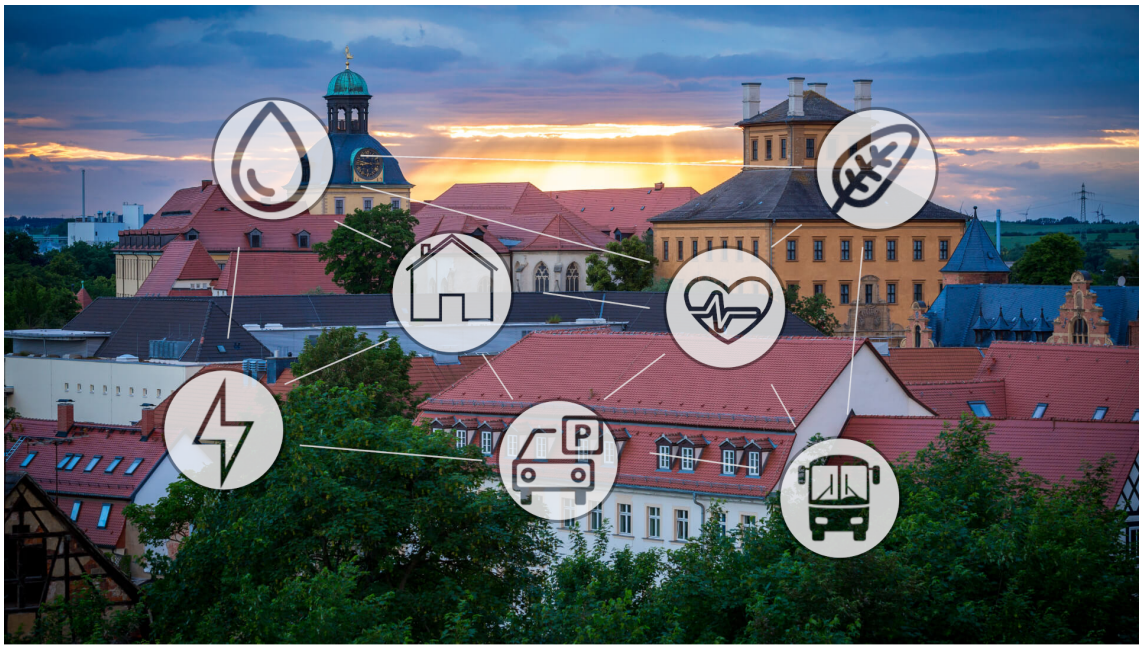
digitalisierungszentrum zeitz

HTWK Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig

Umfeldanalyse zu Smart Energy im Rahmen von Smart City Aktivitäten der Stadt Zeitz

Forschungs- und Transferzentrum Leipzig e. V.



M.Sc. Johannes Braun
M.Sc. Robert Fromm,
Prof. Dr.-Ing. Faouzi Derbel

HTWK Leipzig, den
16. Februar 2022

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis **3**
Tabellenverzeichnis **4**
Abkürzungsverzeichnis **5**
1 Einleitung **6**
2 Grundlagen drahtlose Übertragungsmöglichkeiten im Anwendungsfall Smart City Zeitz **7**
2.1 Funk- und Frequenzbänder . . . 7
2.1.1 Friis-Übertragungsgleichung . . . 8
2.1.2 Leistungspegel . . . 9
2.1.3 Pfadverluste . . . 9
2.1.4 Signal-Rausch-Verhältnis . . . 10
2.1.5 Modulation von elektromagnetischen Wellen . . . 11
2.2 Potentielle Anwendungen für Fernauslesung . . . 12
2.2.1 Vorteile von SMART METER und Fernablese . . . 12
2.2.2 Stromzähler . . . 13
2.2.3 Gaszähler . . . 14
2.3 Schnittstellen . . . 14
2.4 Kommunikations-Protokolle . . . 15
2.5 Anwendungen von LoRa . . . 15
2.6 Stand der Technik . . . 16
2.6.1 Wärme- und Wasserzähler, Heizkostenverteiler, Rauchwarnmelder . . . 16
2.6.2 Stromzähler/Smart Meter . . . 17
2.6.3 Wallboxen und Ladesäulen . . . 18
2.6.4 Modulare Software-Lösungen . . . 18
2.6.5 Zusammenfassung . . . 18
2.6.6 Datensicherheit . . . 18
3 Indoor-Reichweiten Test **19**
3.1 Messaufbau . . . 19
3.2 Ergebnisse und Auswertung . . . 20
3.3 Multihop . . . 22
3.4 Fazit . . . 22
4 Outdoor-Reichweiten Test **23**
4.1 Messaufbau . . . 23
4.1.1 Testplatinen . . . 23
4.1.2 Planen der Versuchsdurchführung . . . 24
4.1.3 Einstellungen der Funkkommunikation . . . 25
4.2 Auswahl der Messstationen und Messpunkte . . . 27
4.2.1 Messstationen . . . 27
4.2.2 Messpunkte . . . 28
4.3 Ergebnisse und Auswertung . . . 29
4.3.1 Erfolgreiche Funkverbindungen . . . 29
4.3.2 Verbesserungspotenzial . . . 31
5 Untersuchungen zur Ausnutzung der Frequenzbänder **33**
5.1 Messaufbau . . . 33
5.2 Ergebnisse und Auswertung . . . 33
Literatur **37**
A Zusammenfassung Stand der Technik **39**
B Datentabelle **40**
C Erfolgreiche Funkverbindungen **41**

Abbildungsverzeichnis

1 Pseudo Random Bit Stream als Spreizcode . . . 11
2 Darstellung des ungespreizten Signals und nach der Spreizung . . . 12
3 Aufteilung der Marktrollen versus wirtschaftliches Gesamtoptimum . . . 14
4 Vertragsbeziehungen zwischen den Marktpartnern . . . 15
5 Position des Gateways im Gebäude und Referenzwegpunkte für darüber liegende Stockwerke [Google Maps] . . . 19
6 Verteilung der Wegpunkte im Erdgeschoss . . . 20
7 Verteilung der Wegpunkte im ersten Stock . . . 21
8 Verteilung der Wegpunkte im zweiten Stock . . . 22
9 Verteilung der Wegpunkte im dritten Stock . . . 23
10 Foto der beiden verwendeten Funkmodule . . . 24
11 Frequenzdemodulierte Signale der Testpakete beider Funkprotokolle . . . 27
12 Messstationen der Studie auf der Karte . . . 28
13 Höhenkarte mit Messpunkten . . . 29
14 Farbige Darstellung der RSSI-Werte auf der Karte . . . 30
15 Funkausbreitung des LoRa-Signals ausgehend von zwei verschiedenen Stationen . 30
16 Abhängigkeit der RSSI-Werte von der Übertragungsdistanz . . . 31
17 Städtisches Gebiet mit RSSI in dBm (links), Abstand zum Aufstellort im m (oben) und Aufstellhöhe (rechts) [Gil16] . . . 31
18 Ländliches Gebiet mit RSSI in dBm (links), Abstand zum Aufstellort im m (oben) und Aufstellhöhe (rechts) [Gil16] . . . 32
19 Farbige Darstellung der Ausnutzung der Frequenzbänder . . . 34
20 Ausschnitte aus den aufgenommenen Wasserfall-Darstellungen . . . 36

Tabellenverzeichnis

1 Exakte Frequenzbereiche der drei verwendeten SRD-Frequenzbänder 8
2 Typische Werte für Leistung und Leistungspegel in dBm 9
3 Dämpfungseigenschaften verschiedener Materialien [Sch15] 10
4 Verteilung der Wegpunkte im Erdgeschoss Stock mit Punkt G als Gateway im Erdgeschoss und Auswertung der Funkabdeckung an den Wegpunkten 21
5 Verteilung der Wegpunkte im ersten Stock mit Punkt G als Gateway im Erdgeschoss und Auswertung der Funkabdeckung an den Wegpunkten 22
6 Verteilung der Wegpunkte im zweiten Stock mit Punkt G als Gateway im Erdgeschoss und Auswertung der Funkabdeckung an den Wegpunkten 23
7 Verteilung der Wegpunkte im dritten Stock mit Punkt G als Gateway im Erdgeschoss und Auswertung der Funkabdeckung an den Wegpunkten 24
8 Technische Daten der beiden Testplatinen 25
9 Einstellung der Funkkommunikation 26
10 Daten der verwendeten Messstationen 28
11 Konfiguration der Wasserfall-Darstellungen 33
12 Zusammenfassung des Stand der Technik 39
13 GPS-Koordinaten und Ergebnisse der Funkauslastung der Messpunkte 40
14 Liste der erfolgreichen Funkverbindungen mit 2FSK 41
15 Liste der erfolgreichen Funkverbindungen mit LoRa 42

