



Hochschule für angewandte Wissenschaften München  
Fakultät für Informatik und Mathematik

**Masterarbeit zum Thema:**

**Entwicklung und Analyse eines LoRaWAN-basierten  
Tracking-Systems zur globalen Überwachung von Transportgütern**

English Title

**Vorgelegt von:** Christoph Schwarz  
**Matrikelnummer:** 32004720  
**Studiengang:** Informatik (Master Embedded Computing)  
**Betreuer:** Prof. Dr. Lars Wischhof  
**Firma:** MicroDoc GmbH  
**Firma Betreuer:** Regine Rudeck  
**Abgabedatum:** ...

**1. Abstract**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Abstract</b>	<b>II</b>
<b>2. Einleitung</b>	<b>1</b>
2.1. Motivation und Problemstellung . . . . .	1
2.2. Zielsetzung der Arbeit . . . . .	1
2.3. Methodisches Vorgehen . . . . .	1
<b>3. Grundlagen</b>	<b>2</b>
3.1. Drahtlose Datenübertragung . . . . .	2
3.2. LoRa und LoraWAN . . . . .	4
3.3. Öffentliche LoraWAN Netzwerke . . . . .	8
3.4. LoraWAN Industrielle Anwendungsbereiche . . . . .	10
3.5. Verwandte Arbeiten . . . . .	10
<b>4. Konzeptionierung und Entwicklung des Tracking-Systems</b>	<b>12</b>
4.1. Systemanforderungen . . . . .	12
4.2. Hardware-Design . . . . .	12
4.3. Tooling Auswahl und Software Design . . . . .	12
4.4. Energiemanagement und Batterielaufzeit . . . . .	12
<b>5. Implementierung des Analysewerkzeuges</b>	<b>12</b>
5.1. TTN Mapper . . . . .	12
5.2. Einflussfaktoren auf die Signalausbreitung (Umwelt, Gebäude, menschliche Aktivität) . . . . .	12
5.3. Implementierung des Analysewerkzeuges . . . . .	12
5.4. Modelle zur Schätzung der Verbindungsqualität . . . . .	12
<b>6. Untersuchung und Auswertung</b>	<b>12</b>
6.1. Überblick und Versuchsaufbau . . . . .	12
6.2. LoraWAN Tracking-System . . . . .	12
6.3. Analysewerkzeuge mit Signalausbreitungs-Modellen . . . . .	12
<b>7. Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>12</b>
7.1. Netzwerkabdeckung und Verbindungsqualität . . . . .	12
7.2. Grenzen und Herausforderungen . . . . .	12
7.3. Verbesserungspotentiale der Implementierungen . . . . .	12
7.4. Bewertung der Systemleistung . . . . .	12
7.5. Einordnung zu bestehenden Arbeiten . . . . .	12
<b>8. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>12</b>
8.1. Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	12
8.2. Ausblick auf zukünftige Entwicklungen . . . . .	12

<b>A. Appendix</b>	<b>13</b>
<b>Literatur</b>	<b>14</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>16</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>17</b>
<b>Quellcodeverzeichnis</b>	<b>18</b>

## 2. Einleitung

<Einleitung>

### 2.1. Motivation und Problemstellung

Durch die immer größer werdende Globalisierung werden immer mehr Güter verschickt. Zudem steigt ebenso die Nachfrage an transparenten und nachverfolgbaren Transportwegen um die Qualität und Sicherheit der Ware zu gewährleisten. Dies stellt Transportunternehmen vor eine große Herausforderung da die Überwachung zum einen oft über eine sehr große Strecke sowie über Ländergrenzen bewerkstelligt werden muss, zum anderen gibt es eine Vielzahl an zu überwachenden Sendungen und damit an benötigten Trackern.

Traditionelle Tracking-Systeme, die auf Mobilfunktechnologien oder Satellitenkommunikation basieren, sind oft mit hohen Betriebskosten, einem hohen Energieverbrauch oder einer eingeschränkten Reichweite konfrontiert. Dies führt zu Sichtbarkeitslücken in der Lieferkette, was wiederum Risiken wie Diebstahl, Verlust oder Beschädigung von Gütern erhöht.

Vor diesem Hintergrund bietet die Low-Power Wide-Area Network (LPWAN)-Technologie, insbesondere Long-Range Wide-Area-Network (LoRaWAN), vielversprechende Ansätze. LoRaWAN zeichnet sich durch seine Fähigkeit aus, Daten über große Distanzen bei geringem Energieverbrauch zu übertragen. Das macht diese Technologie ideal für Anwendungen im Bereich des Internet of Things (IoT) und der Logistik. Trotz des Potenzials von LoRaWAN für Tracking-Anwendungen, gibt es noch Forschungsbedarf hinsichtlich der praktischen Implementierung und der Analyse der Verbindungsqualität unter realen Bedingungen.

### 2.2. Zielsetzung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines modularen Tracking-Geräts, das die in Abschnitt 2.1 beschriebenen Herausforderungen adressiert. Das Gerät soll flexibel an unterschiedliche Anforderungen der Transportlogistik angepasst werden können, um in einer Vielzahl von Einsatzszenarien abzudecken. Des Weiteren soll ein Analysetool entwickelt werden, das mithilfe verschiedener Methoden zur Vorhersage der Verbindungsqualität und der damit verbundenen Netzwerkabdeckung den Transportweg möglichst transparent abbildet. Ziel ist es, potenzielle Signalverluste und Sendeverzögerungen frühzeitig vorherzusagen, um die Zuverlässigkeit der Datenübertragung entlang der Route besser bewerten zu können.

