPMA bei einer Bandbreite von 2,4 GHz und funktioniert zudem über eine Spreizbandtechnik mit einer Mehrfachzugriffsmöglichkeit, bei einer Datenrate von zwei Kilobit pro Sekunde (kbps). Die RPMA-Technologie verfügt bei günstigen Bedingungen über eine sehr große Reichweite, denn diese liegt zwischen 20 und 65 Kilometer [82, S. 100].

- SigFox

Die SigFox-Technologie wurde im Jahr 2009 in Frankreich entwickelt und eingeführt. SigFox gilt als einer der bekanntesten Vertreter im Bereich der LPWAN-Technologien, weil die Hersteller sehr erfolgreiche Marketingkampagnen durchführen. Zusätzlich verfügt diese Technologie mittlerweile über ein sehr großes Ökosystem von Anbietern, wobei zu diesen Anbietern unter anderem bspw. Axom, Silicon Labs oder Texas Instruments zählen [19, S. 53]. Wie viele andere LPWAN-Technologien auch nutzt SigFox eine proprietäre Technologie, um auf diese Art und Weise eine größere Reichweite erzielen zu können. Hierzu verwendet SigFox eine langsame Modulationsrate. Aufgrund dieser Eigenschaften gilt SigFox als eine sehr gute Möglichkeit, bei denen kurze und seltene Signale gesendet werden. SigFox

verfolgt eine bidirektionale Ende-zu-Ende-Verbindung und gilt zudem aus sicherheitstechnischer Betrachtung als gut abgesicherte Technologie [91, S. 16-18]. Damit im Rahmen einer Datenübertragung bei der SigFox-Technologie Störungen vermieden werden können, operiert die Technologie mit einem Frequenzsprungverfahren. Die von SigFox verwendete Ultra-Schmalbandübertragungstechnik ermöglicht es, dass neben einem sehr geringen Energieverbrauch auch eine sehr hohe Skalierbarkeit ermöglicht wird [84, S. 97].

- Symphony Link

Symphony Link stellt einen von Link-Labs entwickelten Funkstandard dar, der vor allem von Industrie- und Unternehmenskunden eingesetzt wird, weil diesem Standard eine hohe Zuverlässigkeit mit fortschrittlichen Funktionen zugerechnet werden. Die Symphony-Link-Technologie stellt laut Experten eine alternative zur LPWAN-Technologie dar, da dieser Standard die Beschränkungen von LPWAN überwindet. Symphony Link bietet zwar die gleiche Reichweite wie LoRa, benötigt hierfür allerdings ein höheres Leistungsniveau, was zu einem höheren Energieverbrauch führt. Es wird eine etwa vierfach höhere Kapazität erreicht als mit der LPWAN-Technologie. Symphony Link wird aufgrund der hohen Leistungsfähigkeit vor allem in der Schleusensteuerung, für industrielle Steuerungssysteme, die Beleuchtungssteuerung, für Alarmsysteme oder für die physische Sicherheit eingesetzt [18, S. 77]. Die Übertragungstechnologie gilt aufgrund der festen Maximum Transmission Unit (MTU) von 256 Byte sogar als revolutionäres Funksystem, das sich unter anderem für weiträumige IoT-Netzwerke sehr gut eignet. Aus diesem Grund gilt Symphony Link eben als eine ideale Technologie für Unternehmens- und Industriekunden, wenn eine hochsichere Verbindung in die Cloud benötigt wird [26, S. 356-357].

- Weightless Special Interest Group (WSIG)

Die WSIG-Technologie wurde im Jahr 2008 entwickelt und hatte als Ziel, dass LPWAN-Technologien standardisiert werden können. WSIG gilt laut Experten unter allen LPWAN-Technologien als einziger wirklich offener Standard, der im lizenzierten Funkpektrum unter einem GHz operiert. Von der WSIG-Technologie existieren mittlerweile drei Versionen, diese lauten Weightless-N, Weightless-P und Weightless-W. Die beiden Standards Weightless-N und -W spielen laut Autoren wie Stoyanov, Poulkov und Valkova-Jaris aufgrund einer hohen Energieverbrauch

keine große Rolle. Die dritte Technologie, Weightless-P, wird nachfolgend noch genauer beschrieben. Der Standard Weightless-N operiert im schmalrandigen Übertragungsverfahren und wird mithilfe einer Advanced Encryption Standard (AES) 128-Bits-Verschlüsselung geschützt. Bei Weightless-N handelt es sich zudem um ein sogenanntes unidirektionales Übertragungsverfahren. Weightless-W stellt einen Standard dar, der mit einer Bandbreite von fünf Megahertz (MHz) auf bidirektionale Weise operiert [82, S. 99].

Wie auch die anderen Weightless-Standards funktioniert auch Weightless-P über eine bidirektionale Kommunikation. Dieser Standard verwendet ein Schmalband-Modulationsschema, mit dessen Hilfe eine bidirektionale Kommunikationsfähigkeit ermöglicht wird. Laut Autoren wie Raj und Raman bietet der Weightless-P Standard eine enorm hohe Quality of Service (QoS) und gehört damit zu den besten Standards in dieser Klasse auf dem IoT-Sektor. Auch, weil laut Experten Weightless-P stabil immer eine zugesagte Leistungsrate, Netzwerkzuverlässigkeit sowie Sicherheitsparameter bietet [74, S. 57]. Im Vergleich zu anderen LPWAN-Technologien bietet Weightless-P auch viel niedrigere Kosten. Zusätzlich verbraucht dieser Standard im Ruhezustand nicht mehr als 100 uW und gehört somit zu den sparsamsten Energieverbrauchern [3, S. 88].

2.2.4 Long Range Wide Area Network Alliance

Die sogenannte Long Range Wide Area Network Alliance (LoRa Alliance) stellt eine gemeinnützige und offene Organisation dar, die sich dem Ziel verschrieben hat, dass die Interoperabilität und Standardisierung von LPWAN-Technologien gefördert werden. In diesem Zusammenhang verfolgt die LoRa Alliance zudem auch die Bestrebungen, das Wachstum sowie eine weitreichende Realisierung des IoTs zu unterstützen, damit sich dieses entsprechend durchsetzen kann. Die LoRa Alliance vertritt außerdem die Meinung, dass durch eine permanente Verbreitung des LPWAN-Protokolls in Zukunft eine globale Standardisierung des LPWANs erreicht werden kann. Mit dem Ziel, dass durch den Einsatz von relativ wenigen Basisstationen ganze Städte bis sogar hin zu ganzen Ländern eine flächendeckende Verfügbarkeit des LPWANs erzielt werden kann [65, S. 185-186].

Aufgrund der zunehmenden Verbreitung der LPWAN-Technologie besitzt die LoRa Alliance mittlerweile eine sehr umfassende globale Präsenz in Bezug auf öffentliche Netzwer-

ke sowie bestehender Implementierung von LoRa-Technologien. Mittlerweile konnte mittels einer über längere Zeit hinweg durchgeführten Standardisierung und Akkreditierung von Zertifizierungsprogrammen eine erforderliche Interoperabilität für die Skalierung von LPWAN erreicht werden. Durch diese Vorgehensweise hat sich die LPWAN-Technologie heutzutage zu einer der führenden Lösungen auf dem Gebiet der Übertragungstechniken entwickelt, wodurch eine globale Ausbreitung der LPWAN-Netzabdeckung in den letzten Jahren stetig zugenommen hat, die auch weiterhin monatlich über eine teilweise signifikante Steigerung verfügt [67, S. 59].

Die LoRa Alliance wurde im Jahr 2015 von den Unternehmen Belgacom, Bouygues, Cisco, Fastnet, IBM, KPN, MicroChip, Semtech, Singtel und Swisscom ins Leben gerufen und zählt aktuell zu einem der sich am schnellsten verbreitenden Technologie-Bündnissen. In den letzten Jahren ist die Anzahl der Mitgliedsunternehmen auf rund 500 gestiegen, wobei sich diese Unternehmen in Afrika, Asien, Europa und Nordamerika befinden. Zu diesen Mitgliedsunternehmen zählen unter anderem sogenannte Original Equipment Manufacturers (OEM), Systemintegratoren, Sensor- und Halbleiterhersteller sowie Telekommunikationsunternehmen [75, S. 310-311]. Sehr deutlich wird die Popularität unter anderem auch daran, dass bis Ende 2019 etwa 100 Netzbetreiber, 68 Bündnis-Mitgliedsbetreiber in 51 Länder operativ tätig sind. Zudem werden in mehr als 100 Ländern LPWAN bereitgestellt. Laut Experten sind auch in Zukunft weitere Ausweitungen in noch mehr Länder geplant [64, S. 292].

3 Forschungsstand

Das nachfolgende Kapitel der vorliegenden Arbeit dient dazu, um Einblicke in den aktuellen Forschungsstand der behandelten Thematik der Arbeit zu geben. Hierzu werden im Folgenden der Stand der Technik von verwandten Arbeiten sowie die wichtigsten Vor- und Nachteile von Long Range Wide Area Network beschrieben.

3.1 Stand der Technik und verwandte Arbeiten

In diesem Abschnitt wird der State of the Art von verwandten Arbeiten aus den drei Bereichen von Network Slicing, Interpretation der Multi-Radio-Access-Technologie sowie Integration mit anderen Technologien untersucht und in entsprechender Form dargestellt. Bei all den nachfolgenden untersuchten Technologien handelt es sich um Technologien, die dem Bereich des LoRa und LPWAN zugerechnet werden.

3.1.1 Network Slicing

Das Konzept des Network Slicing spielt eine Schlüsselrolle bei der Entwicklung von Netzen der fünften Generation, das auch unter dem Begriff 5G bekannt ist. Die Anwendung des Network Slicings beinhaltet eine Reihe von Problemen im Zusammenhang mit der fairen und effizienten Aufteilung von Ressourcen zwischen den Slices. Kochetkova u. a. [41] haben in ihrer Arbeit die Methode des dynamischen Slicings vorgeschlagen und untersucht, bei der auf der Grundlage von enthaltenen Slicing-Leistungsindikatoren die Länge der Slicing-Intervalle definiert wird. Als Spezialfall bei der untersuchten Netzkonfiguration wurde ein mathematisches Modell in Form eines Warteschlangensystems für zwei Slices konzipiert, wobei für die Simulation die Formeln für die Berechnung der Leistungsindikatoren aufgestellt wurden [41, S. 84].