Abkürzungsverzeichnis

CW	continuous wave
FEC	forward error correction
FSK	frequency-shift keying
HTWK	Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur
RLM	Registrierende Leistungsmessung
RSSI	received signal strength indicator
SDR	software-defined radio
SF	spreading factor
SLP	Standard-Last-Profil
SNR	signal-to-noise ratio
SRD	short-range device
WLAN	wireless local area network

1 Einleitung

Wir leben in einer schnell urbanisierenden Welt, in der zwei Drittel der Bevölkerung bis 2050 in Städten leben werden. [Uni] Intelligente Städte sind das Nonplusultra einer vernetzten, intelligenten Infrastruktur mit vernetzten Diensten, Geräten und Systemen, die von einfachen Aufgaben wie Sensoren an Abfallbehältern oder die Steuerung der Straßenbeleuchtung bis hin zu komplexen Bürgerdiensten, die aus mehreren Systemen bestehen, die miteinander verbunden sind, um beispielsweise intelligente Verkehrsmittel oder vernetzte Fahrzeuge zu ermöglichen. Die Verbindung von Infrastruktur und Dienstleistungen in einer Stadt umfasst Gebäude, Unternehmen und kommunale Einrichtungen und arbeitet u. a. mit intelligenten Gebäuden, intelligenter Mobilität und intelligenten Versorgungsunternehmen. Meistens ist das Ziel, entweder Kosteneffizienz zu erzielen oder eine Richtlinie einzuhalten. Wie bei allen komplexen technologischen Entwicklungen sind auch die intelligenten Städte auf die Zusammenarbeit von Entwicklern, Geräteherstellern und Dienstleistern angewiesen. Sie stellen die verschiedenen Teile der Smart-City-Architektur bereit. Dieses Konstrukt von Akteuren sieht für alle digital-transformierten Sektoren sehr ähnlich aus, nicht nur für Smart Citys [LoR20].

Ein Sensor-Netzwerk-System setzt sich zusammen aus Hardware, Software, Konnektivität und Datenverarbeitung. Es gibt Sensoren und Aktoren, um Variablen zu messen und dann darauf zu agieren. Um beispielsweise die Straßenbeleuchtung bei Sonnenaufgang auszuschalten, gibt es Software, die diese Entscheidung trifft, ein Sensornetz, das die Informationen sammelt, ein Aktor, der die Beleuchtung ausschaltet. Es muss sichergestellt sein, dass die Konnektivität allgegenwärtig und zu angemessenen Kosten verfügbar ist. Darüber hinaus sind Datenvisualisierungs- und Analysetools zu nennen, um aus den gesammelten Daten Erkenntnisse abzuleiten. Die einzelnen Datenpunkte erfüllen unterschiedliche Aufgaben, aber die Infrastruktur des Netzes und die Datenverarbeitung sind jedoch weitgehend gleich und bieten eine breite Basis für technische Anwendungen. Es ist nicht notwendig, das Rad jedes Mal neu zu erfinden, wenn ein neues Endgerät integriert werden soll. Die Konnektivitätsanforderungen einer Klimaanlage ähneln der einer Straßenlaterne, obwohl die übertragenen Daten und die Häufigkeit der Übertragung sehr unterschiedlich sein können [LoR20].

Das soll nicht heißen, dass intelligente Städte keine besonderen Anforderungen in Bezug auf die Infrastruktur haben. Sie unterscheiden sich beispielsweise deutlich von einer intelligenten Landwirtschaft. Sie bietet weitaus weniger Anwendungsmöglichkeiten und hat auch weniger Einschränkungen in Bezug auf die dichte städtische Topologie und hat weniger Akteure, die in das Ökosystem integriert werden müssen. [LoR20]

Intelligente Städte sind komplex, was die Anzahl der verschiedenen Dienste, Anwendungen und Endpunkte angeht. Sie haben schwierige Ausbreitungsbedingungen für drahtlose Sensornetze, wie z.B. die Übertragung in Gebäuden oder in Tiefgaragen. Sie umfassen mehrere Anbieter, Nutzertypen und erfordern die sichere Integration von Dritten in die Smart-City-Infrastruktur. Darüber hinaus handelt es sich oft um öffentliche Projekte, die unter finanzieller und regulatorischer Kontrolle fallen, sodass es nicht nur auf das Erreichen kommerzieller Ziele, sondern auch auf den gesellschaftlichen Nutzen für die Bürger ankommt. [LoR20]

In der Studie wird eine Umfeldanalyse für die Smart City Aktivitäten der Stadt Zeitz durchgeführt. Sie umfasst das gesetzliche, das physische und das technische Umfeld. Das physische Umfeld setzt sich zusammen aus den Eigenschaften elektromagnetischer Wellen, die zur Informationsübertragung genutzt werden und der topologie der Stadt. Sie beinhaltet auch die gesetzlichen Rahmen-

bedingungen für die Nutzung elektromagnetischer Wellen als Informationsträger und spezielle Gesetze für bestimmte Inhalte, die übertragen werden, wie DSGVO, BSI und MsbG. Es werden alle Faktoren beleuchtet, die Einfluss auf Smart City Aktivitäten der Stadt Zeitz haben könnten. Dazu gehört auch die grundlegend nutzbaren Funktechnoligien aufzuzeigen und für den Anwendungskontext zu vergleichen. Dies wird durch eine Indoor-Messung unterstützt. Um ein Verständniss für die Besonderheiten der Stadt Zeitz in diesem Kontext zu entwickeln, wird auf ihre Besonderheiten eingegangen. Hierfür werden verschiedene Messsungen in unterschiedlichen Fequenzbändern in der Stadt durchgeführt. Abschließend werden die Messergebnisse ausgewertet und eine Handlungsempfehlung ausgesprochen.

Die Studie wurde unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Faouzi Derbel, Inhaber der Professur Smart Diagnostik und Online Monitoring an der HTWK Leipzig, durchgeführt. Die Professur und das dazugehörige leistungsfähige Team verfügen über langjährige Erfahrungen in der angewandten und kooperativen Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet zuverlässiger, energieautarker drahtloser Sensor Netzwerk Systeme sowie der Zustandserfassung und -bewertung von Smart Grids. Prof. Derbel war lange Zeit Leiter der Forschungs- und Entwicklungsabteilung bei Siemens Building Technologies, die sich mit intelligenten und automatisierten Smart Meter Systemen beschäftigt hat. Derzeit ist er Mitglied der Arbeitsgruppe ERM TG28 bei ETSI, der Arbeitsgruppe 731.0.5 "low power radio Funkanlagen"bei der DKE sowie stellvertretender Vorsitzender der Arbeitsgruppe K201, die sich mit elektrotechnischen Aspekten von Smart Cities innerhalb der DKE beschäftigt. Prof. Derbel war an der Forschung und Entwicklung der batteriebetriebenen automatischen Zählerauslesesysteme Siemeca und Q.AMR für Submetering-Anwendungen beteiligt, die 2006 mit dem ersten Innovationspreis "Top Plus Award"von Siemens Building Technologies und 2009 mit dem ersten Preis SSuccess Story"von Texas Instruments ausgezeichnet wurden. Erfahrungen mit funkbasierter Kommunikation unter Extrembedingungen liegen ebenfalls bereits vor. So wurden Funkstrecken zur Übertragung in Öl-Luft-Öl-Grenzschichten innerhalb von Großgetrieben realisiert [Str18]. Die zugehörige Veröffentlichung wurde auf der 15th International Multi-Conference on Systems, Signals Devices mit dem Best Paper Award ausgezeichnet. Diese wissenschaftlichen Erkenntnisse wurden auch praktisch angewendet, in dem live Daten direkt aus Großgetrieben gesendet und Ausgewertet wurden. Darüber hinaus wurde ein energieautarkes drahtloses Indoor-Lokalisierungssystem auf Basis der eigenerforschten Wake-Up-Transceiver Technologie entwickelt. Die Professur verfügt ausserdem über Erfahrungen auf dem Gebiet der energieautarken drahrlosen Sensormodule für Outdoor-Anwendungen mit angepassten Energieharvesting-Ansätzen. Aktuelle werden im Smart City Kontext funkbasierte Energiemanagement-Systeme entwickelt, die eine geeignete Verschlüsselung von Daten mit gleichzeitigen Schutz von Privatsphäre erlauben.