### 2.3. Methodisches Vorgehen

Das Vorgehen dieser Arbeit gliedert sich in drei Phasen:

Als erstes soll mit der Entwicklung des LoRaWAN Tracking-Gerät begonnen werden. Basierend auf den definierten Anforderungen an Reichweite, Energieverbrauch und Modularität wurde ein prototypisches Tracking-Gerät entwickelt. Dies umfasste die Auswahl geeigneter Hardware-Komponenten, die Entwicklung der Firmware sowie die Integration in öffentliche LoRaWAN-Netzwerke wie The Things Network (TTN) und Helium.

Zum zweiten soll ein Analyse-Werkzeug entwickelt werden das bei der Bewertung der Verbindungsqualität über eine vorgegebene Strecke hilft. Hierzu soll das Werkzeug die RSSI mithilfe von diversen Modellen vorhersagen. Diese Analyse soll dann aufschluss über die Erreichbarkeit des jeweiligen Trackers und mögliche Abdeckungsfreie bereiche geben, die dann für die Planung der jeweiligen Transportroute genutzt werden können.

Als letztes sollen die beiden Komponenten in realen Testszenarien validiert werden. Dazu werden beide Systeme in unterschiedlichen Szenarien getestet, um reale Umgebungsbedingungen und deren Einfluss zu untersuchen. Dabei wurden verschiedene Einflussfaktoren wie Bebauung, Umwelt und Bewegung berücksichtigt. Die gesammelten Daten dienen sowohl der Evaluierung der Systemleistung als auch der Validierung der im Analysewerkzeug implementierten Modelle.

### **Definition Metriken**

Zur Bewertung der Qualität drahtloser Verbindungen werden verschiedene Metriken verwendet, die jeweils unterschiedliche Aspekte der Signalübertragung abbilden. Diese Metriken ermöglichen es, die Qualität eines Datenpfades zu quantifizieren und kritische Schwellenwerte zu definieren, ab denen beispielsweise eine Datenübertragung als instabil oder unzuverlässig gilt.

Im Rahmen dieser Arbeit dienen solche Metriken als Grundlage für die Analyse und Vorhersage der Verbindungsqualität. Dabei wird unter anderem betrachtet, wie stark ein Signal ist, wie hoch der Anteil fehlerfreier Übertragungen ist und welche Umgebungsbedingungen die Werte beeinflussen können.

Konkrete Schwellenwerte, ab denen eine Verbindung als „gut“ oder „kritisch“ eingestuft wird, hängt immer von der eingesetzten Technologie sowie der spezifischen Hardware ab. Die genaue Definition und Anwendung dieser Metriken erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln.

## **3. Grundlagen**

Im nachfolgenden Teil sollen die theoretische Grundlagen erläutert werden die für das Verständnis der nachfolgenden Arbeit wichtig sind. Dabei bilden die Prinzipien der drahtlosen Datenübertragung das Fundament, auf dem alle weiteren technischen Konzepte aufbauen.

### **3.1. Drahtlose Datenübertragung**

Drahtlose Datenübertragungsverfahren ermöglichen die Übertragung von Informationen ohne elektrische Leiter. Sie nutzen elektromagnetische Wellen (Radiowellen), Magnetfelder und elektrische Felder als Übertragungsmedium und können somit eine Kommunikation über Entfernungen von mehreren Kilometern oder mehr ermöglichen.

Dieses Grundlegende Prinzip ermöglicht Anwendungen die deutlich portabler und flexibler sind als kabelgebunden Verbindungen. Der Kernmechanismus besteht darin die am Sender als elektrisches Signal Vorliegenden Daten in elektromagnetische Wellen umzuwandeln die sich

dann durch die Umgebung ausbreiten können. Diese Signale können dann beim Empfänger wiederum in elektrische Signale umgewandelt und somit interpretiert werden.

Für die drahtlose Telekommunikation werden überwiegend elektromagnetische Wellen, insbesondere Funkwellen, eingesetzt. Drahtlose Kommunikationssysteme arbeiten in verschiedenen Frequenzbändern, die streng reguliert sind, um mögliche Interferenzen zu vermeiden. [12]

Bekannte Modulationsverfahren lassen sich in Analoge und Digitale Verfahren aufteilen. Bei der analogen Modulation werden die Parameter des Trägersignals (Amplitude oder Phase) kontinuierlich entsprechend dem analogen Eingangssignal verändert. Bei der digitalen Modulation hingegen wird zwischen diskreten, fest definierten Zuständen umgeschaltet, um digitale Daten zu übertragen. [29, S. 112 ff. und S. 156 ff.]

Ein einfaches Digitales Übertragungsprotokoll ist hier bei das Frequency Shift Keying (FSK), dabei werden digitale Informationen durch die Variation der Frequenzen eines Trägers kodiert. Im Wesentlichen wird die Trägerfrequenz periodisch zwischen mehreren Frequenzen verschoben, wobei jede Frequenz ein bestimmtes digitales Symbol darstellt.