Der Autor Lea [48] beschreibt das Network Slicing ebenfalls als einen wichtigen Teil der 5G-Architektur und beschreibt, dass das Network Slicing das Entkoppeln der Technologie Stacks für die Steuerungs- und Datenebene, die in der aktuell zum Einsatz kommenden Mobilfunkarchitektur typisch sind, umfasst. Das Network Slicing beinhaltet hierzu die Verwendung von Software-defined Networking (SDN) und das Network Function Virtualization (NFV). Die beiden Netzwerktechnologien stellen Arten von Netzwerkvirtualisierungsdesigns dar, die in Unternehmen, Rechenzentren sowie sogenannten Hyperscale-Implementierungen als üblich angesehen werden. Diese Netzwerkvirtualisierungstechniken ermöglichen es, dass ein Dienstanbieter eine größere Flexibilität hat in Bezug darauf, die Hardware, Methode zum Verkauf oder zur Partitionierung von Diensten sowie Daten auf einer gemeinsam genutzten Infrastruktur zu bewegen und zu routen und dieses trotzdem als vertrauenswürdigen privaten Netzwerk präsentieren kann. Kurz gesagt trennt das SDN beim Network Slicing die Steuerungsebene, die für das Routing eines Netzwerks verantwortlich ist, von der Datenebene, welche eine Weiterleitung von Daten und Informationen übernimmt. Das NFV virtualisiert beim Network Slicing die Netzwerkanwendungen [48, S. 291].

Die neue 5G-Technologie ermöglicht eine enorm zuverlässige und leistungsstarke Kommunikation mit sehr niedrigen Latenzzeiten. Dies wird durch eine Kombination aus Network Slicing und Edge Computing, die durch eine neue Netzwerkarchitektur ermöglicht werden, realisiert. Der amerikanische Autor Coursey [17] beschreibt das Network Slicing als eine fundamentale Fähigkeit, dass ein Netz für eine bestimmte Nutzung virtuell abgetrennt werden kann. Jeder Netzabschnitt kann hierbei dann unterschiedliche Merkmale aufweisen, Beispiele hierfür sind unter anderem ein Ende-zu-Ende-Durchsatz oder eine Latenzzeit. Das Hauptunterscheidungsmerkmal des Network-Slicing-Ansatzes zu anderen Lösungen besteht vor allem darin, dass das Network Slicing eben ein virtuelles Ende-zu-Ende-Netzwerk für einen bestimmten Nutzer bereitstellt, wobei dies nur im Rahmen des 5G ermöglicht werden kann. Das Network Slicing unterscheidet sich hierbei laut Experten sehr stark von QoS, weil es eben virtuelle End-zu-Ende-Netzwerke ermöglicht, die zudem über Rechen-, Speicher- und Netzwerkfunktionen verfügen. Aufgrund dieser als revolutionär angesehenen Eigenschaften wird das Network Slicing als Schlüsseltechnologie angesehen [17, S. 31].

Zusammenfassung Network Slicing

Zusammenfassend kann in Bezug auf das Network Slicing somit dargestellt werden, dass mithilfe dieser Technologie eine hohe Flexibilität, Skalierbarkeit, ein globaler Ansatz, ein

hoher Grad an Integrationsmöglichkeit für andere Technologien sowie ein hoher Grad an Sicherheit und Datenschutz verfügbar gemacht werden kann. Diese Vorteile sind aber nur unter Verwendung der 5G-Technologie nutzbar.

Gleichzeitig muss festgestellt werden, dass in der gefundenen Literatur die Technologie des Network Slicing in städtischen Gebieten untersucht, aber ländliche Umgebungen nicht groß betrachtet wurden.

3.1.2 Integration der Multi-Radio-Access-Technologie

Laut Autoren wie Yadav und Singhal [90, S. 99] unterstützen Kommunikationsnetze der fünften Generation mehrere Funkzugangstechnologien, die im Allgemeinen unter der Bezeichnung Multi-Radio-Access-Technology bekannt sind. Diese Technologie wird genutzt, damit Dienste für praktisch alle Mobilfunkteilnehmer in den Netzen von älteren Generationen, wie bspw. 4G, ermöglicht werden können. Eine eindeutige Zuweisung eines sogenannten Interleavers an jeden aktiven Mobilfunkteilnehmer innerhalb einer Intra-Multi-Radio-Access-Technologie stellt laut Experten eine vergleichsweise einfache Aufgabe dar. Dies allerdings wird zu einer Herausforderung, wenn eine solche Multi-Radio-Access-Technologie-gestützte Kommunikation wie LoRa bzw. LPWAN erforderlich wird. Die beiden Autoren Yadav und Singhal [90, S. 99-100] beschreiben in ihrem Beitrag eine theoretische Lösung, damit diese Herausforderung bewältigt werden kann. Die vorgeschlagene Lösung wird als Store-Regenerate-Recall(SRR)-Technik für eine Interleaver-Zuweisung in einem 5G-Netzwerk mit einer Unterstützung von Multi-Radio-Access-Technologie bezeichnet. Diese Lösung wird laut der beiden Autoren als eine sehr effektive und einfach zu implementierende angesehen, die das Problem der Interleaver-Zuweisung am Ende eines 5G-Netzwerks in Multi-Radio-Access-Technologien-Szenarien lösen kann. Dies geschieht zudem, ohne dass es zu Konflikten mit Teilnehmeridentitäten kommt. Diese Lösung gilt als Methode von großer Bedeutung, wenn sogenannte Multi-Carrier-MultiRadio-Access-Technologie-Lösungen in Verbindung mit LoRa bzw. LPWAN für 5G-Netze entwickelt werden sollen [90, S. 99-101].

In den letzten Jahren wurden für das IoT unabhängig voneinander in verschiedenen Anwendungsbereichen Lösungsansätze eingeführt, die alle auf bestimmte Anwendungsfälle für den Alltag abzielen. Dies hat unter anderem auch zu einer Vielzahl an unterschiedlichen Anwendungsarchitekturen und Funkzugangstechnologien wie der Multi-Radio-Access-Technology in Verbindung mit LoRa und LPWAN geführt. Zukünftige Her-

ausforderungen, insbesondere in Smart Cities und intelligenten Industrien, erfordern laut Autoren wie Hazra u. a. [29, S. 189] eine Kombination von drahtlosen Technologien wie LoRa bzw. LPWAN, damit verschiedene Anwendungsfälle für das IoT realisiert werden können. Der Mangel an integrierter Infrastruktur für einen konvergenten Zugang wird in sehr vielen Fällen aufgrund der ständig wachsenden Anzahl an Radio-Access-Technologien sowie dem Fehlen eines einzigen effektiven Lösungsansatzes, der den Anforderungen für praktisch alle IoT-Anwendungsfälle gerecht wird, noch verstärkt. Die bislang zum Einsatz kommenden Lösungen wurden immer für eine spezielle Funkhardware für verschiedene Kommunikationstechnologien verwendet. Diese Lösungsansätze waren schwer skalierbar und relativ unflexibel. Daher wird im Rahmen des Artikels der Autoren Hazra u. a. [29, S. 190-191] untersucht, wie sich der Einsatz von MultiRadio-Access-Technologien in Verbindung mit LoRa auf IoT-Anwendungsfälle auswirkt.

Das neue Internet der bewegten Dinge geht mittlerweile einen Schritt weiter als das bislang bekannte IoT. In diesem Zusammenhang wird im Zuge des Artikels von Sanchez-Iborra u. a. [78, S. 14-24] die Integration von neuen umweltfreundlichen mobilen Geräten wie bspw. Fahrräder oder Roller in kooperativen Verkehrssystemen und smarten Stadtökosystemen in Bezug auf eine Bereitstellung von neuartigen Diensten untersucht. Zu diesem Zweck werden in der Arbeit Kommunikationstechnologien wie z. B. Mobilfunk, Fahrzeug-WiFi oder LPWAN untersucht. Laut der Autoren kann jedoch scheinbar keine von diesen Technologien den Energieverbrauch sowie die Anforderungen an die QoS vollständig erfüllen. Aus diesem Grund schlagen die Autoren des Artikels vor, dass ein sogenanntes Decision Support System (DSS), also ein Entscheidungsunterstützungssystem, eingesetzt wird, das auf einer überwachten Klassifizierung von Machine Learning basiert. Mithilfe dieser Vorgehensweise soll eine am besten geeignete Übertragungsschnittstelle für die Übertragung von bestimmten Daten in einem Multi-Radio-Access-Technologie-Setup in Verbindung mit LoRa bzw. LPWAN ausgewählt werden können. Hierzu wurden verschiedene Machine-Learning-Algorithmen unter Berücksichtigung von Rechen- und Energiebeschränkungen des Internet der bewegten Dinge sowie der Art des Verkehrs untersucht. Außerdem wird in dem Artikel eine reale Implementierung eines Entscheidungsbaum-basierten DSS für Mikrocontroller-Einheiten vorgestellt und bewertet [78, S. 13-14].

Durch den vermehrten Einsatz einer großen Anzahl an IoT-Geräten in digitalen Unternehmen wird eine effiziente und skalierbare maschinengestützte Kommunikation erfordert. Die gleichzeitigen Netzzugriffe aufgrund der ständig wachsenden Anzahl von Geräten für eine maschinelle Kommunikation führen daher in sehr vielen Fällen zu ei-

ner ernsthaften Überlastung des sogenannten Random Access Channel (RACH). Dies führt in weiterer Folge zumeist zu großen Verzögerungen oder zur Nichtverfügbarkeit von Diensten. Darüber hinaus könnten die knappen lizenzierten Frequenzbänder für neu entstehende maschinengestützte Kommunikationsformen und Anwendungen nicht ausreichen, wodurch laut der Autor Hsu u. a. [31, S. 1] eine Untersuchung des unlizenziierten Bandspektrum als durchaus erforderlich angesehen werden kann. Die kürzlich entwickelten Multi-Radio-Access-Technologien in Verbindung mit LPWAN könnten laut Experten dazu beitragen, um insbesondere die Zuverlässigkeit des Zufallszugriffs von Geräten in einer dichten Umgebung der Fabriken der Zukunft verbessern zu können. Die durchgeführte Studie in dem Artikel zeigt auf, dass bei einer geeigneten Verkehrsverlagerung auf die lizenzierte und unlizenziierte Radio-Access-Technologie in Verbindung mit LoRa bzw. LPWAN eine Zugriffswahrscheinlichkeit des in dem Artikel vorgeschlagenen Schemas im Grunde beibehalten werden kann, wobei allerdings die Zugriffsverzögerung leicht zunimmt [31, S. 1-2].

Zusammenfassung Integration der Multi-Radio-Access-Technologie

Praktisch alle Arbeiten, in denen der Einsatz von Multi-Radio-Access-Technologien untersucht wurden, konnten aufzeigen, dass ein operativer Einsatz von Multi-Radio-Access-Technologien in Verbindung mit LoRa bzw. LPWAN für einen Einsatz von IoT und digitalen Fabriken der Zukunft als sehr gut geeignet angesehen werden kann.