2 Grundlagen drahtlose Übertragungsmöglichkeiten im Anwendungsfall Smart City Zeitz

2.1 Funk- und Frequenzbänder

Um drahtlos Informationen übertragen zu können, werden elektromagnetische Wellen im Radiofrequenzbereich moduliert. Dieser Radiofrequenzbereich bewegt sich zwischen 3 kHz und 3 THz und kann weiter in Frequenzbänder unterteilt werden. Innerhalb dieser Bänder können

Funkkanäle definiert werden, auf welchen dediziert Informationen übertragen werden können [KB06].

Um Störungen verschiedener Funkanwendungen zu vermeiden, dürfen zu keinem Zeitpunkt im selben Frequenzband gleichzeitig Übertragungen zu einem Empfänger stattfinden. Durch die Unterteilung in Frequenzbereiche wird die kostbare Ressource Band möglichst effektiv aufgeteilt und bestimmte Teilnehmer dürfen sich nur in diesem ihnen zugeteilten Frequenzband bewegen. So gibt es zum Beispiel für Mobilfunk, wireless local area network (WLAN) und andere Anwendungen spezifische Frequenzen. Die Zuteilung der Frequenzen und die Einhaltung der funktechnischen Bestimmungen unterliegen in Deutschland der Bundesnetzagentur. Neben der Frequenzzuteilung werden auch bestimmte Bedingungen für die Nutzung festgelegt, wie zum Beispiel die maximale Sendeleistung oder der Duty Cycle (Tastgrad), der den prozentualen Anteil angibt, in der ein Gerät in einer Zeiteinheit sendet.

Neben kommerziellen Frequenzbändern wie beispielsweise für den Mobilfunk gibt es Frequenzbereiche, die von jedermann genutzt werden können. Sie werden als Allgemeinzuteilungen für Anwendungen mit geringer Reichweite bezeichnet oder als short-range device (SRD). Für die Nutzung dieser Frequenzen muss keine kostenpflichtige Lizenz erworben werden, sondern darf von der „Allgemeinheit“ genutzt werden. [Bun] Sie unterliegt jedoch strengen Regeln zur maximalen Sendeleistung und Duty Cycle. Die Frequenzbänder 433 MHz, 868 MHz und 2,45 GHz, welche im Rahmen dieses Projekts genutzt werden, befinden sich im SRD-Band. Tabelle 1 zeigt dabei die tatsächlichen Grenzen und Bandbreiten der drei Frequenzbänder.

Tabelle 1: Exakte Frequenzbereiche der drei verwendeten SRD-Frequenzbänder

Mittenfrequenz [MHz]	**Untere Grenze** [MHz]	**Obere Grenze** [MHz]	**Bandbreite** [MHz]
433,92	433,05	434,79	1,74
866,5	863	870	7
2450	2400	2500	100

2.1.1 Friis-Übertragungsgleichung

Eine Funkübertragung wird realisiert, indem ein Funksender elektromagnetische Wellen aussendet und diese von einem Funkempfänger aufgenommen werden. Im einfachsten Fall wird angenommen, dass der Funkempfänger einen konstanten Träger aussendet - continuous wave (CW). Die Friis-Übertragungsgleichung gibt dabei an, welcher Anteil der Sendeleistung beim Empfänger ankommt. Dies zeigt Gleichung 1 mit P_r und P_t der Empfangs- und Sendeleistung, G_r und G_r die Antennengewinne der Empfangs- und Sendeantenne, λ der Wellenlänge und d der Abstand zwischen Empfangs- und Sendeeinheit [Fri46].

$$\frac{P_r}{P_t} = G_r \cdot G_t \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \tag{1}$$

Die Ausbreitungseigenschaften der elektromagnetischen Welle sind dabei von deren Trägerfrequenz f abhängig. Gleichung 2 zeigt das Verhältnis zwischen Trägerfrequenz und Wellenlänge mit Lichtgeschwindigkeit c als Umrechnungsfaktor.

$$c = \lambda \cdot f \tag{2}$$

Der Antennengewinn der Empfangs- und Sendeantenne G_r und G_r spielt besonders eine Bedeutung, wenn Richtantenne verwendet werden. Antennen, die in alle Richtungen gleichmäßig abstrahlen, haben in der Regel einen Antennengewinn von 1. Diese Antennen sind von besonderer Bedeutung, wenn Sensorknoten während der Installation nicht ausgerichtet werden können. Aus diesem Grund werden solche Antennen auch in den experimentellen Untersuchungen verwendet. Richtantennen haben einen Antennengewinn in der Größenordnung von Faktor 10 bis 100, wenn diese korrekt ausgerichtet sind. Ist eine Richtantenne jedoch nicht korrekt ausgerichtet, so sinkt der Antennengewinn unter 1.

2.1.2 Leistungspegel

Aufgrund eines großen Wertebereichs der Leistungen der elektromagnetischen Welle werden diese typischerweise als Pegel angegeben. 3 ist die Umrechnungsvorschrift. Dabei erfolgt eine Normierung auf 1 mW und die resultierenden Pegeleinheit ist dBm (Dezibel Milliwatt) [KB06].

$$L_P = 10\,\text{dBm} \cdot \log_{10}\left(\frac{P}{1\,\text{mW}}\right) \tag{3}$$

In der Tabelle 2 ist die Umrechnung ausgewählter Pegelwerte zu sehen.

Tabelle 2: Typische Werte für Leistung und Leistungspegel in dBm

L_P	14 dBm	10 dBm	0 dBm	−30 dBm	−60 dBm	−90 dBm	−120 dBm
P	25 mW	10 mW	1 mW	1 µW	1 nW	1 pW	1 fW

2.1.3 Pfadverluste

Elektromagnetische Wellen werden durch verschiedene physikalische Effekte bei ihrer Ausbreitung abgeschwächt. Dieser Verlust der Leistung wird als Dämpfung bezeichnet. Die Summe aller Verluste auf einer Funkstrecke wird als Pfadverlust bezeichnet. Die wichtigsten Dämpfungen sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden: Die Freiraumdämpfung beschreibt den Effekt, dass durch die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen im Raum die Leistungsdichte mit zunehmendem Abstand abnimmt. Wenn von einem isotropen Kugelstrahler als Sender ausgegangen wird, verteilt sich die Energie gleichmäßig kugelförmig im Raum. In großem Abstand zum Strahler kann der relativ kleine Ausschnitt der Kugeloberfläche als gerade Wellenfront angenommen werden, wodurch sich für eine verlustfreie Empfängerantenne für die Wirkfläche A_{eff} mit dem Antennengewinn G bei der Wellenlänge λ folgender in Gleichung 4 dargestellter Zusammenhang ergibt:

$$\frac{A_{\text{eff}}}{G} = \frac{\lambda}{4\pi} \tag{4}$$

Der Antennengewinn G ist dabei keine Verstärkung der Sendeleistung, sondern ergibt sich durch die Richtwirkung der Antenne, wodurch die Leistungsdichte in den gewünschten Raumsegmenten erhöht wird. Für die Freiraumdämpfung F ergibt sich unter Einbezug der Kugelfläche $A_{\text{Kugel}} = 4\pi r^2$ Gleichung 5, welche auch in Abhängigkeit von der Frequenz f, mit Lichtgeschwindigkeit c, angegeben werden kann [Wol].

$$F = \frac{A_{\text{Kugel}}}{A_{\text{eff}}} = 4\pi r^2 \cdot \frac{4\pi}{\lambda^2} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi r \cdot f}{c}\right)^2 \tag{5}$$

Der Freiraumdämpfungsfaktor ergibt sich aus der logarithmischen Darstellung in Gleichung 6:

$$F(\text{dB}) = 20\,\text{dB} \cdot lg\left(\frac{4\pi r \cdot f}{c}\right) \tag{6}$$

Neben der Freiraumdämpfung des Funksignals ergeben sich weitere Verluste durch Absorption beim Durchdringen von Materie (z. B. Hauswände, Luftmoleküle) und der Reflexion, Brechung und Streuung an Hindernissen. Je nach Material werden die Signale unterschiedlich stark gedämpft. Aber auch Umwelteinflüsse wie Luftfeuchtigkeit oder Regen können Signale dämpfen. Der Grad der Dämpfung ist ebenfalls abhängig von der genutzten Frequenz. Eine höhere Frequenz bedeutet aufgrund von Dispersion auch eine höhere Dämpfung [Gre98]. Tabelle 3 bietet einen Überblick über die Dämpfungseigenschaften verschiedener Materialien [KB06].