Das einfachste FSK-Verfahren ist die binäre FSK (Binary FSK, BFSK oder 2-FSK), bei der zwei unterschiedliche Frequenzen verwendet werden, um die Binärziffern '0' und '1' zu repräsentieren. Wie in Beispielsweise Abbildung 1 kann eine höhere Frequenz eine binäre '1' darstellen, während eine niedrigere Frequenz eine binäre '0' repräsentiert. Wenn die zu übertragenden Daten eine '0' enthalten, wird die Trägerfrequenz  $f_1$  verwendet um dieses Bit zu übertragen, wenn die Daten eine '1' sind, wird die Trägerfrequenz  $f_2$  verwendet.[11]

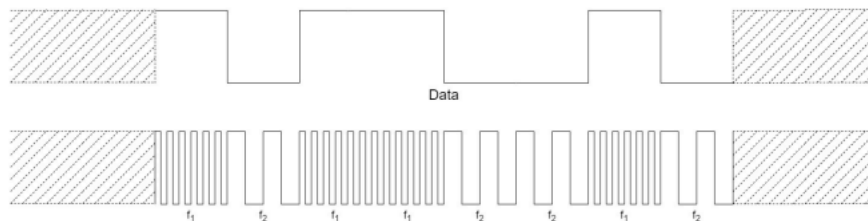


Abbildung 1: Frequency Shift Keying | Quelle: [11]

## Frequenz und Bandbreite

Die **Frequenz** beschreibt, wie oft sich ein periodisches Signal pro Sekunde wiederholt. Sie wird in Hertz (Hz) angegeben und ist eng mit der Wellenlänge  $\lambda$  verknüpft. Diese lässt sich aus der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  des Signals und der Frequenz  $f$  über  $\lambda = c/f$  berechnen. Höhere Frequenzen entsprechen kürzeren Wellenlängen und erfordern in der Regel kleinere Antennenabmessungen.

Die **Bandbreite** eines Kommunikationskanals bezeichnet den Frequenzbereich, innerhalb dessen ein Signal mit akzeptabler Qualität übertragen werden kann. Sie wird in Hertz angegeben und ist sowohl durch physikalische Eigenschaften des Übertragungsmediums als auch durch elektronische Komponenten begrenzt. Die Bandbreite bestimmt zusammen mit der Signalqualität die maximal mögliche Datenrate. In vielen Kanälen beträgt sie nur einen

Bruchteil der Mittenfrequenz, typischerweise zwischen 1% und 10% des Trägerfrequenzbereichs. [20, S. 4]

### Schlüsselmetriken der Verbindungsqualität: RSSI, SNR und PDR

Zur Bewertung der Verbindungsqualität werden primär drei Schlüsselmetriken herangezogen: der Received Signal Strength Indicator (RSSI), das Signal-to-Noise Ratio (SNR) und die Packet Delivery Rate (PDR).

Der **RSSI** ist wie im Namen schon enthalten ein Indikator für das empfangene Signal. Er dient als relatives Maß und gibt die Stärke des Funksignals an. Er wird typischerweise in dBm ausgedrückt, wobei Werte näher an Null ein stärkeres empfangenes Signal bedeuten. Faktoren, die den RSSI hauptsächlich beeinflussen, sind der Pfadverlust oder der Antennengewinn. Zudem kommen auch noch weitere Verluste durch Kabel und Steckverbinder, für die Antenne, an Sender und Empfänger hinzu. Darüber hinaus kann der RSSI aufgrund von Signalkollisionen, externen Interferenzen und dem Nah-Fern-Effekt abnehmen. Als direktes Maß für die empfangene Leistung ist der RSSI eine entscheidende Eingangsgröße für viele Ausbreitungsmodelle.

Oft als S/N bezeichnet, stellt das **SNR** das Verhältnis der empfangenen Signalleistung zum Umgebungsrauschpegel dar, üblicherweise in Dezibel (dB) ausgedrückt. Es ist eine kritische Metrik zur Bestimmung der Gesamtqualität des empfangenen Signals. [24] Das SNR wird mit der Formel 1 berechnet.

$$SNR(dB) = P_{receivedSignal}(dBm) - P_{noise}(dBm) \quad (1)$$

Auch als Packet Reception Rate (PRR) bezeichnet, quantifiziert die **PDR** den Prozentsatz der Datenpakete, die erfolgreich über eine Kommunikationsverbindung gesendet und empfangen werden. Sie dient als Maß für die Netzwerkkonsistenz und -leistung. Die PDR wird durch eine Kombination von Faktoren beeinflusst, darunter die Bandbreite, die Übertragungsdistanz und die zugrunde liegende Signalqualität (RSSI, SNR). Insbesondere niedrige RSSI-Werte, insbesondere unter einem bestimmten Schwellenwert (z. B. -120 dBm), können zu Paketkorruption oder vollständigem Verlust führen.

Während der RSSI eine Angabe der Rohsignalstärke liefert, bietet das SNR ein nuancierteres Maß für die Signalqualität relativ zum Rauschen. Letztendlich stellt die PDR die Ergebnisgröße dar, die die kombinierten Effekte von Signalstärke, Signalqualität und vorherrschenden Netzwerkbedingungen zusammenfasst. [21]

## 3.2. LoRa und LoraWAN

Im Nachfolgenden soll die Funktechnologie auf der diese Arbeit aufbaut beschrieben werden.