3.1.3 Integration mit anderen Technologien

Die LoRa-Technologie kann laut Experten in der Praxis nicht allen geplanten Anwendungen für das IoT gerecht werden, vielmehr ist es laut Untersuchungen der Einsatz bzw. die Kombination von mehreren unterschiedlichen Technologien, die eine erfolgreiche Integration von Technologien realisieren kann. In dem Buch von Linnemann u. a. [51, S. 71-92] werden speziell Anwendungsfälle im Bereich des Smart Metering, Smart Parking und Smart Waste auf die Integration von Technologien untersucht. Zudem wird ein Überblick über Use-Cases von weiteren LPWAN-Anwendungen gegeben. Vor allem diese Use-Cases zeigen auf, dass LoRa und LPWAN sehr gut für die Integration von Technologien geeignet sind [51, S. 71-92].

Im Rahmen des Buches von Günthner und Dollinger [28, S. 33-36] werden die Leser aufgeklärt, warum die vierte industrielle Revolution mit der Digitalisierung heutzutage im

Grunde alle Menschen betrifft und warum in manchen Fällen nicht die Technologie, sondern der Mensch einen Unterschied ausmachen kann. In dem Buch werden methodische Werkzeugkasten sowie konkrete Empfehlungen diskutiert, die dabei jeweils die Dimensionen der Organisation, der Technologie sowie des Menschen genauer betrachten. Im Zuge des zweiten Kapitels werden bei der Untersuchung des IoT Integrationsmöglichkeiten wie bspw. LPWAN sowie andere Ende-zu-Ende-Technologien untersucht. Es wird hierbei untersucht, welche grundsätzliche Möglichkeiten bestehen, um IoT-Netze und Technologien im industriellen Umfeld verknüpfen zu können [28, S. 33-36].

Im Zuge des digitalen Wandels bieten die Technologien des IoT oder der KI für Unternehmen große Chancen, um Geschäftsmodelle transformieren zu können. Diese Chancen werden heutzutage in erster Linie von sogenannten Digital-Champions und Start-ups genutzt. Eine zentrale These des Buches von Kaufmann und Servatius [40] ist, dass die heutigen digitalen Technologien als Game-Changer fungieren und dabei die Spielregeln des heutigen Wettbewerbs verändern. Dies wird durch die beiden Autoren in mehreren Blöcken umgesetzt. So wird unter anderem im Rahmen des zweiten Kapitels behandelt, welche Technologien und Übertragungstechniken im industriellen Umfeld eingesetzt werden können, damit Maschinen, Prozesse usw. intelligent gemacht werden können. Zudem wird erörtert, wie verschiedene Technologien miteinander verknüpft werden können [40, S. 5-7].

Zusammenfassung Integration von anderen Technologien

Die Idee des IoT ist zwar nicht ganz neu, doch werden durch die heutigen digitalen Möglichkeiten völlig neue Chancen geboten. Diese Chancen werden in der Praxis meistens so realisiert, dass eine Integration mit anderen Technologien erfolgt. Dies konnten alle untersuchten Arbeiten eindeutig belegen.

3.2 Vor- und Nachteile Long Range Wide Area Network

Durch das IoT und den damit in Verbindung stehenden Technologien werden viele Anwendungen ermöglicht, die an eine Infrastruktur zum Teil sehr spezifische Anforderungen stellen. Als sehr vorteilhaft werden hierbei niedrige Kosten, ein geringer Energieverbrauch sowie eine gute Versorgung eines Netzes beschrieben. So besitzen alle zum Einsatz gebrachten Technologien sowohl Vor- als auch Nachteile, wobei dies natürlich auch auf

die LPWAN-Technologie zutrifft [42, S. 666]. Im Folgenden werden kurz die Vor- und Nachteile erläutert:

Vorteile

- die LoRa- bzw. LPWAN-Technologie stellt für einen Benutzer eine erhebliche Kosteneinsparung in Bezug auf die Bereitstellung einer Infrastruktur dar,
- auch in Bezug auf die Implementierung einer Infrastruktur werden LoRa- und LPWAN-Technologien als sehr einfach und kompatibel mit anderen Technologien angesehen,
- relativ geringe Kosten, sowohl bei der Einführung als auch bei der Wartung der LoRa- und LPWAN-Technologien,
- mithilfe von LoRa- und LPWAN-Technologien können praktisch alle smarten Lösungen miteinander vernetzt werden,
- LoRa- und LPWAN verfügen über eine große Reichweite,
- trotz einer relativ großen Reichweite bei der Übertragung wird sehr wenig Energie verbraucht [42, S. 666].

Nachteile

- Laut Experten wie Mahn [52, S. 93] liegt der aktuell einzige bekannte Nachteil der LoRa- bzw. LPWAN-Technologie darin, dass es gelegentlich zu Performance-Problemen des Protokolls im Zuge der Bestätigung eines Package-Erhalts kommen kann.

4 Experiment

Dieses Kapitel der vorliegenden Arbeit, das gleichzeitig den Hauptteil darstellt, widmet sich der Durchführung und Analyse des Experiments. Hierbei werden in diesem Kapitel die Vorgehensweise des Experiments sowie die Analyse der aus dem Experiment resultierenden Daten in entsprechender Form dargelegt.

4.1 Vorgehensweise des Experiments

Das Experiment für die vorliegende Arbeit besteht im Wesentlichen aus drei grundlegenden Elementen: einem Gateway, einem Server und dem LoRa-Endpunkt.

Der Aufbau des Gateways ist hierbei so, dass dieses grob betrachtet aus einer Antenne, einem sogenannten LoRaWAN Concentrator, einem selbstkonstruierten Interface-Board sowie einem Raspberry Pi 4 besteht. Die genannten Komponenten des Gateways werden im Folgenden noch kurz etwas genauer vorgestellt:

- Antenne

Bei der zum Einsatz kommenden Antenne handelt es sich um eine Antenna 868 MHz mit fünf decibel isotrop (dBi). Der sogenannte dBi-Wert, der auch als Antennengewinn bezeichnet wird, repräsentiert den Wirkungsgrad sowie die Richtwirkung von einer Antenne und stellt somit einen Verhältniswert der in Hauptrichtung aufgenommenen Strahlungsleistungsdichte dar [50, S. 517-519].

- LoRaWAN Concentrator

Der für das vorliegende Experiment verwendete LoRaWAN Concentrator iC880A eignet sich sehr gut für viele verschiedene Anwendungsmöglichkeiten. Hierzu zählen unter anderem Smart Metering, IoT- oder M2M-Anwendungen. Diese Komponente wird zu den mehrkanaligen Hochleistungssende- und Empfangsmodulen gezählt,

da mithilfe dieses Elements gleichzeitig dafür gesorgt ist, mehrere LoRa-Pakete mit unterschiedlichen Spreizfaktoren auf mehreren Kanälen empfangen zu können. Das iC880A-SPI LoRaWAN Concentrator 868 MHz kann in ein Gateway als komplettes Radiofrequenz(RF)-Frontend integriert werden. Es bietet die Möglichkeit, eine robuste Kommunikation zwischen einem LoRa-Gateway und einer großen Anzahl von LoRa-Endknoten zu ermöglichen, die über einen großen Entfernungsbereich verteilt sind [36, S. 25].

- Interface-Board

Das Interface-Board für das Gateway wurde durch den Verfasser der vorliegenden Arbeit selbst erstellt und dient dazu, dass die einzelnen Komponenten miteinander kommunizieren können.

- Raspberry Pi 4

Das Raspberry Pi stellt einen Minicomputer dar, der sich auf einer Platine befindet, die etwa die Größe einer Scheckkarte besitzt. Dieser Minicomputer lässt sich zudem auf sehr vielfältige Art und Weise erweitern. Aus diesem Grund eignet sich Raspberry Pi, der mittlerweile in der vierten Version vorliegt, zum Realisieren von verschiedensten Anwendungen [16, S. 154].

Auf dem in dem vorliegenden Experiment verwendeten Raspberry Pi 4 läuft das von der Firma Semtech entwickelte System LoRa Network Packet Forwarder. Diese Software ermöglicht die Konfiguration des iC880A-SPI Concentrators. Im Rahmen des Experiments werden die Daten bzw. Nachrichten vom Concentrator empfangen und dann mittels eines sogenannten Serial Peripheral Interface (SPI) an das Raspberry Pi 4 übertragen, wo die empfangenen Nachrichten dann verarbeitet werden können. Die von Semtech entwickelte Software LoRa Network Packet Forwarder leitet alle empfangenen Nachrichten über das User Datagram Protocol (UDP) an den eingesetzten Server weiter.

Das vom LoRa-Endpunkt gesendete Datenpaket ist für das vorliegende Vorhaben in Base64 codiert und enthält auch die tatsächliche Nachricht. Im Folgenden wird die im Rahmen des Experiments verwendete Nachricht bzw. die Codierung von dieser dargestellt.

Listing 4.1: Darstellung der in Base64 codierten Nachricht (Eigene Darstellung).

```
"rxp": [  
  {  
    "tmst": 1620604800000,  
    "chan": 1,  
    "rfch": 1,  
    "freq": 868.3,  
    "stat": -1,  
    "modu": "LORA",  
    "datr": "SF9BW125",  
    "codr": "4/5",  
    "lsnr": 5.8,  
    "rssi": -63,  
    "size": 32,  
    "data": "Q0FEUyByb2NrdCAtIERpZSBOYWNoemljaHQgTnIuIDE="
```

Die nachfolgende Abbildung stellt das zusammengestellte Gateway für das Experiment dar.