Tabelle 3: Dämpfungseigenschaften verschiedener Materialien [Sch15]

Material	**Dämpfung**	**Beispiele**
Holz	gering	Möbel, Decken, Zwischenwände
Gips	gering	Zwischenwände ohne Metallgitter
Glas	gering	Fensterscheiben
Wasser	mittel	Mensch, feuchte Materialien, Aquarium
Mauersteine	mittel	Wände, Decken
Beton	hoch	massive Wände, stahlarmierte Betonwände
Gips	hoch	Zwischenwände mit Metallgitter
Metall	sehr hoch	Aufzugsschacht, Brandschutztüren, Stahlbetonkonstruktionen
Erdreich	sehr hoch	Hügel, Täler usw.

Beim Aufbau eines Funknetzwerkes ist es wichtig, die Umwelt und deren Einflüsse zu beachten, da diese die Reichweite der Signale in besonderem Maße beeinflussen.

2.1.4 Signal-Rausch-Verhältnis

Das in Gleichung 7 dargestellte Signal-Rausch-Verhältnis/signal-to-noise ratio (SNR) gibt an, wie groß das Verhältnis der Leistung zwischen dem gewünschten Nutzsignal P_S und dem Hintergrundrauschen P_R in einem vorgegebenen Frequenzband ist.

$$\text{SNR} = \frac{P_S}{P_R} \tag{7}$$

Das SNR ist somit ein Maß für die Güte der Signalqualität und sollte über 1 liegen, um die Informationen verarbeiten zu können. Die Ursachen für das Rauschen sind vielfältig. Bei einer Funkübertragung liegt an der Empfängerantenne immer das sogenannte Empfängerrauschen an, das durch Strahlung aus Kosmos und Atmosphäre rührt. Daneben tritt u. A. das thermische Rauschen

auf, das durch minimale Änderungen der Temperatur den ohmschen Widerstand in allen Komponenten variiert [Hof13].

2.1.5 Modulation von elektromagnetischen Wellen

Motivation

Um Informationen über Funkwellen übertragen zu können, muss die zu übertragende Information durch Modulation auf das Trägersignal aufgeprägt werden. Dabei wird die Information, welche als niederfrequentes Signal vorliegt, in ein hochfrequentes Signal umgewandelt. Ohne Modulation wären drahtlose Übertragungen unmöglich, da sich alle Signale im niederen Frequenzbereich überlagern würden und keine getrennten Nachrichtenkanäle nutzbar wären. Außerdem lassen sich auf einer Trägerfrequenz mehrere Informationen unabhängig voneinander übertragen. Grundsätzlich wird bei der Modulation das Trägersignal durch Manipulation von Amplitude, Frequenz oder Phase so verändert, dass es die zu übertragende Information enthält.

Generell wird zwischen analogen und digitalen Modulationsverfahren unterschieden. Bei der analogen Modulation werden zeit- und wertekontinuierliche Informationen übertragen, während bei der digitalen Modulation Informationen in eine zeit- und wertediskrete Darstellung der Signale umgesetzt werden. Über eine Antenne wird das modulierte Signal abgestrahlt und kann innerhalb der Reichweite von einer Empfängerantenne aufgenommen werden. Im Empfänger wird das Signal demoduliert, wodurch die Information aus der Trägerfrequenz zurückgewonnen wird und weiterverarbeitet werden kann.[KB06]

Frequenzspreizung

Die Spreizung von Frequenzen kann als ein Zusatz zur Modulation verstanden werden. Bei der Spreizung wird die zu übertragende Bitfolge vor der Modulation mit einem Spreizcode multipliziert. Der Spreizcode ist ein binärer Code, bestehend aus sogenannten Chirps, welche zur besseren Unterscheidung zur übertragenden Bitfolge mit „+1“ (entspricht 0) und „-1“ (entspricht 1) dargestellt werden. In Abbildung 1 wird veranschaulicht, wie die Daten mit dem Spreizcode moduliert werden.

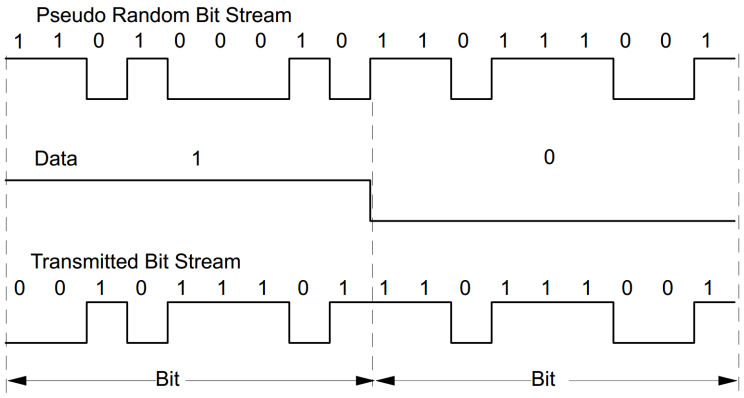


Abbildung 1: Pseudo Random Bit Steam als Spreizcode mit dem Spreizfaktor 9 wird mit dem Datensignal multipliziert, wodurch die zu übertragende, gespreizte Bitfolge entsteht. [Dut98]

Die Chirprate r_c ist dabei deutlich größer als die Bitrate r_b. Der spreading factor (SF) berechnet sich aus dem Verhältnis von Chirprate zu Bitrate, wie in Gleichung 8 zu sehen.

$$\mathrm{SF} = \frac{r_\mathrm{c}}{r_\mathrm{b}} \tag{8}$$

Der SF legt somit die Rate fest, um welche das gespreizte Signal größer ist als die ursprüngliche Bitfolge, wodurch die belegte Frequenzbandbreite nach der Modulation um den Spreizfaktor größer ist. Im Vergleich zum ungespreizten Signal wird die Leistung auf einen um den Spreizungsfaktor größeren Frequenzbereich verteilt, wodurch die Leistungsdichte sinkt. Durch diese Verteilung auf einen größeren Frequenzbereich stört das Signal andere Systeme weniger und ist selbst weniger störanfällig, wobei die Störfestigkeit mit dem Spreizfaktor steigt.

Mithilfe eines sehr großen Spreizfaktors lässt sich die Leistungsdichte des Signals unter die Rauschleistungsdichte senken, wodurch das Signal im Rauschen „versteckt wird“, was insbesondere bei militärischen Anwendungen gewünscht ist. Ein weiterer Vorteil ist, dass das Signal ohne den Spreizcode nicht demoduliert werden kann und somit gewissermaßen verschlüsselt ist. Durch die Spreizung entsteht ein erhöhter Bandbreitenbedarf, allerdings lassen sich mehrere Signale mit unterschiedlichen Codes im gleichen Frequenzband nutzen. Nach der Demodulation im Empfänger wird das gespreizte Signal im richtigen Zeittakt mit dem Spreizcode multipliziert, wodurch die ursprüngliche Bitfolge wieder vorliegt [KB06].

Abbildung 2 zeigt, wie sich die Leistung nach der Spreizung auf ein breiteres Spektrum aufgeteilt. Ein prominenter Funkstandard, der auf diese Art der Modulation setzt, ist LoRa (Name des Standards aus der Zusammenfügung von Long Range). Mithilfe der Frequenzspreizung kann LoRa eine hohe Empfängerempfindlichkeit erreichen, die in hohen Reichweiten resultiert. Nachteilig wirkt sich die Spreizung in einer geringeren Datenrate und somit in längeren Sendezeiten bei gleicher Datenmenge aus, die in einem erhöhten Energiebedarf resultiert.