### LoRa

LoRa (Long Range) ist ein proprietäres und patentiertes drahtloses Übertragungsverfahren, das von der Semtech Corporation entwickelt wurde. Die Technologie arbeitet auf



der physikalischen Schicht (Bitübertragungsschicht) und verwendet die Spread-Spectrum-Modulationstechnik *Chirp Spread Spectrum* (CSS). CSS beinhaltet die Frequenzvariation eines Signals über die Zeit (Chirping). Ein „Upchirp“ ist eine Erhöhung der Frequenz von niedrig nach hoch, während ein „Downchirp“ eine Absenkung der Frequenz von hoch nach niedrig darstellt (siehe Abbildung 2). Diese Methode verteilt das Datensignal über ein breiteres Frequenzband, wodurch es robust gegenüber Rauschen und Interferenzen wird.

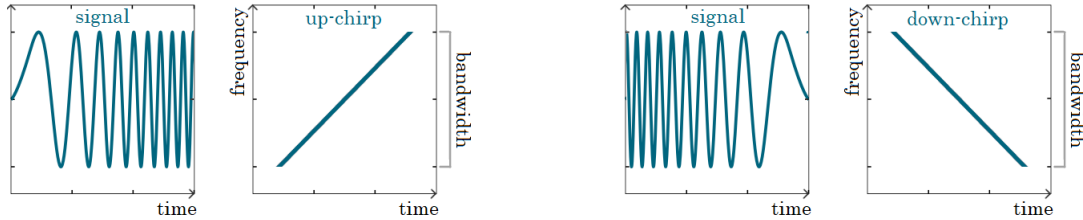


Abbildung 2: LoRa Chirps | Quelle: [27]

Ein wesentlicher Vorteil von CSS gegenüber anderen Modulationstechniken, wie z. B. der in Abschnitt 3.1 genannten FSK, ist die Fähigkeit, Signale selbst dann zu dekodieren, wenn sie unterhalb des Rauschpegels liegen. Dies wird durch die große Zeit-Bandbreite und die orthogonale Struktur der Chirp-Symbole ermöglicht.

**Spreading Factor** Der Spreading Factor (SF) beschreibt das Verhältnis zwischen der Chiprate und der Symbolrate. Wie aus Gleichung 2 ersichtlich,

$$R_b = \frac{SF \cdot B}{2^{SF}}, \quad (2)$$

führt eine Erhöhung des SF zu einer größeren Reichweite, da das Signal robuster gegenüber Rauschen und Störungen wird. Gleichzeitig verringert sich jedoch die erzielbare Datenrate.

**Symbolstruktur und Datenübertragung** Die Datenübertragung in LoRa erfolgt in Symbolen, die durch eine Folge von Chirps realisiert werden. Ein Symbolindex  $s(nT_s)$  wird aus SF (Spreading Factor) Bits gebildet (siehe Formel 3).

$$s(nT_s) = \sum_{h=0}^{SF-1} w_h(nT_s) \cdot 2^h, \quad s \in \{0, 1, \dots, 2^{SF} - 1\} \quad (3)$$

Jedes Symbol hat eine Dauer  $T_s = 2^{SF} \cdot T$ , wobei  $T = \frac{1}{B}$  die Abtastperiode ist und  $B$  die genutzte Bandbreite.

Das modulierte Signal für ein Symbol  $s(nT_s)$  ist in Formel 4 zu sehen.

$$c(nT_s + kT) = \frac{1}{\sqrt{2^{SF}}} e^{j2\pi \frac{[(s(nT_s) + k) \bmod 2^{SF}] \cdot k}{2^{SF}}}, \quad k = 0, \dots, 2^{SF} - 1 \quad (4)$$

Dieses Signal stellt einen linearen Frequenzanstieg (Upchirp) dar, der um eine frequenzabhängige Startposition (abhängig vom Symbolwert  $s$ ) verschoben ist. Ein Beispiel für diese Symbole kann Abbildung 3 entnommen werden.

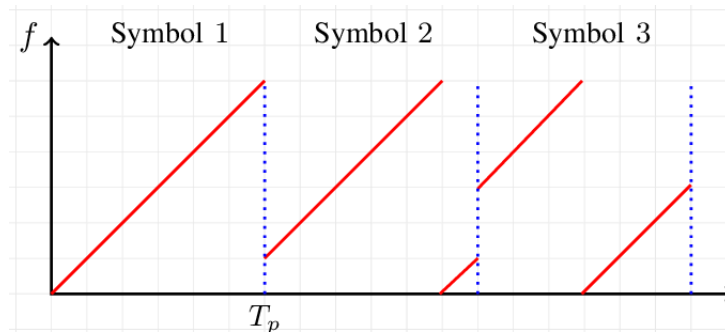


Abbildung 3: LoRa Symbole | Quelle: [16]

**Erkennung unterhalb des Rauschpegels** Die Fähigkeit, Signale unterhalb des Rauschpegels zu detektieren, basiert auf der *Korrelation* zwischen empfangenem Signal und den orthogonalen Referenz-Chirps. Da LoRa-Symbole die gesamte Bandbreite  $B$  abtasten, erfolgt eine Art *Spektralspreizung*, die eine Energieintegration über die gesamte Symbolzeit ermöglicht. Der optimale Empfänger multipliziert das Empfangssignal mit einem Downchirp und führt anschließend eine diskrete Fourier-Transformation (DFT) durch. Das Maximum im Frequenzspektrum gibt den übertragenen Symbolindex an (siehe Formel 5).

$$\hat{s}(nT_s) = \arg \max_p \left| \sum_{k=0}^{2^{SF}-1} r(nT_s + kT) \cdot e^{-j2\pi \frac{k^2}{2^{SF}}} \cdot e^{-j2\pi \frac{pk}{2^{SF}}} \right| \quad (5)$$

Durch die Integration über  $T_s$  kann das Signal-Rausch-Verhältnis effektiv erhöht werden, wodurch eine Dekodierung auch unterhalb des thermischen Rauschpegels möglich ist. [28] [27]

## LoraWAN

LPWANs ermöglichen energieeffiziente Kommunikation über große Distanzen und gelten daher als eine Schlüsseltechnologie für das Internet der Dinge (IoT). LoRaWAN ist eine der vielversprechendsten LPWAN-Technologien und zeichnet sich durch geringe Leistungsaufnahme, niedrige Kosten, große Reichweite sowie eine geringe Datenrate aus.