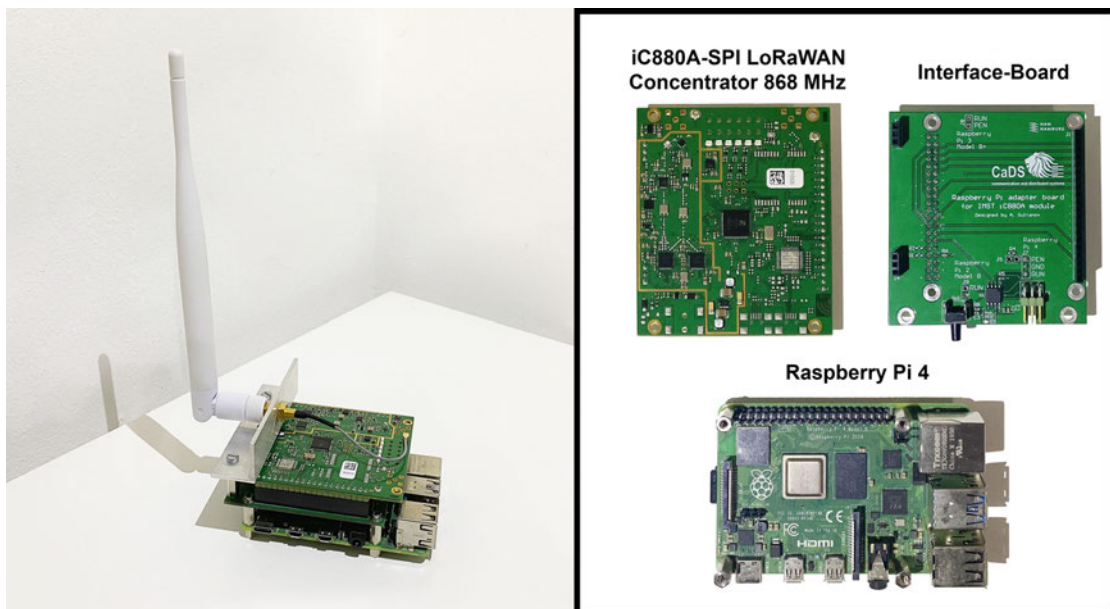


Abbildung 4.1: Darstellung des Gateways für das Experiment (Eigene Darstellung)

Die zweite wichtige Komponente in Bezug auf das Experiment stellt der Server dar. Als Serveranwendung wird eine vom Verfasser der vorliegenden Arbeit eigenständig entwickelte NodeJS-Anwendung mit einem NestJS-Framework verwendet.

Das NestJS repräsentiert hierbei ein Framework, mit dessen Hilfe ein Softwareentwickler auf effiziente Art und Weise skalierbare serverseitige NodeJs-Anwendungen erstellen kann. Im Zuge des NestJS-Frameworks wird ein progressives JavaScript verwendet, das in Form eines TypeScript aufgebaut ist, wobei einem Entwickler trotzdem ein Programmieren mit reinem JavaScript ermöglicht wird [58]. Zudem werden im Rahmen des NestJS-Frameworks Elemente aus dem Bereich der objektorientierten Programmierung (OOP) mit einer funktionalen und der funktionalen reaktiven Programmierung kombiniert. Das NestJS-Framework wird sehr stark durch Angular beeinflusst, was zur Folge hat, dass mithilfe von Konzepten wie Dependency Injection (ein Entwurfsmuster, damit die Abhängigkeit eines Objekts zur Laufzeit reglementiert wird), Separation of Concerns (eine Trennung der Verantwortlichkeiten) sowie einem entsprechend umfangreichen Generator eine sehr klare Architektur ermöglicht wird [58]. Diese Architektur bzw. das Framework kann laut Experten auch über verschiedene Projektteams hinweg verwendet werden, wodurch auch die Möglichkeit für eine serverseitige NodeJS-Implementierung in Enterprise-Projekten besteht. NestJS wird sehr häufig dazu benutzt, damit sogenannte Application Programming Interfaces (API) Endpoints bereitgestellt werden können [71].

Im Folgenden werden alle Module beschrieben, die im Rahmen des verwendeten Servers an NestJS angebunden sind:

- Der zum Einsatz kommende Server empfängt die Nachrichten vom Gateway, wobei diese Übertragung über UDP erfolgt. Damit diese Übertragung entsprechend realisiert werden kann, wird für das Experiment ein separates Modul angelegt.
- Nachdem die Daten an den Server übermittelt wurden, werden diese im Zuge des Experiments in der Datenbank MongoDB gespeichert. Bei MongoDB handelt es sich um ein in der Programmiersprache C++ entwickeltes dokumentenorientiertes Not-only-Structured-Query-Language(NoSQL)-Datenbankmanagementsystem, das in der Lage ist, Java-Script-Object-Notation(JSON)-ähnliche Dateien bzw. Dokumente zu verwalten [70].
- Mithilfe des sogenannten Serve Static Module wird im Rahmen des Experiments eine Angular-Anwendung an NestJS angebunden. Eine solche Anbindung macht es

möglich, dass aktuell empfangene Nachrichten eingesehen bzw. visualisiert werden können. Mittels des eingesetzten Websocket werden alle eingehenden Daten und Informationen in Echtzeit aktualisiert.

Wie schon zu Beginn der Arbeit kurz erörtert wurde, werden im Rahmen der vorliegenden Bachelor-Thesis zwei Experimente durchgeführt, um untersuchen zu können, wie sich eine Datenübertragung bei den beiden Anwendungsfällen einer winkelbeweglichem und einem nicht beweglichen LoRa-Endpunkt verhält. Diese beiden Anwendungsfälle werden in den nachfolgenden beiden Kapiteln in entsprechender Form beschrieben.

4.1.1 Beschreibung des ersten Experimentes

Das erste Experiment, welches im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit durchgeführt wurde, untersucht die LoRa-Datenübertragung von einem nicht beweglichen LoRa-Endpunkt. Dies erfolgte so, dass das zuvor beschriebene Gateway über einen Wireless Local Area Network (WLAN) Hotspot mit dem Internet verbunden wurde. Das Gateway wurde für das Experiment an einem Seeufer aufgestellt. Es wurden zwei Stellen auf den Seeufern ausgesucht, welche frei von Bäumen und Büschen waren. Dadurch wurde eine freie Sicht zwischen beiden Geräten sichergestellt.

Für das Experiment wurde auf dem gegenüberliegenden Seeufer ein LoRa-Endpunkt aufgestellt, wobei es sich bei diesem LoRa-Endpunkt um den Endpunkt-Typ Arduino Uno mit Dragino Shield (Abb. 4.2) handelt. Die Entfernung zwischen dem LoRa-Endpunkt und dem Gateway betrug etwa 1,25 Kilometer (die Entfernung zwischen den beiden Punkten wurde mithilfe von Google-Maps nachgemessen bzw. festgestellt).



Abbildung 4.2: Arduino Uno mit Dragino Shield [20]

Im Rahmen des Experimentes wurden mehrere Versuche durchgeführt, damit die Korrektheit der Durchführung sichergestellt werden kann. Insgesamt wurden drei Versuche durchgeführt, wobei pro Bandbreite und Streufaktor jeweils 500 Nachrichten übertragen wurden. Es wurde eine ähnliche Anzahl der Nachrichten pro Sendefrequenz gewählt wie in den Experimenten von verwandten Arbeiten, die sich mit Evaluierung der LoRa-Modulation beschäftigen [68, 46].

In der nachfolgenden Abbildung sind anhand eines Kartenausschnitts nicht nur die Standorte des Gateways und des LoRa-Endpunktes, sondern auch die Entfernungsmessung dargestellt.

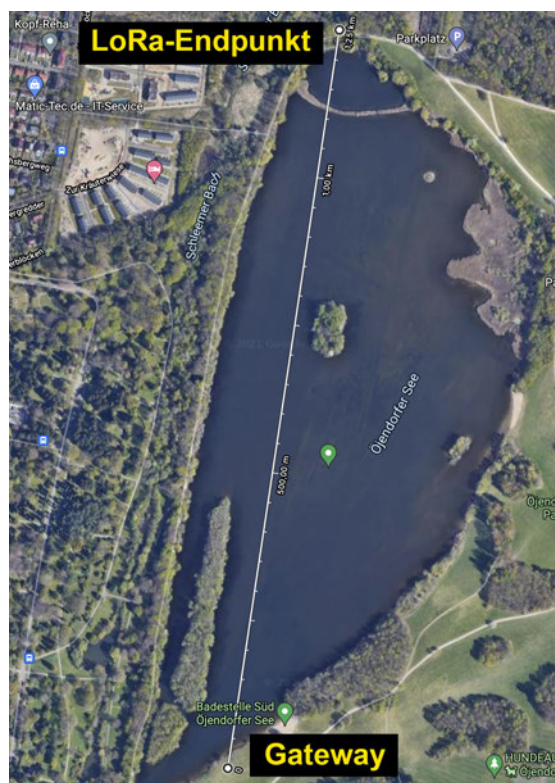


Abbildung 4.3: Position des LoRa-Gateways und LoRa-Endpunktes auf dem Gelände während des ersten Experimentes [54]

4.1.2 Beschreibung des zweiten Experimentes

Im zweiten Experiment wurde der Anwendungsfall von einem winkelbeweglichen LoRa-Endpunkt untersucht. Das zweite Experiment kann im Grunde nicht nur aufgrund der

Durchführung, sondern auch anhand des Aufbaus als reines Laborexperiment angesehen werden. Denn dieses zweite Experiment findet im Gegensatz zum ersten Experiment nur im Inneren statt. Da laut Ansicht des Verfassers der vorliegenden Arbeit das zweite Experiment etwas komplexer ist als das erste Experiment, wird dieses Experiment etwas ausführlicher diskutiert.

Für das zweite Experiment wurde ein normales Fahrrad (Mountainbike) als Basismodell verwendet. Bei diesem Fahrrad wurde zur Durchführung des Experiments das vordere Rad durch ein elektrisch angetriebenes Rad ausgetauscht. Ein elektrisch angetriebenes Rad wurde deshalb verwendet, weil dadurch die Drehzahl recht exakt gesteuert werden kann.

Der Controller, mit dessen Hilfe das Elektrorad gesteuert wurde, wurde über eine serielle Schnittstelle, die über die Computing-Plattform Arduino erfolgte, mit einem Rechner verbunden. Mithilfe einer durch den Verfasser der vorliegenden Arbeit selbst entwickelten Electron- und Angular-Anwendung wurde das elektrisch betriebene Rad gesteuert. Hierbei wurde dann die aktuelle Anzahl der Radumdrehungen in Revolutions per Minute (Drehzahl pro Minute, rpm) durch den Motor-Controller gemessen und an das entwickelte Steuerpanel übermittelt. Über das Steuerpanel wurde die in rpm gemessenen Radumdrehungen in Kilometer pro Stunde (km/h) umgerechnet und auf dem Bildschirm über das Steuerpanel ausgegeben. Über das Steuerpanel wurde dem durchführenden Akteur des Experiments zudem die Möglichkeit bereitgestellt, eine gewünschte Geschwindigkeit für das elektrische Rad einzustellen. Die aktuelle Geschwindigkeit des Rades wurde mithilfe eines sogenannten Digitalpotentiometers gesteuert.

Für dieses Experiment wurde als ein LoRa-Endpunkt ein Wireless Stick von der Firma Helteck (Abb. 4.4) verwendet.