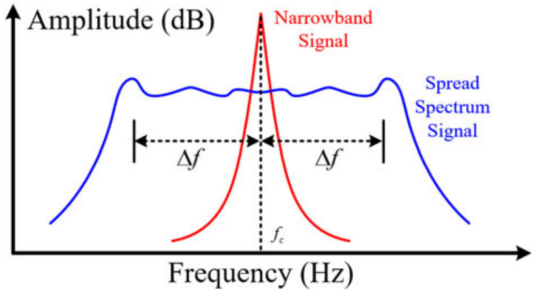


Abbildung 2: Darstellung des ungespreizten Signals (rot) und nach der Spreizung (blau) im Frequenzbereich. Die Amplitude des gespreizten Signals verringert sich, dafür steigt der belegte Frequenzbereich. [PKJ17]

2.2 Potentielle Anwendungen für Fernauslesung

2.2.1 Vorteile von SMART METER und Fernablese

Aktuelle Zählerstände und Verbräuche können mittels digitaler Stromzähler abgelesen werden. Die digitalen Stromzähler werden hierfür mittels eines Smart-Meter-Gateways zusammengeschaltet und bilden somit ein intelligentes Messsystem. Dabei liefern die Zähler eine detaillierte Darstellung der Messwerte und ermöglichen beispielsweise eine zeitliche Aufschlüsslung der

Verbräuche. Die erfassten Messwerte werden dann von den Verbrauchern an die entsprechenden Energieversorgungsunternehmen übermittelt, wodurch die jährliche Ablesung des Stromverbrauchs vor Ort entfällt. Für Unternehmen stellt die Nutzung von digitalen Stromzählern bzw. von Smart Metern die Grundlage eines modernen Energiemanagements dar.

Abgesehen von der komfortablen Fernablese der Messwerte bietet ein solches System Möglichkeiten zur Bündelung von Messwerten mittels geeigneter Software wie bspw. Apps und somit auch zur leichteren Identifikation von Energiesparpotenzialen. Im privaten Sektor bietet zukünftig das Smart-Meter neben den bereits genannten Vorteilen die automatische Steuerung von Stromverbräuchen und Nutzung von flexiblen Stromtarifen sowie der dezentralen Erzeugung von Energie wie bspw. durch die Nutzung von Fotovoltaikanlagen. Ferner sollen Zähler für Gas, Wasser oder Wärme in das Smart-Meter-System eingebunden werden können, bei der das Smart-Meter-System als gesicherte Kommunikationsplattform für Smart-Home-Anwendungen genutzt werden. [Bun20]

2.2.2 Stromzähler

Abhängig vom Verbrauch werden Messstellen mit unterschiedlichen Zählern ausgestattet. Liegt der Jahresverbrauch unter 100 MWh, werden in der Regel die sogenannten SLP-Zähler (Standard-Last-Profil) verwendet. SLP-Zähler werden einmalig abgelesen und der Kunde erhält nur einmal jährlich eine detaillierte Abrechnung auf Basis ihres tatsächlichen Verbrauchs. Mit diesem statistisch-mathematischen Verfahren wird der zeitliche Verlauf des Stromverbrauchs (bzw. der Leistung des Verbrauchers) abgebildet.

Basierend auf der deutschen Stromnetzzugangsverordnung (StromNZV) besteht die Pflicht zur registrierenden Leistungsmessung bei Verbrauchsstellen mit einem Jahresstromverbrauch von über 100 MWh besteht. Hierfür werden Anlagen mit einem sogenannte RLM-Zähler (Registrierende Leistungsmessung) ausgestattet. Bei diesem Zählertyp erfasst die Messeinrichtung pro Messperiode (15 Minuten bei Strom) den Leistungsmittelwert und übermittelt die Messwerte an den Netzbetreiber, der sie wiederum an den Stromanbieter übersendet. Kunden mit RLM-Zählern erhalten jeden Monat eine Abrechnung, welche die tatsächliche Leistung und den sich daraus ergebende Verbrauch errechnet [Ros20].

Allgemein misst ein Stromzähler die Energie, der innerhalb eines definierten Zeitraums in einem Haushalt verbraucht wurde. Er wird in Kilowattstunden angegeben und somit wissen Energieversorger und Kunde Bescheid, wie viel Strom genau bezogen wurde. Gemessen wird hierbei entweder mit einem Wechselstrom- oder Drehstromzähler. Wechselstromzähler sind Geräte welche für die Messung von haushaltsüblichem Einphasenwechselstrom mit dreiadriger Verkabelung genutzt werden. Dahingegen wird für das Erfassen des Energieflusses an fünfadrigen Anschlüssen für Dreiphasenwechselstrom sogenannter Drehstromzähler notwendig. Anwendung findet der Wechselstromzähler als geeichte Messeinrichtung an Wohnungs- und Hausanschlüssen, an denen eine Abrechnung der Stromlieferung erfolgt.

Unter anderem werden kostengünstigere, ungeeichte Wechselstromzähler als Zwischenzähler für die haus-, wohnungs- oder betriebsinterne Energiemessung verwendet. Als dritte Variante ist die Nutzung eines Doppeltarifzählers möglich. Die Doppeltarifzähler finden sich in Haushalten mit zwei unterschiedlichen Stromtarifen wieder. Vor allem werden diese verwendet, wenn eine Nachtspeicherheizung vorhanden ist und es einen Tag- und Nachttarif gibt [Ver].

2.2.3 Gaszähler

Ein Gaszähler dient dazu, die in einer bestimmten Zeit hindurchströmende Menge Gas zu messen. Dieser Zähler kommt immer dann zum Einsatz, wenn der Gasverbrauch zur Kostenabrechnung zu bestimmen ist. Heute gibt es verschiedene technische Möglichkeiten, den Gasvolumenstrom zu messen. Balgengaszähler kommen vor allem in kleineren Niederdruckanwendungen wie der Haushaltsgasmessung zum Einsatz. Diese Technik basiert auf einer Veränderungsmessung von zwei mit einer Membran getrennten Messkammern (Balgen). Füllt das Gas eine der Kammern, bewegt sich die Membran und wirkt auf ein Gelenkgetriebe. Dieses überträgt die Bewegung auf eine Kurbelwelle, welche das nachströmende Gas in die zweite Messkammer leitet. Daraufhin entleert sich die erste Kammer und das Gas strömt durch die Hausanlage. Eine Kupplung nimmt die Bewegung des Getriebes auf und überträgt sie auf das Zählwerk.[Ros20].

2.3 Schnittstellen

Die intelligenten Zähler werden für die zukünftigen Anwendungen in Smart Grids die Basisdaten liefern und sind deshalb bei der Diskussion um Smart Grids, Smart Distribution und Smart Metering ein zentrales Thema. Nach [VDE10] ergibt sich die Abbildung 3 welche verdeutlicht, wo das gesamtwirtschaftliche Optimum zwischen Netzauslastung, Einspeisung dezentral erzeugter erneuerbarer Energien und Energieabnahme durch den Energiekunden liegt. Jede Marktrolle verfolgt ihre eigenen Interessen, deshalb gilt es ein Instrument zu nutzen, welches alle beteiligten Marktakteure überwacht.

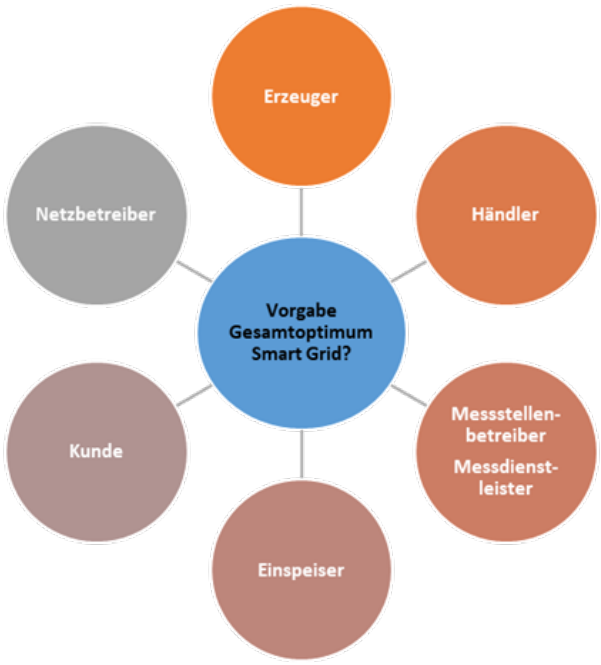


Abbildung 3: Aufteilung der Marktrollen versus wirtschaftliches Gesamtoptimum

Mit den vorgehend beschriebenen Marktrollen ergibt sich ein breites Geflecht von Vertragsbeziehungen zwischen den einzelnen Marktteilnehmern. Eine beschreibende Darstellung dieser Zusammenhänge ist in Abbildung 4 dargestellt. Nach [VDE10] gibt es aus Sicht des Smart Metering es aber keine alleinverantwortliche Rolle für die Messung und somit tritt der Netzbetreiber immer dann in Aktion, wenn keine anderweitigen Vereinbarungen getroffen sind.