Das LoRaWAN-Kommunikationssystem besteht aus Endgeräten, Gateways, einem Netzwerkservers und den jeweiligen Anwendungen. Die Endgeräte kommunizieren über Funk mit den Gateways, welche die Daten an den Netzwerkservers weiterleiten. Technisch betrachtet ist LoRa die physikalische Schicht (PHY) des Systems, während LoRaWAN das MAC-Protokoll (Medium Access Control) darstellt.

**LoRaWAN-Geräteklassen** Die LoRaWAN-Spezifikation definiert drei Endgeräteklassen [17]:

- **Class A:** Für batteriebetriebene Geräte optimiert. Unterstützt bidirektionale Kommunikation mit einem Uplink-Fenster, gefolgt von zwei Downlink-Empfangsfenstern (RX1, RX2). Diese Funktionalität muss auf allen LoRaWAN-Geräten implementiert werden.

- **Class B:** Bietet zusätzlich geplante Empfangsfenster für vorhersagbare Downlinks. Geräte beginnen als Class A und können vom Server in Class B versetzt werden.
- **Class C:** Für netzbetriebene Geräte mit kontinuierlich offenem Empfangsfenster (RX2), was geringe Latenz ermöglicht. Diese Geräte verbrauchen mehr Energie im Vergleich zu anderen Geräteklassen.

**Leistungsmerkmale und Herausforderungen** LoRaWAN kann durch Parameteroptimierung an unterschiedliche Anwendungen angepasst werden. Wichtige Designaspekte sind Skalierbarkeit, Durchsatz, Abdeckung, Energieeffizienz und geringe Kosten [6]. Herausforderungen bestehen insbesondere in:

- **Skalierbarkeit:** Beeinflusst durch Faktoren wie verfügbare Kanäle, Spreizfaktor, Bandbreite und regulatorische Einschränkungen. In Europa steht für LoRa das Band von 863 MHz bis 870 MHz zur Verfügung, in Amerika von 902 MHz bis 928 MHz [10].
- **Energieeinsparung:** Durch die Adaptive Data Rate (ADR) oder eine optimierte Parameterwahl kann durch LoRaWAN nochmals zusätzlich zu der ohnehin schon EStromsparenden Lora-Technologie Energie eingespart werden [14].
- **Sicherheit:** Bei LoRaWAN spielt Sicherheit eine sehr wichtige Rolle, da Daten über Funk übertragen werden und damit leicht abgefangen werden könnten. Um das zu verhindern, werden Ende-zu-Ende-Schlüssel verwendet. Das bedeutet, dass Nachrichten bereits beim Gerät verschlüsselt werden und nur die dafür vorgesehenen Server diese wieder entschlüsseln können. In der Praxis wird meist das Verfahren *OTAA* (Over-The-Air Activation) eingesetzt. Dabei meldet sich das Gerät zunächst mit einem sogenannten Join-Vorgang am Netzwerk an. Hierfür gibt es einen eigenen *Join Server*, der für die Schlüsselverwaltung zuständig ist. Nach erfolgreichem Join erhält das Gerät individuelle Sitzungsschlüssel, die für die eigentliche Kommunikation genutzt werden. In öffentlichen Netzen ist es besonders wichtig, dass die verschiedenen Aufgaben klar voneinander getrennt sind. Der *Join Server* übernimmt die Schlüsselverwaltung und den Beitritt, der *Network Server* kümmert sich um die Organisation und Sicherheit des Funknetzes, und der *Application Server* verarbeitet am Ende die entschlüsselten Anwendungsdaten. Diese Aufgabentrennung verhindert, dass Betreiber oder andere Parteien mehr Informationen einsehen können, als für sie notwendig ist. Außerdem wird dadurch eine sichere Verwaltung von Schlüsseln in Lieferketten und bei mehreren Nutzern (Multi-Tenant) ermöglicht, ohne dass ein Verlust der Schlüssel (*Key Custody*) droht. Damit die verschiedenen Server reibungslos zusammenarbeiten, wurden standardisierte Schnittstellen (Backend-Interfaces) entwickelt, die genau festlegen, wie die Kommunikation zwischen den Komponenten erfolgen soll. Untersuchungen zeigen zudem, dass die neuere Version *LoRaWAN 1.1* deutliche Sicherheitsverbesserungen im Vergleich zur älteren Version 1.0 bietet. [7, 2]

**Anwendungsgebiete** LoRaWAN eignet sich für zahlreiche IoT-Szenarien, darunter smarte digitale Städte, smarte Messungen für zum Beispiel Pflanzen, smarter Parkverkehr indem Autofahrern und Autofahrerinnen der weg zu einem freien Parkplatzt gezeigt wird oder intelligente Straßenbeleuchtung [5]. Aufgrund der niedrigen Bitrate ist der Einsatz jedoch auf Anwendungen mit geringer Datenübertragungsrate beschränkt.