Abbildung 4.4: Wireless Stick von der Firma Helteck (eigene Darstellung)

Dieser LoRa-Endpunkt verfügt ebenso wie der im ersten Experiment verwendete Endpunkt über einen Frequenzbereich von 868 MHz. Der LoRa-Endpunkt wurde über einen Akku mit dem notwendigen Strom versorgt. Der Akku und der LoRa-Endpunkt haben ein Gesamtgewicht von 128 Gramm. Da sowohl der Akku als auch der LoRa-Endpunkt somit ein zusätzliches Gewicht auf einer Seite des Fahrradreifens aufbringen, muss auf der gegenüberliegenden Seite des Reifens eine Art von Gegengewicht montiert werden. Dies wird als notwendig erachtet, weil zum einen der Fahrradreifen ansonsten eine gewisse Unwucht besitzt und zum anderen, weil es dadurch bei einer höheren Radumdrehung zu zusätzlichen Vibrationen kommt, die dann die Messergebnisse beeinträchtigen können. Damit eben genau diese Vibrationen vermieden werden können, wurde am Rad ein entsprechendes Gegengewicht montiert.

In der nachfolgenden Abbildung 4.5 sind der auf dem Fahrradreifen montierte Akku, der LoRa-Endpunkt sowie das Gegengewicht abgebildet.



Abbildung 4.5: Darstellung der Montage von Akku, LoRa-Endpunkt und dem Gegengewicht (eigene Darstellung)

Wie ebenfalls schon erörtert, wurde das zweite Experiment so durchgeführt, dass der LoRa-Endpunkt an einem Fahrradreifen montiert wurde. Dieser Fahrradreifen wurde dann mittels eines Elektromotors angetrieben, der durch eine Steuereinheit geregelt werden kann. Auf diese Art und Weise wird im zweiten Experiment eine winkelbewegliche Übertragung simuliert. Die Simulation, die im Übrigen in einem Raum durchgeführt wurde, erfolgte ebenfalls so, dass drei Durchläufe bzw. Versuche ausgeführt wurden. Pro Bandbreite, Streufaktor und einer konstanten Geschwindigkeit wurden drei Übertragungsversuche mit 500 Nachrichten ausgeführt. Die Geschwindigkeit lag zwischen 25 bis 71 km/h. Neben den Raumbedingungen besteht der größte Unterschied darin, dass sich der LoRa-Endpunkt mit einer konstanten Geschwindigkeit im Kreis bewegt während die Übertragungen stattfinden.

Die nachfolgende Abbildung 4.6 stellt einen Schnappschuss des laufenden Betriebs des zweiten Experiments dar.



Abbildung 4.6: Durchführung des zweiten Experiments (Eigene Darstellung)

4.2 Analyse der Daten

In diesem Abschnitt der vorliegenden Bachelor-Thesis werden die Daten, die im Zuge der beiden vorangegangenen Kapitel beschriebenen Experimente erhoben wurden, analy-

siert. Hierzu werden die gesammelten Daten der beiden Experimente genau dargestellt, analysiert und am Ende miteinander verglichen.

Zuvor werden allerdings die grundlegendsten und zugleich wichtigsten im Rahmen der beiden Experimente verwendeten Messdaten bzw. -einheiten, anhand derer eine Datenanalyse durchgeführt wird, kurz erläutert. Zu den fundamentalen Messeinheiten bei den Experimenten zählen hierbei wie folgt:

- Bandbreite (Bandwidth, BW),
- Spreizfaktor (Spreading Factor, SF),
- Kodierungsrate (Coding Rate, CR),
- Signal-Rausch-Verhältnis (Signal-to-Noise Ratio, SNR) und
- Empfangsfeldstärke (Received Signal Strength Indication, RSSI).

Im Folgenden werden diese für die beiden Experimente genannten fundamentalen Messeinheiten noch kurz erörtert:

- Bandbreite

Die LoRa-Technologie stellt neben den SF (diese wird später noch genauer beschrieben) drei unterschiedliche BW für eine Datenübertragung zur Verfügung, wobei diese BW die Werte von 125, 250 und 500 Kilohertz (KHz) umfassen können. Die jeweilige Bandbreite wird hierbei immer von einer regional zuständigen Behörde festgelegt [43]. Bei den beiden Experimenten wurden diese unter Verwendung der beiden BW 125 und 250 KHz durchgeführt.

- Spreizfaktor

In Bezug auf die LoRa-Technologie beschreibt der SF wie viele Chirps (diese geben an, wie viele Datenpakete pro Sekunde übertragen werden) in einer Sekunde übertragen werden. Durch die SF wird somit die Bitrate für ein Symbol von abgestrahlter Energie sowie dessen Reichweite festgelegt. Bei der LoRa-Technologie wurde für eine höhere Variabilität ein Spreading Faktor zwischen SF7 und SF12 eingeführt [59]. Im Rahmen der beiden Experimente kamen variable SF zum Einsatz, so wurde beim Experiment eins eine SF-Breite zwischen sieben bis zwölf und beim zweiten Experiment nur die beiden SF-Varianten sieben und zwölf eingesetzt.

- Kodierungsrate

Die CR ist im Grunde dafür zuständig, dass eine Fehlerreduktion bei der Übertragung von Daten und Informationen durchgeführt werden kann. Hierzu werden im Header Bits hinzugefügt, um auf diese Art und Weise diese am Empfangspunkt überprüfen zu können [4, S. 26]. Das Hinzufügen von zusätzlichen Bits im Header funktioniert so, dass einige redundante Bits hinzugefügt werden, damit auf diese Weise die Informationen auf mehr Bits verteilt werden können. Dadurch entsteht zwar ein höherer Übertragungsaufwand, allerdings wird dadurch gleichzeitig die Fehlerwahrscheinlichkeit reduziert. Unter anderem, weil sich im Rahmen einer Übertragung die Kodierungsrate verändern kann [72, S. 67]. Im Rahmen der durchgeführten beiden Experimente wurde eine standardisierte Kodierungsrate von 4/5 verwendet.

- Signal-Rausch-Verhältnis

Die SNR repräsentiert das Verhältnis zwischen einem übertragenen Nutzsignal und einem Rauschen, welches durch ein betrachtetes Gerät verursacht wird. Das Rauschen wird hierbei nicht durch die digitalen Daten, sondern durch die analogen Komponenten von einem Gerät verursacht. Das SNR wird in Dezibel (dB) gemessen, zudem wird im Zuge des Experiments der Mittelwert des SNR gemessen [62, S. 84].

- Empfangsfeldstärke

Der RSSI stellt einen Indikator dar, mit dessen Hilfe die Empfangsstärke von kabellosen Kommunikationsanwendungen gemessen werden kann. Die gemessene Einheit repräsentiert hierbei eine Verhältniszahl, wobei der gemessene Wert in Abhängigkeit von einer Anwendung entsprechend interpretiert werden muss. Wie schon die SNR auch, wird auch der RSSI in dB gemessen [4, S. 35]. Auch dieser Wert wird, genauso wie der SRN, im Rahmen des Experiments anhand eines Mittelwerts gemessen.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Messdaten der zuvor beschriebenen Daten aus den beiden Experimenten in übersichtlicher Form (in Form von Tabellen) dargestellt.

4.2.1 Daten des erstens Experimentes

Wie schon im Rahmen der Arbeit erörtert, wurden beim ersten Experiment Messdaten aufgenommen, die von einem nicht beweglichen LoRa-Endpunkt stammen. Das Experiment wurde, wie im Kapitel 4.1.1 beschrieben wurde, im Freien durchgeführt, wobei das Gateway und der LoRa-Endpunkt auf zwei gegenüberliegenden Seeufern aufgebaut waren und dadurch auch ohne jegliche Sichtbehinderung miteinander über eine Strecke von rund 1,25 Kilometer kommunizieren konnten.

Die Datenübertragung wurde im ersten Experiment ohne Sichteinschränkungen durchgeführt. Der SF wurde pro Durchlauf bei der BW von 125 KHz von sieben progressiv auf zwölf gesteigert. Beim Durchlauf mit der BW von 250 KHz wurde dann die SF von sieben verwendet. Die CR betrug bei allen durchgeführten Durchläufen eine Rate von 4/5. Als Basisfrequenz wurde das Frequenzband von durchgehend 868,3 MHz angewendet. Die durchschnittliche RSSI beim ersten Experiment beträgt laut des errechneten Mittelwerts der Messdaten einen Wert von -78,99 dB, wobei das Spektrum zwischen -74,6 bis -93,74 dB variiert.

Der durchschnittliche SNR-Wert beträgt im Rahmen des ersten Experiments 9,7 dB, wobei sich die gemessenen dB-Werte zwischen 7,95 bis 10,89 bewegen.

In der nachfolgenden Tabelle 4.1 sind die beschriebenen Messwerte in übersichtlicher Form dargestellt.

Tabelle 4.1: Aufgenommene Werte beim ersten Experiment (Eigene Darstellung)

BW (KHz)	SF	CR	Frequenz (MHz)	mittleres RSSI (dB)	mittleres SNR (dB)
125	7	4/5	868,3	-74,63	9,14
125	8	4/5	868,3	-74,6	10,65
125	9	4/5	868,3	-78,01	10,89
125	10	4/5	868,3	-76,79	9,93
125	11	4/5	868,3	-76,5	10,34
125	12	4/5	868,3	-93,74	9,04
250	7	4/5	868,3	-78,7	7,95
Mittelwerte:				-78,99571429	9,705714286

In diesem zweiten Teil der Experimentdatenbeschreibung bzw. -darstellung – wie ebenfalls bereits im Kapitel 4.1.1 kurz beschrieben wurde, wurden im Rahmen des Experi-

ments bei jedem Durchlauf drei Versuche mit je 500 Nachrichten versendet, also wurden insgesamt 1500 Nachrichten pro Durchlauf übertragen.

Es wurde gemessen bzw. überprüft, wie viele von den 1500 Nachrichten pro Durchlauf dann tatsächlich fehlerfrei empfangen wurde. Die Anzahl der empfangenen Nachrichten, die über die rund 1,25 Kilometer von einem Seeufer zum anderen übertragen wurden, schwankte zwischen 1427 und 1467 Nachrichten. Das entspricht einem durchschnittlichen prozentuellen Wert an empfangenen Nachrichten von 96,67 Prozent, wobei der prozentuelle Anteil an empfangenen Nachrichten zwischen 95,10 und 97,80 pendelt.

In der nachfolgenden Tabelle 4.2 werden die zuvor kurz beschriebenen Werte der übertragenen Nachrichten in tabellarischer Form visualisiert.