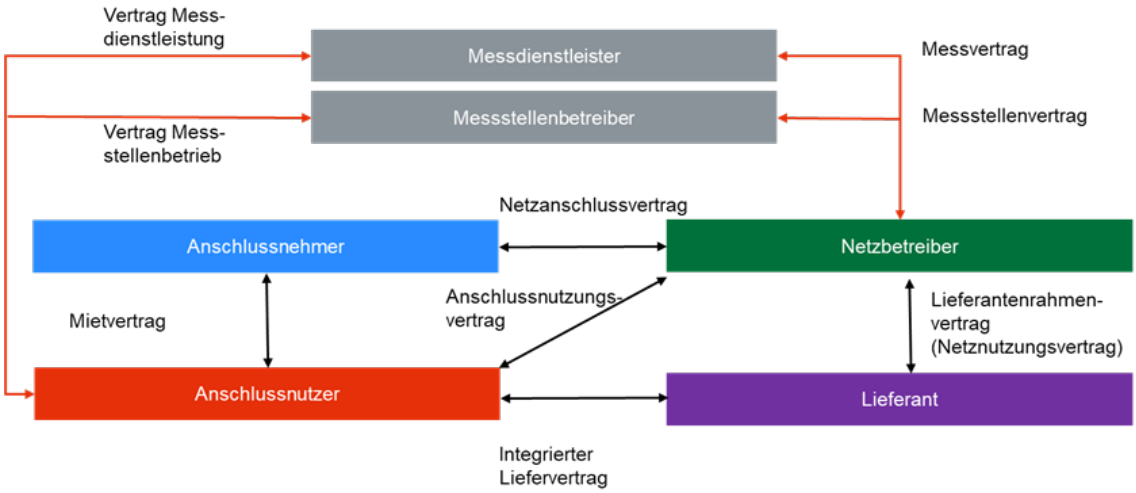


Abbildung 4: Vertragsbeziehungen zwischen den Marktpartnern

2.4 Kommunikations-Protokolle

In der Nahfeldkommunikation existieren folgenden Protokolle für die Primärkommunikation zwischen Zählern und den Datensammlern / Gateways [Gag+21].

- KNX, IEC Standard, RF
- M-Bus (EN 13757 Standard), OMS (Open Metering Specification)
- drahtlose, Nahfunklösung: WM-Bus (Wireless M-Bus), WiFi und ZigBee (basierend auf IEEE 802.15.4-Standard)
- PLC-basierte Lösung wie HomePlug bessere Performance als drahtlose Lösungen; gemeinsame Working Group mit ZigBee

Nicht weit verbreitete Standards sind zusätzlich.

- 6LoWPAN,
- Z-Wave,
- LonWorks,
- digitalSTROM

Möglichkeiten der Kommunikation zwischen Zählern und dem Datenerfassungssystem (MDM System):

- „IEC 1107“ – IEC 61107 oder auch IEC 62056-21
- DLMS/COSEM
- OMS Protokoll (Open Metering Specification)
- Protokolle der Energie Automatisierung (Fernwirkprotokolle)
- IEC 60870 (60870-5-104 ist IP basiert; -101 ist seriell)
- SML und andere XML-basierte Protokolle

2.5 Anwendungen von LoRa

Smart Citys stellen für drahtlose Übertragung eine sehr dichte Umgebung dar, in der eine Vielzahl von Anwendungen und Dienste parallel ablaufen. Im Folgenden werden viele der potenziellen Anwendungsfälle für Smart Citys aufgelistet. Es ist anzumerken, dass viele Anwendungen nur

eine sehr geringe Anforderung an die Bandbreite stellen und nur selten kommunizieren müssen. Dieser relativ geringe Netzwerkbedarf passt gut zu den Eigenschaften von LoRaWAN. Andere Anwendungen mit Anforderungen wie beispielsweise hohe Bandbreite und geringer Latenz sind in anderen Netzwerkformen besser bedient [LoR20].

Die Serviceanbieter oder die Stadt müssen keine Verträge mit Mobilfunkanbietern abschließen oder individuelle Netze für jeden Anwendungsfall aufbauen. Stattdessen können sie ein eigenes, ein privates LoRaWAN besitzen, über das sie viele der Anwendungen ausführen können. Durch die so angebotenen Dienstleistungen kann die Sicherheit und die Lebensqualität der Bürger verbessert werden. Drahtlose Sensoren können Daten in Bereichen wie Temperatur, Feuchtigkeit, Luftqualität, Vibration und Lärm aufnehmen. [LoR20]. Beispiele hierfür sind:

- Straßentemperaturüberwachung, um Salzung zu veranlassen
- Stickoxidüberwachung zum Schutz der Bürger
- Feuchtigkeitsüberwachung zum Schutz vor Feuchtigkeitsschäden an Gebäuden.
- Feuchtigkeitsüberwachung im Erdboden zum Schutz der Pflanzen
- Geräuschpegelmessung zum Schutz der Anwohner

Die Anwendungsfelder sind riesig. Die gesammelten Daten können noch ausgewertet und die Trends analysiert werden. Somit können vorausschauende Maßnahmen ergriffen werden, um das Leben der Bewohner der Stadt zu verbessern. Smart City bedeutet nicht nur Datensammeln, sondern auch reaktiv etwas tun, wie beispielsweise die Steuerung und Wartung von Straßenbeleuchtung, das Leeren von als voll gemeldeten Mülleimern oder das intelligente Parkleitsystem. Sicherheitsrelevante Anwendungen wie Gebäudeüberwachung und Zugangskontrolle gehören auch zum Repertoire [LoR20].

2.6 Stand der Technik

2.6.1 Wärme- und Wasserzähler, Heizkostenverteiler, Rauchwarnmelder

Als Grundlage für eine faire und genaue Abrechnung sind exakte Verbrauchsdaten von Wasser und Wärme die grundlegende Voraussetzung. Zur Fernauslese der Verbrauchsdaten bieten viele Hersteller kompatible Systembausteine an. Je nach Wunschkonfiguration beinhaltet das Wärmezähler, Wasserzähler, Heizkostenverteiler, Rauchwarnmelder und dazugehörte Netzwerkknoten und Gateways für eine hohe Kompatibilität.

Qundis

Die Produktpalette der Firma Qundis umfasst neben den o. g. Komponenten, auch Funkmodule zur nachträglichen Montage an vorhandenen Zähler, ebenso Stromzählern. Die Datenfernübertragung erfolgt über Gateways, welche die gesammelten Daten der Messgeräte (C- und T-Mode, WM-Bus) über Mobilübertragung weiterleiten. Mit Hilfe der Management- und Abrechnungssoftware Q SAM können die Verbrauchsdaten vollautomatisch durch die direkte Schnittstelle zu allen angeschlossenen Zählerfernauslesegeräten ausgelesen und übertragen werden.

Ista

Ista bietet verschieden Funkmodule zum Nachrüsten, sowie Wärme- und Wasserzähler zum Erfassen der Verbrauchsdaten an. Über einen Repeater oder Level-Converter werden die Daten ge-

sammelt und per Laptop oder Modem auslesen. Das Energiedatenmanagement oder das ista Webportal ermöglichen die Verwaltung und Abrechnungen der Verbrauchsdaten.

Modularis

Die Verbrauchszähler von Modularis werden per WM-Bus bei einem Gateway gesammelt und via Mobilfunk übertragen. Die Auslesesoftware M-Fair und das Webportal ermöglichen die Visualisierung und Auswertung der Verbrauchsdaten.

LineMetrics

Bestehende Zähler können mit Funksensoren von LineMetrics fernausgelesen werden. Die Sensoren erfassen aktuelle Verbrauchswerte (LoRa-Funk), welche durch die Gateways gesammelt und via Mobilfunk übertragen werden. Die grafische Analyse der Verbrauchsdaten und die Überwachung der Geräte wird über die LineMetricsCloud möglich.