### Roaming, Peering und Interoperabilität

**Roaming, Peering und Interoperabilität** LoRaWAN-Roaming erlaubt es, dass Endgeräte auch außerhalb des eigenen Netzwerks funktionieren können. Es gibt zwei Arten von Roaming:

- **Passives Roaming:** Das Endgerät bleibt unter der Kontrolle seines Heimat-Netzservers (Serving NS), die Funkverbindung läuft aber über fremde Gateways und Netzserver (Forwarding NS). Diese leiten die Daten nur weiter, ohne die eigentliche Gerätesteuerung zu übernehmen.
- **Handover Roaming:** Hier übergibt der Heimat-Netzserver die Kontrolle an einen besuchten Netzserver (Serving NS). Dieser steuert dann das Endgerät aktiv, während der Heimat-NS im Hintergrund für die Schlüsselaushandlung und Verwaltung eingebunden bleibt.

Damit Roaming überhaupt funktioniert, müssen Netzbetreiber Peering- oder Roaming-Abkommen schließen. *Packet Broker* bietet dazu ein globales Vermittlungsnetz, das den Austausch von Paketen zwischen verschiedenen Betreibern erleichtert. Ein Beispiel ist das offene Netz The Things Network (TTN) mit der NetID 000013.

Kommerzielle Anbieter wie Senet setzen zusätzlich auf bilaterale Roaming-Vereinbarungen mit Partnernetzen, um ihre Abdeckung zu erweitern. [2, 19, 18, 23]

**Regulatorische Rahmenbedingungen (EU)** In Europa unterliegt LoRaWAN dem EU863–870-Band mit *Duty-Cycle*-Grenzen je Subband (typisch 0,1–1 % / 10 % im 869,4–869,65 MHz-Subband) und Sendeleistungsgrenzen. Gerätekonfiguration und Kanalpläne folgen den *LoRa Alliance Regional Parameters* (RP002), während die verbindlichen Funkparameter in *ETSI EN 300 220* festgelegt sind. [1, 3]

### 3.3. Öffentliche LoraWAN Netzwerke

Öffentliche LoRaWAN-Netze stellen Konnektivität als gemeinschaftliche oder kommerzielle Infrastruktur bereit. Im Gegensatz zu privaten Netzen (unter eigener Kontrolle) unterscheiden sie sich durch *Zugang* (offen vs. vertraglich), *Kostenmodell* (kostenfrei/Fair-Use vs. verbrauchs- oder Service-Level-Agreement (SLA)-basiert <sup>1</sup>), *Peering/Roaming* sowie *Betriebs- und Sicherheitsprozesse*. [2, 1, 3]

<sup>1</sup>Ein SLA ist eine vertraglich festgelegte Leistungszusage zwischen Anbieter und Nutzer eines Dienstes (z. B. garantierte Verfügbarkeit, Reaktionszeit oder Durchsatz). *SLA-basiert* bedeutet, dass das Netzwerk diese zugesicherten Leistungsmerkmale vertraglich garantiert.

## Abgrenzung und Kategorien

In der Praxis zeigen sich drei Netzwerktypen:

1. **Community-Netze** (z. B. The Things Network, TTN): offen, best-effort, Fair-Use, Enterprise-Plan.
2. **Dezentrale Crowd-Netze** (z. B. Helium IoT): von vielen Hotspot-Betreibern getragen, nutzungsbasierte Abrechnung.
3. **Carrier/Neutral-Host** (z. B. Senet, Everynet): vertraglich, SLA/Peering, nur nationale Abdeckung.

### The Things Network (TTN)

TTN ist ein globales Community-Netz auf Basis von *The Things Stack*. Es bietet einen kostenfreien Zugang unter einer Fair-Use-Policy. Die Fair-Use-Policy limitiert in der Kostenfreien Version u. a. die Uplink-Airtime pro Gerät und Tag. SLAs bestehen im Community-Netz nicht jedoch bietet die Enterprise-Varianten kommerzielle Zusagen. Das Netzwerk nutzt *Packet Broker* als globales Rückrad zur sicheren Weiterleitung von Verkehr zwischen Netzen. Das TTN ist über die Community Projekte TTN Mapper & Packet-Broker-Mapper kartiert. [9, 19, 26]

### Helium IoT

Helium IoT ist ein globales LoRaWAN-Netzwerk, das von vielen unabhängigen Teilnehmern betrieben wird. Im Unterschied zu TTN ist die Nutzung nicht kostenlos, sondern erfolgt über sogenannte *Data Credits (DC)*. Diese sind an den US-Dollar gebunden (fester Wert: 1 DC = 0,00001 USD) und können nur durch das *Burning* von HNT-Token erzeugt werden. Dadurch wird ein direkter ökonomischer Anreiz geschaffen, der die Nachfrage nach Netzwerkressourcen mit dem Helium-Krypto-Token verbindet [8].

Die Abrechnung erfolgt blockweise: Ein Uplink von 24 Byte entspricht einem Abrechnungsblock. Downlinks sind in der Regel kostenfrei, können jedoch durch zusätzliche Konfiguration zuverlässiger gestaltet werden. Dafür können Betreiber von LoRaWAN-Network-Servern (LNS) mehrere Gateway-Duplikate pro Uplink „einkaufen“ (*multibuy*), um die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Zustellung zu erhöhen [4].