Tabelle 4.2: Aufgenommene Werte der Nachrichtenübertragung des ersten Experiments (Eigene Darstellung)

BW (KHz)	SF	Anzahl der gesendeten Nachrichten	Anzahl der empfangenen Nachrichten	Erfolgsquote in Prozent
125	7	1500	1448	96,50%
125	8	1500	1467	97,80%
125	9	1500	1433	95,53%
125	10	1500	1462	97,50%
125	11	1500	1465	97,67%
125	12	1500	1449	96,60%
250	7	1500	1427	95,10%
Mittelwerte:			1450,142857	96,67%

4.2.2 Daten des zweiten Experimentes

Bei diesem wie im Kapitel 4.1.2 beschriebenen Experiment wurde ein Lora-Endpunkt (Sender) an ein elektrisch betriebenes Vorderrad eines Fahrrades angebracht. Dieser Sender übertrug die Nachrichten an einen LoRa-Gateway (Empfänger). Dieses Experiment stellte aufgrund des bewegten Senders viel höher Ansprüche an den Empfänger und somit auch an die Datenübertragung sowie eben insgesamt an das gesamte Experiment.

Im Zuge dieses zweiten Experiments wurde bei jedem Durchlauf die Umdrehung des Rades mit dem Sender schrittweise von 25,4 bis auf 71 km/h erhöht, wobei die Geschwindigkeit über die Umdrehung, die in rpm gemessen wurde, des Rades gemessen und danach umgerechnet wurde.

Die im Folgenden dargestellte Tabelle 4.3 stellt die Radumdrehungen in rpm sowie die dazugehörige Geschwindigkeit in km/h dar.

Tabelle 4.3: Darstellung der Drehzahl und der daraus errechneten Geschwindigkeit (Eigene Darstellung)

Drehzahl (rpm)	Geschwindigkeit (km/h)
190	25,4
305	40,8
377	50,5
536	71

Wie schon im Zuge des ersten Experiments erfolgte die Datenübertragung bei den Durchläufen mit den beiden BW von 125 und 250 KHz. Im Gegensatz zum ersten Experiment wurden beim zweiten Experiment nur zwei unterschiedliche SF angewendet. So wurde bei den ersten beiden Durchläufen der SF-Faktor 7 und im letzten Durchlauf dann das Maximum mit 12 verwendet. Die CR allerdings ist wie im Rahmen des ersten Experiments mit dem Faktor 4/5 und wie beim ersten Experiment auch schon wird als Basisfrequenz durchgehend das Frequenzband von 868,3 MHz verwendet.

Beim zweiten Experiment beträgt anhand des errechneten Mittelwerts die durchschnittliche RSSI 72,71 dB. Das Spektrum der aufgezeichneten RSSI nimmt hierbei Werte zwischen -70,65 und -75,32 dB ein.

Der durchschnittliche Wert des SNR nimmt im zweiten Experiment einen Wert von 6,88 dB ein. Die Werte bewegen sich hierbei in einem Spektrum zwischen 2,26 und 9,39 und

erfahren somit eine relativ große Streuung.

In der nachfolgenden Tabelle 4.4 sind die zuvor beschriebenen und aufgenommenen Messwerte übersichtlich dargestellt.

Tabelle 4.4: Aufgenommene Werte beim zweiten Experiment (Eigene Darstellung)

Drehzahl (rpm)	BW (KHz)	SF	CR	Frequenz (MHz)	mittleres RSSI (dB)	mittleres SNR (dB)
190	250	7	4/5	868,3	-73,64	8,98
305	250	7	4/5	868,3	-72,68	9,2
377	250	7	4/5	868,3	-71,97	9,39
536	250	7	4/5	868,3	-72,32	9,17
190	125	7	4/5	868,3	-70,65	8
305	125	7	4/5	868,3	-71,18	8,28
377	125	7	4/5	868,3	-71,16	8,2
536	125	7	4/5	868,3	-71,56	8,08
190	125	12	4/5	868,3	-74,18	4,13
305	125	12	4/5	868,3	-74,02	3,6
377	125	12	4/5	868,3	-73,86	3,31
536	125	12	4/5	868,3	-75,32	2,26
Mittelwerte:					-72,71166667	6,883333333

Wie schon im ersten Experiment wurden im folgenden Abschnitt der Datendarstellung wurden die gesendeten Nachrichten sowie die korrekt am LoRa-Endpunkt empfangenen Nachrichten in übersichtlicher Weise aufgezeigt. Ebenfalls wie beim ersten Experiment wurden insgesamt drei Versuche durchgeführt, wobei pro Bandbreite, Streufaktor und Drehzahl jeweils 500 Nachrichten übertragen wurden. Beim zweiten Experiment ergibt sich bei den korrekt empfangenen Nachrichten der zwölf Versuche ein Mittelwert von 1279,08 Nachrichten und die durchschnittliche Erfolgsquote von 85,25 Prozent.

Tabelle 4.5: Aufgenommene Werte der Nachrichtenübertragung des zweiten Experiments (Eigene Darstellung)

Drehzahl (rpm)	BW (KHz)	SF	Anzahl der gesendeten Nachrichten	Anzahl der empfangenen Nachrichten	Erfolgsquote in Prozent
190	125	7	1500	1445	96,30%
305	125	7	1500	1419	94,60%
377	125	7	1500	1436	95,70%
536	125	7	1500	1337	89,13%
190	125	12	1500	1373	91,50%
305	125	12	1500	1306	87,00%
377	125	12	1500	813	54,20%
536	125	12	1500	544	36,27%
190	250	7	1500	1441	96,06%
305	250	7	1500	1447	96,40%
377	250	7	1500	1443	96,20%
536	250	7	1500	1345	89,67%
Mittelwerte:				1279,083333	85,25%

Im nachfolgenden fünften Kapitel der Arbeit werden die hier im Rahmen dieses Kapitels dargestellten und erläuterten Ergebnisse der beiden Experimente interpretiert.

5 Ergebnisse

Im Rahmen dieses Kapitels der Bachelor-Thesis werden die gesammelten Messwerte aus dem vorherigen Kapitel entsprechend interpretiert. Anhand dieser in diesem Kapitel vorgenommenen Interpretationen können dann Rückschlüsse in Bezug auf die durchgeführten Experimente gemacht werden.

5.1 Interpretation der Ergebnisse

Bereits beim Vergleich der RSSI und SNR kann, auch wenn die Unterschiede nicht allzu deutlich erscheinen, festgestellt werden, dass die gemessenen Werte beim winkelbeweglichen Experiment doch schlechter ausfallen als bei einem nicht beweglichen LoRa-Endpunkt.

Anhand der empfangenen Nachrichten kann eindeutig darauf geschlossen werden, dass bei der Datenübertragung beim winkelbeweglichen LoRa-Endpunkt eine abnehmende Leistung einhergehend mit einer geringeren Erfolgsquote bei den empfangenen Nachrichten beobachtbar ist. Je höher die Drehgeschwindigkeit des LoRa-Endpunktes wird, desto geringer wird dann die Qualität bezüglich der empfangenen Nachrichten. Auffällig war hierbei unter anderem auch, dass ein Zusammenhang zwischen einer höheren SF, der Drehzahl des Rades und der geringeren Qualität der erfolgreich empfangenen Nachrichten beobachtbar ist. Zusätzlich nimmt bei der Simulation eines winkelbeweglichen LoRa-Endpunkt mit der höheren Drehgeschwindigkeit auch das mittlere SNR deutlich ab.

Das erste Experiment, mit dem nicht beweglichen LoRa-Endpunkt und fest installierten Gateway, weist eine hohe Nachrichtenübertragungsqualität auf. Die gemessenen Werte sind über die gesamte Simulation hinweg praktisch unverändert und die Übertragung

bleibt entsprechend stabil. Dem durchgeführten Experiment folgend kann daher behauptet werden, dass bei fest installierten Sendern und Empfängern eine sehr gute Signalabdeckung gewährleistet werden kann.

Im Gegenteil dazu erkennt man beim winkelbeweglichen LoRa-Endpunkt, wie das Experiment zeigt, eine deutliche Verschlechterung der Erfolgsquote des Empfanges. Je unruhiger die Sendequelle im Rahmen des Signalsenders ist, desto geringer ist die Qualität der Datenübertragung. Es entsteht also eine sehr große Streuung, unter der die Qualität enorm leidet.

Daraus kann unter anderem geschlossen werden, dass sich die LoRa-Modulation nur unter bestimmten Parametereinstellungen für die mobile Anwendungen eignet, wenn die Daten während der Bewegung ausgetauscht werden müssen. Für eine genauere Analyse ist es sinnvoll, weitere Experimente und Untersuchungen durchzuführen.

6 Schlussfolgerungen

In diesem abschließenden Kapitel der vorliegenden Arbeit erfolgen jetzt noch ein Fazit und ein Ausblick, um die Erkenntnisse der Arbeit noch einmal in zusammengefasster Form darstellen zu können. Beendet wird die Arbeit durch das Formulieren einer Kritischen Würdigung, in der der Verfasser der Arbeit noch einige seiner eigenen Gedanken zur Arbeit formuliert.

6.1 Fazit und Ausblick

Das im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit untersuchte Objekt der LoRa-Technologie stellt eine Funktechnologie dar, die vor allem für die Anwendung im Zuge des IoT entwickelt wurde. Die LoRa-Technologie eignet sich, wie im Rahmen der vorliegenden Arbeit anhand der sehr umfangreichen Literaturrecherche festgestellt werden konnte, sehr gut, wenn bei geringem Energieaufwand eine große und robuste Funkreichweite erreicht werden soll. Durch den sehr geringen Energieverbrauch sowie der laut der Untersuchung recht einfach aufgebauten Technologie stellt die LoRa-Technologie zudem eine sehr kostengünstige Möglichkeit dar, um Daten und Informationen über eine große Distanz übertragen zu können.

Die LoRa-Technologie kann zudem als eine gute Variante in Bezug auf eine eigenständige Punkt-zu-Punkt-Verbindung eingesetzt werden, wobei sich die Technologie nicht nur für den öffentlichen Sektor, sondern aufgrund der geringen Kosten und dem einfachen Aufbau auch für einen privaten Einsatz eignet. Aus diesem Grund kann laut der durchgeführten Untersuchung festgestellt werden, dass sich die LoRa-Technologie grundsätzlich für die unterschiedlichsten Betriebsarten eignet. Vor allem weil die LoRa-Technologie als sehr flexibel angesehen wird, was die Technologie auch sehr interessant für die unterschiedlichsten Anwendungen im Bereich des IoT macht.

Anhand der beiden durchgeführten Experimente konnte allerdings auch festgestellt werden, dass die LoRa-Technologie durchaus auch über Einschränkungen verfügt, die im Zuge eines Einsatzes der Technologie auf jeden Fall beachtet werden müssen. Die Experimente haben hierbei unter anderem aufgezeigt, dass ein Einsatz einer LoRa-Technologie dann durchaus problematisch sein kann, wenn der Sender nicht fix, sondern mobil angebracht ist und hierbei auch schnelle Richtungsänderungen macht. Hierbei nimmt die Übertragungsqualität wie die Experimente aufgezeigt haben entscheidend ab, sodass die Quote an erfolgreich angekommenen Nachrichten sehr stark nachlässt.