Discovergy

Discovergy bietet einen „intelligenten“ Gaszähler an, welcher die Daten mittels einer digitalen Schnittstelle kontinuierlich an angeschlossene Kommunikationsmodule übermittelt. Die Datenkommunikation erfolgt über eine drahtlose Lösung (WM-Bus) an das Smart Meter Gateway Meteroit. Im Gateway werden die verschlüsselten Daten gespeichert und übertragen.

2.6.2 Stromzähler/Smart Meter

EasyMeter

EasyMeter bietet verschiedene Stromzähler (Gleich-, Wechsel- und Drehstrom) an. Sie zeichnen sich durch modulare Erweiterbarkeit und offene Schnittstellen zu anderen Herstellern aus. Weiterhin verfolgt EasyMeter ein offenes Konzept mit Modulpartnerschaften (ista, Discovergy, ...). Die Funkkommunikation findet via LoRa oder Wireless M-Bus statt.

Discovergy

Neben Gaszählern zählen „intelligente“ Stromzähler zum Produktportfolio von Discovergy. Neben reinen Verbrauchsdaten kann der Smart Meter ebenso für Haushalte mit Photovoltaikanlagen eingesetzt werden. Das Discovergy-Portal visualisiert alle Daten und zeigt Produktionsdaten (PV) in Echtzeit. Das Smart Meter Gateway ist die Schnittstelle zwischen Zähler und Server. Die Datenübertragung kann durch eine serielle Schnittstelle oder Wireless M-Bus stattfinden bzw. per LAN oder Mobilfunk.

EMH metering

Die digitalen Haushaltszähler von EMH metering ermöglichen einen erfolgreichen Rollout der modernen Messeinrichtung und des intelligenten Messsystems nach dem "Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende". Die Produkte umfassen FFN Basiszähler und Messeinrichtungen nach

MsbG (Gesetz über den Messstellenbetrieb und die Datenkommunikation in intelligenten Energienetzen: Messstellenbetriebsgesetz). Außerdem stehen Zähler für Ladestationen für eine nachgelagerte Abrechnung zur Verfügung. Das Casa Smart Meter Gateway bildet die Kommunikationseinheit der angeschlossenen Messeinrichtungen. Es verfügt über Interoperable Standard-Schnittstellen für WAN, LMN und HAN. Die Speicherung und Übertragung der Messdaten werden in verschiedenen Software-Systemen realisiert.

2.6.3 Wallboxen und Ladesäulen

SCAPO

Die Ladesäulen/Wallboxen von SCAPO sind in verschiedenen Ausführungen erhältlich mit einer Ladeleistung von 11 oder 22 kW, bis zu zwei Ladepunkten und integrierten Abrechnungssystem.

MENNEKES

Mennekes bietet Wallboxen und Ladesäulen an. Die Ladeleistungen liegen zwischen 3,7 bis 22 kW und optional integrierte Abrechnungsdienstleistung. Die Vernetzung und Kommunikationsschnittstellen laufen über LAN oder Professional+ Ladesysteme.

2.6.4 Modulare Software-Lösungen

Thüga Smartservice

Modulare Software-Lösungen, welche von Smart Metering, Energiemanagement, bis zur Telekommunikation und Verbrauchsabrechnung reichen. Thüga ist Modulpartner von EasyMeter. Der Schwerpunkt liegt auf SAP-Lösungen.

2.6.5 Zusammenfassung

Eine zusammenfassende Tabelle ist auf Seite 39 zu sehen.

2.6.6 Datensicherheit

Um Datenschutz und Datensicherheit in Smart-Meter-Systemen zu gewährleisten, findet hier die Vorgaben aus dem Gesetz über den Messstellenbetrieb und die Datenkommunikation in intelligenten Energienetzen (Messstellenbetriebsgesetz - MsbG) Anwendung. In Kapitel 3 (Technische Vorgaben zur Gewährleistung von Datenschutz und Datensicherheit beim Einsatz von Smart-Meter-Gateways) sind alle relevanten Paragraphen aufgeführt.

- § 19 Allgemeine Anforderungen an Messsysteme
- § 20 Anbindbarkeit von Messeinrichtungen für Gas an das Smart-Meter-Gateway
- § 21 Mindestanforderungen an intelligente Messsysteme
- § 22 Mindestanforderungen an das Smart-Meter-Gateway durch Schutzprofile und Technische Richtlinien
- § 23 Sichere Anbindung an das Smart-Meter-Gateways
- § 24 Zertifizierung des Smart-Meter-Gateway

- § 25 Smart-Meter-Gateway-Administrator; Zertifizierung
- § 26 Aufrechterhaltung eines einheitlichen Sicherheitsniveaus
- § 27 Weiterentwicklung von Schutzprofilen und Technischen Richtlinien;
- § 28 Inhaber der Wurzelzertifikate

3 Indoor-Reichweiten Test

Ziel dieser Untersuchung ist festzustellen, wie sich innerhalb eines Gebäudes die Durchdringung der unterschiedlichen Technologien verhält. Wie in Abschnitt 2.1.3 beschrieben, nehmen die Pfadverluste mit steigender Entfernung zwischen Sender und Empfänger und den Umweltbedingungen zu. Im Rahmen dieses Versuchs soll deshalb der konkrete Anwendungsfall in einem Gebäude simuliert werden.

3.1 Messaufbau

Als Referenzgebäude für diesen Indoor-Reichweiten Test wurde der Wiener-Bau der Fakultät Ingenieurwesen der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur (HTWK) Leipzig genutzt, der den Fachbereich Elektrotechnik beherbergt. Abbildung 5 zeigt die Außenansicht des Gebäudes, um einen Eindruck von der Örtlichkeit zu bekommen. Bei dem Gebäude handelt es sich um einen Altbau mit Fertigstellung im Jahre 1903 in der typischen massiven Bauweise. Die Wände besitzen Wandstärken von ca. 70 cm und die Deckenhöhe beträgt 5,7 m bei einer Deckenstärke von ca. 40 cm. Zum Zeitpunkt der Messungen fanden an dem Gebäude außerdem umfassende Renovierungsarbeiten statt, im Zuge derer das gesamte Gebäude mit einem Baugerüst umbaut wurde. Diese massive Bauweise in Kombination mit der Nutzung als Hochschulgebäude mit mehreren aktiven WLAN-Netzwerken stellen ein schwieriges Umfeld für Funknetzwerke dar und bieten somit realistische Bedingungen für den indoor Reichweiten Test.

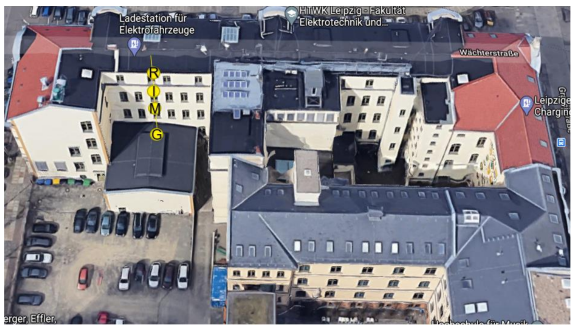


Abbildung 5: Position des Gateways im Gebäude und Referenzwegpunkte für darüber liegende Stockwerke [Google Maps]

Innerhalb des Gebäudes werden der Empfänger bzw. das Gateway fest platziert. An verschiedenen Punkten im Gebäude wurden Wegpunkte definiert, an denen überprüft wird, ob eine Funkverbindung zum Empfänger aufgebaut werden kann. Die 20 festgelegten Wegpunkte sind innerhalb des ganzen Gebäudes auf allen vier verschiedenen Stockwerken nach Möglichkeit gleich verteilt. Ein Beispiel für die Positionierung der Wegpunkte ist jeweils im Gebäudeplan verzeichnet. Die Positionierung der Wegpunkte und die Bestimmung der Abstände zum Gateway erfolgte mittels Vermessung des Gebäudes mit einem Laserentfernungsmessgerät und geometrischen

Berechnungen. Das Gateway wurde im Labor W23 platziert, dass sich in einem Anbau auf der Rückseite des Hauptgebäudes befindet. Dieser Einstöckige Anbau sorgt dafür, dass die Position des Gateways für die Messpunkte direkt darüber etwas vorversetzt ist. Durch die geringe Versetzung nach hinten und die hohe Deckenhöhe ist es jedoch so, dass die Wegpunkte R, I und M, wie in Abbildung 14 dargestellt, trotzdem fast direkt über dem Gateway befinden. Diese Wegpunkte können bei der Orientierung der Karte in Abbildung 6 genutzt werden, da sie sich alle auf der gleichen Höhe zum Gateway befinden.