Die Netzabdeckung wird u. a. durch *CoverageMap.net* vermessen, ein Service, der ursprünglich aus dem TTN Mapper-Projekt hervorgegangen ist [26].

### Carrier-/Neutral-Host-Netze (Beispiele: Senet, Everynet, Actility/ThingPark)

Carrier/Neutral-Host-Netze stellen *SLA-gestützte* Konnektivität bereit und nutzen teils überregionale Roaming-Abkommen. Beispiele: *Senet* (USA) mit *Extended Coverage* via Roaming (u. a. Integration mit Helium) [23]; *Everynet* als Neutral-Host in mehreren Ländern und Integrationen mit *AWS IoT Core for LoRaWAN* [13]. *Actility/ThingPark* als verbreitete Betreiber-/Plattform-Basis inkl. Roaming-Funktionalitäten und Hybrid-Szenarien [3].

### Praktische Einordnung für diese Arbeit

Für prototypische *Tracking*-Workloads sind TTN (kostenfrei, Fair-Use) und Helium (breite Crowd-Abdeckung, DC-basiert) aufgrund ihrer großen Abdeckung und einfachen Anwendung naheliegend.

### 3.4. LoraWAN Industrielle Anwendungsbereiche

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) bietet durch seine Charakteristiken die in Abschnitt 3.2 beschrieben viele Vorteile für industrielle Anwendungen.

**Vorausschauende Instandhaltung** LoRaWAN ermöglicht zuverlässige, energiearme Übertragung von Zustandsdaten (z. B. Vibration, Temperatur) für frühzeitige Wartungserkennung. Besonders im Industrie-4.0-Umfeld lassen sich Sensoren schnell installieren, mit Legacy-Geräten koppeln und in Cloud-basierte Analyseplattformen integrieren, um Effizienz, Sicherheit und Zuverlässigkeit zu steigern [15].

**Telemetrie und Alarmüberwachung** LoRaWAN eignet sich für die gleichzeitige Übertragung von periodischen Telemetriedaten und seltenen Alarmmeldungen. Durch unterschiedliche Spreading-Factor-Zuweisung und gezielte Retransmission kann hohe Zuverlässigkeit für Alarmer bei minimaler Verzögerung erreicht werden—ohne die reguläre Kommunikation zu beeinträchtigen [22].

**Umwelt- und Gefahrenüberwachung** In industriellen Umgebungen mit Unfall- oder Störfallrisiko (z. B. toxische Gase) erlaubt ein LoRaWAN-System mit optimiertem Downlink-Control-Packet-Mechanismus zuverlässige, latenzarme Umweltdatenübermittlung zur schnellen Gefahrenabwehr [25].

### 3.5. Verwandte Arbeiten

I dont fck know



## **4. Konzeptionierung und Entwicklung des Tracking-Systems**

### **4.1. Systemanforderungen**

### **4.2. Hardware-Design**

### **4.3. Tooling Auswahl und Software Design**

### **4.4. Energiemanagement und Batterielaufzeit**

## **5. Implementierung des Analysewerkzeuges**

### **5.1. TTN Mapper**

### **5.2. Einflussfaktoren auf die Signalausbreitung (Umwelt, Gebäude, menschliche Aktivität)**

### **5.3. Implementierung des Analysewerkzeuges**

### **5.4. Modelle zur Schätzung der Verbindungsqualität**

Log-Distanz-Modell (Log-Distance Path Loss Model)

Noch eins

Machine Learning Modell (DeepLora)