Daraus lässt sich schließen, dass sich die LoRa-Technologie eher für einfache Geräte eignet, wie z. B. Sensoren mit niedrigen Übertragungsraten. Komplexe Anwendungen sollten dann besser mit anderen Technologien realisiert werden. Jedoch darf hierbei nicht vergessen werden, dass ein Anwender für einen Einsatz der LoRa-Technologie sowohl beim Betrieb selbst als auch bei der Anschaffung der Komponenten geringe finanzielle Mittel aufwenden muss. Dies macht die LoRa-Technologie somit sehr umfangreich einsetzbar.

Literaturverzeichnis

- [1] ABICHT, Lothar ; SPÖTTL, Georg: *Qualifikationsentwicklungen durch das Internet der Dinge: Trends in Logistik, Industrie und Smart House*. Bd. 2. W. Bertelsmann Verlag, 2012
- [2] AHMAD, Ansa ; RAY, Biplob ; CHOWDHURY, Morshed: *Performance Evaluation of LoRaWAN for Mission-Critical IoT Networks*. S. 37–51, 10 2019. – ISBN 978-3-030-34352-1
- [3] ALSUBAEI, Faisal ; ABUHUSSEIN, Abdullah ; SHIVA, Sajjan: An overview of enabling technologies for the Internet of Things. In: *Internet of Things A to Z: Technologies and Applications* (2018), S. 79–111
- [4] ALVES, Mário: *QoS in Wireless Sensor/Actuator Networks and Systems*. S. 22–40, MDPI, 2018
- [5] ANDELFINGER, Volker P. ; HÄNISCH, Till: Grundlagen: Das Internet der Dinge. In: *Internet der Dinge*. Springer, 2015, S. 9–75
- [6] BAHASHWAN, Abdullah ; ANBAR, Mohammed ; ABDULLAH, Nibras ; HANSHI, Sabri M. ; AL-HADHRAMI, Tawfik: *Review on Common IoT Communication Technologies for Both Long-Range Network (LPWAN) and Short-Range Network*. S. 341–353, 10 2020. – ISBN 978-981-15-6047-7
- [7] BAUM, Gerhard: Innovationen als Basis der nächsten Industrierevolution. In: *Industrie 4.0*. Springer, 2013, S. 37–53
- [8] BECKER, Sebastian ; RIEMANN, Tim: LoRaWAN und Open Data öffnen den Unterricht für die Umwelt. In: *Mobil mit Informatik: 9. Münsteraner Workshop zur Schulinformatik* BoD–Books on Demand (Veranst.), 2020, S. 61–68
- [9] BEHRENDT, Siegfried: *Integriertes Roadmapping: Nachhaltigkeitsorientierung in Innovationsprozessen des Pervasive Computing*. Springer-Verlag, 2010

- [10] BORGMEIER, A. ; GROHMANN, A. ; GROSS, S.F.: *Smart Services und Internet der Dinge: Geschäftsmodelle, Umsetzung und Best Practices: Industrie 4.0, Internet of Things (IoT), Machine-to-Machine, Big Data, Augmented Reality Technologie*. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2017. – ISBN 9783446452701
- [11] BRACHT, Uwe ; GECKLER, Dieter ; WENZEL, Sigrid: *Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele*. Springer, 2011
- [12] BRINK, Gunnar ; CHAVES, Fernando: *Das Internet der Dinge und neue digitale Geschäftsmodelle in der Lebensmittelindustrie*. S. 485–504, 05 2021. – ISBN 978-3-658-31979-3
- [13] BRUHN, Manfred ; HADWICH, Karsten: Dienstleistungen 4.0–Erscheinungsformen, Transformationsprozesse und Managementimplikationen. In: *Dienstleistungen 4.0*. Springer, 2017, S. 1–39
- [14] CARLSSON, Anders ; KUZMINYKH, Ievgeniia ; FRANKSSON, Robin ; LILJEGREN, Alexander: Measuring a LoRa network: performance, possibilities and limitations. In: *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*. Springer, 2018, S. 116–128
- [15] CHAUDHARI, Bharat ; BORKAR, Suresh: Design considerations and network architectures for low-power wide-area networks. In: *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*. Elsevier, 2020, S. 15–35
- [16] CODING, ARM P. ; SMITH, Stephen: Raspberry Pi Assembly.
- [17] COURSEY, Cameron: *The Practitioner's Guide to Cellular IoT*. Artech House, 2020
- [18] DEVARE, Manoj: Low Power Communication Protocols for IoT-Enabled Applications. In: *Protocols and Applications for the Industrial Internet of Things*. IGI Global, 2018, S. 64–94
- [19] DOUCEK, Petr ; PAVLICEK, Antonin ; LUC, Ladislav: Internet of Things or Surveillance of Things? In: *International Conference on Research and Practical Issues of Enterprise Information Systems* Springer (Veranst.), 2017, S. 45–55
- [20] DRAGINO: *Dragino - Lora Shield*. 2021. – Abgerufen von: https://wiki.dragino.com/index.php?title=Lora_Shield; abgerufen am 19.12.2021.
- [21] ECKERT, Claudia: Cybersicherheit beyond 2020! In: *50 Jahre Universitätsinformatik in München*. Springer, 2017, S. 1–10

- [22] FITZEK, Frank H. ; SEELING, Patrick ; HÖSCHELE, Thomas ; JACOBFEUERBORN, Bruno: On the need of computing in future communication networks. In: *Computing in Communication Networks*. Elsevier, 2020, S. 3–45
- [23] FLEISCH, Elgar: RFID als erster Schritt der Integration von realer und virtueller Welt. In: *Umhegt oder abhängig?* Springer, 2006, S. 73–78
- [24] FLEISCH, Elgar ; CHRIST, Oliver ; DIERKES, Markus: Die betriebswirtschaftliche Vision des Internets der Dinge. In: *Das Internet der Dinge*. Springer, 2005, S. 3–37
- [25] FOST: *Gartner Magic Quadrant 2020 für Industrial IoT-Plattformen..* – Abgerufen von: <https://www.gartner.com/doc/reprints?id=1-24KDTTSL&ct=201109&st=sb>; abgerufen am 26.09.2021.
- [26] GIA, Tuan N. ; QUERALTA, Jorge P. ; WESTERLUND, Tomi: Exploiting LoRa, edge, and fog computing for traffic monitoring in smart cities. In: *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*. Elsevier, 2020, S. 347–371
- [27] GREIFFER, Sebastian: *Die Vier Säulen der Echtzeitdaten-basierten IIoT-Wartung*. 2020. – Abgerufen von: <https://www.industry-of-things.de/die-vier-saeulen-der-echtzeitdatenbasierten-iiot-wartung-a-932357>; abgerufen am 26.06.2021.
- [28] GÜNTNER, Ralf ; DOLLINGER, Daniela: *Hirn 1.0 trifft Technologie 4.0: Der Mensch und seine kreativen Potentiale im Fokus*. Springer-Verlag, 2019
- [29] HAZRA, Saptarshi ; VOIGT, Thiemo ; AHLGREN, Bengt ; LU, Chenguang ; CEDERHOLM, Daniel ; PATRA, Gyanesh: Multi-Radio Access Technology IoT Gateway. (2020)
- [30] HILDEBRAND, Knut: Master Data Life Cycle–Management der Materialstammdaten in SAP®. In: *Daten-und Informationsqualität*. Springer, 2018, S. 299–310
- [31] HSU, Che-Wei ; DAS, Kallol ; JORGUSESKI, Ljupco: Multi-RAT random access scheme utilising combined licensed and unlicensed spectrum for massive machine-type communications. In: *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)* IEEE (Veranst.), 2020, S. 1–7
- [32] HUENING, Felix: *Embedded Systems für IoT*. 01 2019. – ISBN 978-3-662-57900-8

- [33] HÜWE, Peter ; HÜWE, Stephan: *IoT at Home: Smart Gadgets mit Arduino, Raspberry Pi, ESP8266 und Calliope entwickeln. Behandelt auch openHAB, FHEM, Home Assistant und ioBroker.* 05 2019. – ISBN 978-3-446-45661-7
- [34] JAKOBY, W.: *Das Internet der Dinge als Basis der digitalen Automation: Beiträge zu den Bachelor- und Masterseminaren 2018 im Fachbereich Technik der Hochschule Trier.* Books on Demand, 2018. – ISBN 9783752886016
- [35] JASPERS, Erik ; HÄRTIG, Michael ; HOFMANN, Marco ; MAY, Michael ; TURIANSKYJ, Nino: *IoT im FM: Digitalisierung im Facility Management erfolgreich einsetzen.* S. 337–375, 09 2018. – ISBN 978-3-658-21356-5
- [36] JAYASHREE, LS ; SELVAKUMAR, G: *Getting Started with Enterprise Internet of Things: Design Approaches and Software Architecture Models.* Springer Nature, 2020
- [37] JUNG, Reinhard: *Architekturen zur Datenintegration: Gestaltungsempfehlungen auf der Basis fachkonzeptueller Anforderungen.* Springer-Verlag, 2006
- [38] KAERLEIN, Timo: Die Welt als interface. In: *Internet der Dinge.* transcript-Verlag, 2015, S. 137–160
- [39] KAUFMANN, Timothy: *Geschäftsmodelle in Industrie 4.0 und dem Internet der Dinge: der Weg vom Anspruch in die Wirklichkeit.* Springer-Verlag, 2015
- [40] KAUFMANN, Timothy ; SERVATIUS, Hans-Gerd: *Das Internet der Dinge und Künstliche Intelligenz als Game Changer: Wege zu einem Management 4.0 und einer digitalen Architektur.* Springer-Verlag, 2020
- [41] KOCHETKOVA, Irina ; VLASKINA, Anastasia ; BURTSEVA, Sofia ; SAVICH, Valeria ; HOSEK, Jiri: Analyzing the effectiveness of dynamic network slicing procedure in 5g network by queuing and simulation models. In: *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems.* Springer, 2020, S. 71–85
- [42] KONING, Robert: LoRaWAN als Treiber der digitalen Stadt. In: *Smart City–Made in Germany.* Springer, 2020, S. 659–669
- [43] KONING, Robert ; STRICKER, Timo ; SCHNEIDER, Peter: Was ist LoRa und LoRaWAN. In: *Smart City Solutions GmbH Karlsruhe (2017)*