## **6. Untersuchung und Auswertung**

### **6.1. Überblick und Versuchsaufbau**

### **6.2. LoraWAN Tracking-System**

### **6.3. Analysewerkzeuge mit Signalausbreitungs-Modellen**

## **7. Diskussion der Ergebnisse**

### **7.1. Netzwerkabdeckung und Verbindungsqualität**

### **7.2. Grenzen und Herausforderungen**

### **7.3. Verbesserungspotentiale der Implementierungen**

### **7.4. Bewertung der Systemleistung**

### **7.5. Einordnung zu bestehenden Arbeiten**

## **8. Zusammenfassung und Ausblick**

### **8.1. Zusammenfassung der Ergebnisse**

### **8.2. Ausblick auf zukünftige Entwicklungen**



## A. Appendix

## Literatur

- [1] A. YEGIN (Actility), O. SELLER (Semtech), D. KJENDAL (Senet), D. KJENDAL (Senet). *LoRaWAN® Regional Parameters RP002-1.0.4*. Sep. 2022. (Besucht am 27.08.2025).
- [2] A.YEGIN (Actility), O.SELLER (Semtech), A.YEGIN (Actility). *LoRaWAN Backend Interfaces Specification*. (Besucht am 27.08.2025).
- [3] *Actility: IoT Solutions for a Smarter World*. (Besucht am 27.08.2025).
- [4] *Advanced Configuration | Helium Documentation*. <https://docs.helium.com/iot/run-an-Ins/advanced-configuration/>. (Besucht am 27.08.2025).
- [5] *Baden-Württemberg fördert Long Range Wide Area Networks in Städten und Gemeinden*. <https://im.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse-und-oeffentlichkeitsarbeit/pressemitteilung/pwuerttemberg-foerdert-long-range-wide-area-networks-in-staedten-und-gemeinden>. Juni 2024. (Besucht am 28.08.2025).
- [6] Martin Bor und Utz Roedig. „LoRa Transmission Parameter Selection“. In: *2017 13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*. 2017, S. 27–34. DOI: 10.1109/DCOSS.2017.10.
- [7] Ismail Butun, Nuno Pereira und Mikael Gidlund. „Security Risk Analysis of LoRaWAN and Future Directions“. In: *Future Internet* 11.3 (2019). ISSN: 1999-5903. DOI: 10.3390/fi11010003.
- [8] *Data Credit | Helium Documentation*. <https://docs.helium.com/tokens/data-credit/>. (Besucht am 27.08.2025).
- [9] *Duty Cycle*. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/duty-cycle/>. (Besucht am 27.08.2025).
- [10] *Frequency Plans*. <https://www.thethingsindustries.com/docs/concepts/features/lorawan/frequency-plans/>. (Besucht am 27.08.2025).
- [11] „Frequency-Shift Keying Modulation and Demodulation Using the Timer/Counter Peripherals on the AVR® EB“. In: (2024).
- [12] *Grundkenntnisse der drahtlosen Kommunikation: Drahtloser Mechanismus (1) | Murata Manufacturing Articles*. <https://article.murata.com/de/article/basics-of-wireless-communication-1>. Dez. 2023. (Besucht am 06.08.2025).
- [13] *Introducing Support for Public Networks with AWS IoT Core for LoRaWAN | The Internet of Things on AWS – Official Blog*. <https://aws.amazon.com/blogs/iot/introducing-support-for-public-networks-with-aws-iot-core-for-lorawan/>. Juni 2023. (Besucht am 27.08.2025).
- [14] Rachel Kufakunesu, Gerhard P. Hancke und Adnan M. Abu-Mahfouz. „A Survey on Adaptive Data Rate Optimization in LoRaWAN: Recent Solutions and Major Challenges“. In: *Sensors* 20.18 (Sep. 2020), S. 5044. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s20185044. (Besucht am 27.08.2025).

- [15] *LoRaWAN for Smart Industry*. (Besucht am 28. 08. 2025).
- [16] Amro Lulu und Bijan Mobasser. „Dual-Use Chirp Spread Spectrum Waveform with Ranging Capability“. In: Apr. 2019, S. 1–6. DOI: 10.1109/RADAR.2019.8835752.
- [17] N. Sornin (Semtech), M. Luis (Semtech), T. Eirich (IBM), T. Kramp (IBM) und O. Hersent (Actility). *LoRa Specification*. Jan. 2015. (Besucht am 27. 08. 2025).
- [18] *NetID and DevAddr Prefix Assignments*. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/prefix-assignments/>. (Besucht am 27. 08. 2025).
- [19] *Packet Broker*. <https://www.thethingsindustries.com/docs/concepts/packet-broker/>. (Besucht am 27. 08. 2025).
- [20] John G. Proakis und Masoud Salehi. *Digital Communications*. 5th ed. Boston: McGraw-Hill, 2008. ISBN: 978-0-07-295716-7.
- [21] *RSSI and SNR*. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/rssi-and-snr/>. (Besucht am 06. 08. 2025).
- [22] Francisco Helder C. dos Santos Filho u. a. „Performance of LoRaWAN for Handling Telemetry and Alarm Messages in Industrial Applications“. In: *Sensors* 20.11 (Jan. 2020), S. 3061. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s20113061. (Besucht am 28. 08. 2025).
- [23] *Senet Portal Docs*. <https://docs.senetco.io/ap/extCoverageServices/>. (Besucht am 27. 08. 2025).
- [24] *Signal-to-Noise Ratio (SNR) and Wireless Signal Strength*. [https://documentation.meraki.com/MR/Wi-Fi\\_Basics\\_and\\_Best\\_Practices/Signal-to-Noise\\_Ratio\\_\(SNR\)\\_and\\_Wireless\\_Signal\\_Strength](https://documentation.meraki.com/MR/Wi-Fi_Basics_and_Best_Practices/Signal-to-Noise_Ratio_(SNR)_and_Wireless_Signal_Strength). Okt. 2020. (Besucht am 07. 08. 2025).
- [25] Dinesh Tamang u. a. *Designing a Reliable and Low-Latency LoRaWAN Solution for Environmental Monitoring in Factories at Major Accident Risk*. Feb. 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2202.08742. (Besucht am 28. 08. 2025).
- [26] *TTN Mapper Documentation*. <https://docs.ttnmapper.org/>. (Besucht am 27. 08. 2025).
- [27] Tomas Tulka. *LoRa Spreading Factor Explained by Tomas Tulka*. <https://blog.tulka.com/loras-spreading-factor-explained>. (Besucht am 07. 08. 2025).
- [28] Lorenzo Vangelista. „Frequency Shift Chirp Modulation: The LoRa Modulation“. In: *IEEE Signal Processing Letters* 24.12 (2017), S. 1818–1821. DOI: 10.1109/LSP.2017.2762960.
- [29] Rodger E. Ziemer und William H. Tranter. *Principles of Communications: Systems, Modulation, and Noise*. Seventh edition. Danvers, MA: Wiley, 2015. ISBN: 978-1-118-07891-4.

## Abbildungsverzeichnis

1.	Frequency Shift Keying   Quelle: [11]	3
2.	LoRa Chirps   Quelle: [27]	5
3.	LoRa Symbole   Quelle: [16]	6

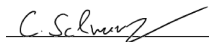
## Tabellenverzeichnis

## Quellcodeverzeichnis

## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe.

München, den 28. August 2025

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'C. Schwarz', is written over a horizontal line.

Christoph Schwarz