- [44] KRETSCHMER, Irina: *Digitalisierung aller Lebensbereiche*. S. 7–9. In: *Digitalisierung als Chancengeber: Wie KI, 3D-Druck, Virtual Reality und Co. neue berufliche Perspektiven eröffnen.*, Wiesbaden: Springer Gabler, 10 2019. – ISBN 978-3-658-26892-3
- [45] KURBEL, Karl: *Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management in der Industrie: Von MRP bis Industrie 4.0*. 05 2016. – ISBN 9783110441697
- [46] LAVRIC, Alexandru ; PETRARIU, Adrian I. ; COCA, Eugen ; POPA, Valentin: LoRa Traffic Generator Based on Software Defined Radio Technology for LoRa Modulation Orthogonality Analysis: Empirical and Experimental Evaluation. In: *Sensors* 20 (2020), Nr. 15. – URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/15/4123>. – ISSN 1424-8220
- [47] LAVRIC, Alexandru ; POPA, Valentin: A LoRaWAN: Long range wide area networks study. In: *2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN)* IEEE (Veranst.), 2017, S. 417–420
- [48] LEA, Perry: *IoT and Edge Computing for Architects: Implementing edge and IoT systems from sensors to clouds with communication systems, analytics, and security*. Packt Publishing Ltd, 2020
- [49] LEMKE, Claudia ; BRENNER, Walter: *Einführung in die Wirtschaftsinformatik*. Springer, 2015
- [50] LEY, Wilfried ; WITTMANN, Klaus ; HALLMANN, Willi: *Handbuch der Raumfahrt-technik*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2019
- [51] LINNEMANN, Marcel ; SOMMER, Alexander ; LEUFKES, Ralf: *Einsatzpotentiale von LoRaWAN in der Energiewirtschaft: Praxisbuch zu Technik, Anwendung und regulatorischen Randbedingungen*. Springer-Verlag, 2019
- [52] MAHN, J.: Brief-Fernmelder: Briefkastensensor mit hoher Reichweite. In: *c't Projekte* (2019), 1, S. 90–93
- [53] MAHN, J.: IoT-Funk LoRaWAN: für kleine Datenmengen und hohe Reichweiten. In: *c't Projekte* (2019), 10, S. 86–89
- [54] MAPS google: *Google Maps*. 2021. – Abgerufen von: <https://www.google.de/maps/>; abgerufen am 05.07.2021.
- [55] MEIER, Andreas ; ZIMMERMANN, Hans-Dieter: Digitales Entwicklungsmodell smarter Städte. In: *Smart City*. Springer, 2016, S. 3–18

- [56] MUHANJI, Steffi O. ; FLINT, Alison E. ; FARID, Amro M.: *eIoT: The Development of the Energy Internet of Things in Energy Infrastructure*. Springer Nature, 2019
- [57] MÜLLER, Stefan: *Internet of Things (IoT): Ein Wegweiser durch das Internet der Dinge*. BoD–Books on Demand, 2016
- [58] NESTJS, Documentation: *Documentation NestJS - A progressive Node.js framework*. 2021. – Abgerufen von: <https://docs.nestjs.com/>; abgerufen am 29.06.2021.
- [59] NETWORK, The T.: *The Things Network: Spreading Factors*. 2021. – Abgerufen von: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/spreading-factors/>; abgerufen am 20.07.2021.
- [60] NIKODEM, Maciej ; NIKODEM, Jan ; KLEMPPOUS, Ryszard ; GAWŁOWSKI, Paweł ; BAWIEC, Marek: *Smart Sensors and Communication Technologies for Triage Procedures*. S. 305–312, 04 2020. – ISBN 978-3-030-45095-3
- [61] OJO, Mike O. ; ADAMI, Davide ; GIORDANO, Stefano: Experimental Evaluation of a LoRa Wildlife Monitoring Network in a Forest Vegetation Area. In: *Future Internet* 13 (2021), Nr. 5, S. 115
- [62] PAREDES-PARRA, José M. ; GARCÍA-SÁNCHEZ, Antonio J. ; MATEO-AROCA, Antonio ; MOLINA-GARCÍA, Ángel: An alternative internet-of-things solution based on LORa for PV power plants: Data monitoring and management. In: *Energies* 12 (2019), Nr. 5, S. 881
- [63] PAREDES PÁLIZ, Diego ; MAYA, Edgar ; NOGALES-ROMERO, José ; PADILLA-CALDERÓN, Cristian: *Low Power Wide Area Network: Technical Review for Wireless sensor Networks and Its Utilization in Smart Cities Deployment Through Internet of Things (IoT) System*. S. 113–126, 03 2020. – ISBN 978-3-030-42530-2
- [64] PARET, Dominique ; CRÉGO, P: Examples of Smart Apparel. In: *Wearables, Smart Textiles and Smart Apparel; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands* (2019)
- [65] PARET, Dominique ; HUON, Jean-Paul: *Secure connected objects*. John Wiley & Sons, 2017
- [66] PARK, Seung-Kyu ; HWANG, Kwang-il ; KIM, Hyo-Seong ; SHIM, Byoung: Challenges and Experiment with LoRaWAN., 05 2017, S. 269–276. – ISBN 978-981-10-5040-4
- [67] PENTTINEN, Jyrki T.: *5G explained: security and deployment of advanced mobile communications*. John Wiley & Sons, 2019

- [68] PETÄJÄJÄRVI, Juha ; MIKHAYLOV, Konstantin ; PETTISSALO, Marko ; JANHUNEN, Janne ; IINATTI, Jari: Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness, scalability, and coverage. In: *International Journal of Distributed Sensor Networks* 13 (2017), Nr. 3, S. 1550147717699412. – URL <https://doi.org/10.1177/1550147717699412>
- [69] PFLAUM, Alexander ; HUPP, Jürgen: Sensornetzwerke und Lokalisierungsverfahren als Schlüsseltechnologien für die intelligente logistische Umwelt von morgen. In: *Internet der Dinge*. Springer, 2007, S. 107–118
- [70] PHALTANKA, Amit ; AHSAN, Juned ; HARRISON, Michael ; NEDOV, Liviu: *MongoDB Fundamentals*. Packt Publishing Ltd., 2020
- [71] PHAM, Anh D.: Developing back-end of a web application with NestJS framework: Case: Integrify Oy’s student management system. (2020)
- [72] PHAM, Congduc ; BOUNCEUR, Ahcène ; CLAVIER, Laurent ; NOREEN, UMBER ; EHSAN, Muhammad: Radio channel access challenges in LoRa low-power wide-area networks. In: *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*. Elsevier, 2020, S. 65–102
- [73] PUTLAND, Paul: Connecting Devices: Access Networks. In: *The Internet of Things: From Data to Insight* (2020), S. 9–19
- [74] RAJ, Pethuru ; RAMAN, Anupama C.: *The Internet of Things: Enabling technologies, platforms, and use cases*. CRC Press, 2017
- [75] RAYES, Ammar ; SALAM, Samer: Internet of things (IoT) overview. In: *Internet of Things From Hype to Reality*. Springer, 2019
- [76] RIGGERT, Wolfgang ; LÜBBEN, Ralf: *Rechnernetze: Ein einführendes Lehrbuch*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2020
- [77] SALAZAR, Gonçalo ; FIGUEIREDO, Lino ; FERREIRA, Nuno: *Towards the Development of IoT Protocols*. S. 146–155, 09 2020. – ISBN 978-3-030-58355-2
- [78] SANCHEZ-IBORRA, Ramon ; BERNAL-ESCOBEDO, Luis ; SANTA, Jose: Machine learning-based radio access technology selection in the Internet of moving things. In: *China Communications* 18 (2021), Nr. 7, S. 13–24

- [79] SCHLOSSER, Sascha: *Das Internet der Dinge als Basis für Prozessoptimierung und neue Geschäftsmodelle im Markt der Energieversorgungsunternehmen*. S. 675–688, 01 2020. – ISBN 978-3-658-25588-6
- [80] SCHUMACHER, Bernhard ; SELCHERT, Martin: Smart Citizenship–Stadtwerke als Smart-City-Entwicklungsträger für, mit und in Städten. In: *Realisierung Utility 4.0 Band 2*. Springer, 2020, S. 641–658
- [81] SINSEL, Alexander: Smart Manufacturing. In: *Das Internet der Dinge in der Produktion*. Springer, 2020, S. 1–35
- [82] STOYNOV, Viktor ; POULKOV, Vladimir ; VALKOVA-JARVIS, Zlatka: Low power wide area networks operating in the ism band-overview and unresolved challenges. In: *International Conference on Future Access Enablers of Ubiquitous and Intelligent Infrastructures* Springer (Veranst.), 2019, S. 96–109
- [83] UCKELMANN, Dieter ; HARRISON, Mark ; MICHAELLES, Florian: An architectural approach towards the future internet of things. In: *Architecting the internet of things*. Springer, 2011, S. 1–24
- [84] UWE, Schulze: Low Power Wide Area Networks für IIoT: Geregelter Durchlauf. In: *iX Special 2018 - Industrial Internet of Things* 15 (2018), S. 96–101
- [85] WEISSENBACH, Kurt ; SCHILLINGER, Wolfgang ; WEIDEMANN, Rainer: *Umweltinformationssystem Baden-Wuerttemberg, F+ E-Vorhaben INOVUM, Innovative Umweltinformationssysteme. Phase I 2014/16*. Bd. 7715. KIT Scientific Publishing, 2016
- [86] WERNER, Hartmut: *Supply chain management*. Springer, 2013
- [87] WISER, Mark: The computer for the 21st century. In: *Scientific american* 265 (1991), Nr. 3, S. 94–104
- [88] WITTPAHL, Volker: *iit-Themenband DIGITALISIERUNG Bildung | Technik | Innovation*. 06 2016. – 141–150 S. – ISBN 978-3-662-52853-2
- [89] WOLF, Felix: *IoT-Sicherheit durch weniger Leistung*. 2018. – Abgerufen von: <https://www.i40-magazin.de/fachartikel/lorawan-in-der-praxis/>; abgerufen am 25.06.2021.

- [90] YADAV, Manish ; SINGHAL, Pramod K.: Interleaver Assignment Solution for Multi Radio Access Technology Supported 5G Networks. In: *Radioelectronics and Communications Systems* 64 (2021), Nr. 2, S. 99–105
- [91] YANG, Yang ; LUO, Xiliang ; CHU, Xiaoli ; ZHOU, Ming-Tuo: *Fog-enabled intelligent IoT systems*. Springer, 2020

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: _____

Vorname: _____

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit – bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Evaluation einer Ende-zu-Ende-Kommunikation über LoRa im IoT Umfeld

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

_____ 

Ort

Datum

Unterschrift im Original