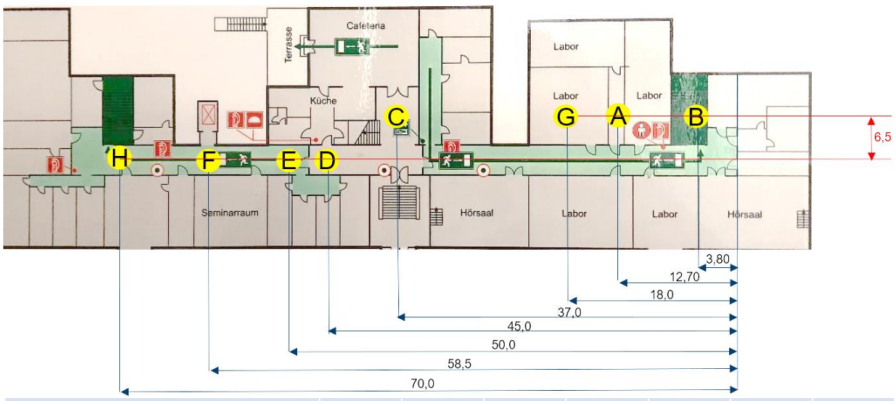


Abbildung 6: Verteilung der Wegpunkte im Erdgeschoss mit Punkt G als Gateway und Auswertung der Funkabdeckung an den Punkten.

Pro Wegpunkt werden jeweils 10 Telegramme in einem Intervall von 5 s gesendet und überprüft, ob diese am Gateway empfangen wurden. Durch die ausreichende Verweilzeit an den verschiedenen Wegpunkten wird sichergestellt, dass die Qualität der Funkstrecke ausreicht, um ein funktionales Netzwerk aufzubauen. Wenn es bei mehreren Versuchen nicht möglich ist, mindestens 8 Telegramme in Folge zuzustellen, wird der Wegpunkt als nicht vom Funknetzwerk abgedeckt angesehen. Untersucht wird jeweils die Abdeckung im Gebäude mit unterschiedlichen Funkparametern. Die Sendeleistung ist für beide Technologien auf das Maximum von 14 dBm eingestellt. Bei LoRa wird der Parameter SF 7 und 12 getestet.

3.2 Ergebnisse und Auswertung

Tabelle 4 zeigt oben die Verteilung der Wegpunkte im Erdgeschoss und darunter, ob an den jeweiligen Wegpunkten eine Funkverbindung aufgebaut werden konnte (grün = möglich, rot = nicht möglich) aufgeteilt nach den verschiedenen Funkparametern. Der Punkt G markiert die Position des Gateways im Labor.

Es zeigt sich, dass die Reichweite im 868 MHz Band die des 2,4 GHz Bandes erwartungsgemäß übersteigt. Mit knapp 28 m Reichweite bei Limitierung auf das 2,4 GHz Band und über 40 m bei Nutzung des Sub-Gigahertz Bandes kann eine solide Reichweite im selben Stockwerk erzielt werden. Im Vergleich dazu konnte zu einem im selben Labor installierten WLAN-Hotspot am Punkt D keine Verbindung mehr hergestellt werden. LoRa konnte selbst mit dem niedrigen Spreizfaktor an allen Punkten eine Verbindung aufbauen.

Das Gateway verbleibt im Erdgeschoss an gleicher Stelle. Abbildung 7 zeigt die Verteilung der Wegpunkte im ersten Stock und die jeweilige Abdeckung des Funknetzwerks. Hier zeigt sich kein Unterschied mehr in der Abdeckung bei den verschiedenen Funkeinstellungen. Die Wegpunkte K

Tabelle 4: Verteilung der Wegpunkte im Erdgeschoss Stock mit Punkt G als Gateway im Erdgeschoss und Auswertung der Funkabdeckung an den Wegpunkten

Wegpunkt	**A**	**B**	**|c|**	**D**	**E**	**F**	**H**
Entfernung Luftlinie [m]	5,3	14,2	19,0	27,8	32,7	41,0	52,2
Anzahl der penetrierten Wände	1	3	4	4	5	5	5
433 MHz							
868 MHz							
2,4 GHz							
LoRa SF 7							
LoRa SF 12							

und L liegen nur knappe fünf Meter auseinander, dennoch ist am Wegpunkt L keine Verbindung mehr möglich. Die Luftlinie zwischen Wegpunkt L und dem Gateway führt jedoch direkt durch das sehr massive Treppenhaus des Gebäudes, während die Luftlinie zwischen Wegpunkt K und dem Gateway nur einen kleinen Teil des Treppenhauses tangiert. Die Funkabdeckung von LoRa ist an allen Wegpunkten in diesem Stockwerk gegeben.

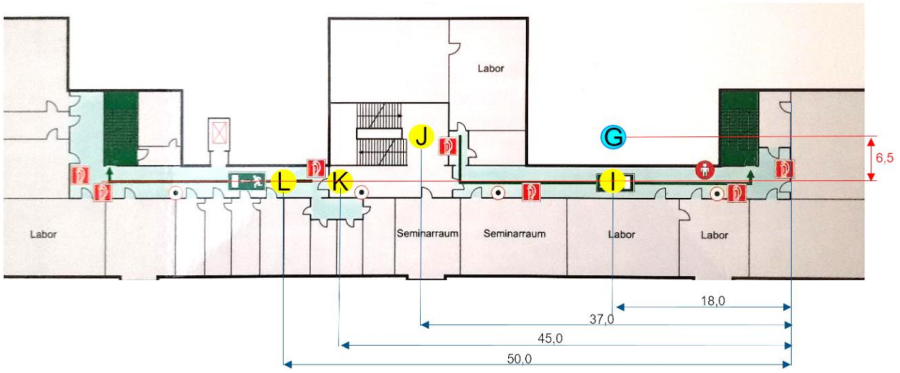


Abbildung 7: Verteilung der Wegpunkte im ersten Stock mit Punkt G als Gateway im Erdgeschoss und Auswertung der Funkabdeckung an den Wegpunkten

Im zweiten Stock des Gebäudes sind die Wegpunkte, wie in Abbildung 8 dargestellt, verteilt. Die Wegpunkte P und Q befinden sich direkt über den Wegpunkten K und L im Stockwerk darunter. Das zusätzliche Stockwerk hat hier also keine Auswirkung auf die Funkabdeckung. Mit einer maximal erzielten Reichweite von über 30 Metern und mehreren Hindernissen ist die Reichweite sehr gut. Die zusätzliche Abschirmung der massiven Treppe ist hier anscheinend der limitierende Faktor. Die Funkabdeckung von LoRa ist an allen Wegpunkten in diesem Stockwerk gegeben.

Der Grundriss des dritten Stocks und die dazugehörigen Wegpunkte sind in Abbildung 9 dargestellt. Das mittlere Treppenhaus reicht nur vom Erdgeschoss bis in den zweiten Stock, wodurch sich das Gebäude nach oben hin weiter verjüngt. Wegpunkt T befindet sich auf der gleichen Höhe wie die Punkte C, J und N nur nach hinten in den Gang versetzt. Die Messergebnisse für diese Etage sind in Abbildung 9 zu sehen. An Wegpunkt S lässt sich sowohl im 2,4 und Sub-Gigahertz noch eine Funkverbindung zum Gateway herstellen. Der weiter entfernte Wegpunkt T ist nur noch über das Sub-Gigahertzband erreichbar. LoRa konnte auch im obersten Stockwerk im linken Treppenhaus mit Spreizfaktor 7 noch eine Funkverbindung herstellen.

Tabelle 5: Verteilung der Wegpunkte im ersten Stock mit Punkt G als Gateway im Erdgeschoss und Auswertung der Funkabdeckung an den Wegpunkten

Wegpunkt	**I**	**J**	**K**	**L**
Entfernung Luftlinie [m]	8,6	19,8	28,4	33,1
Anzahl der penetrierten Wände	1	3	4	4
Anzahl der penetrierten Stockwerke	1	1	1	1
433 MHz				
868 MHz				
2,4 GHz				
LoRa SF 7				
LoRa SF 12				

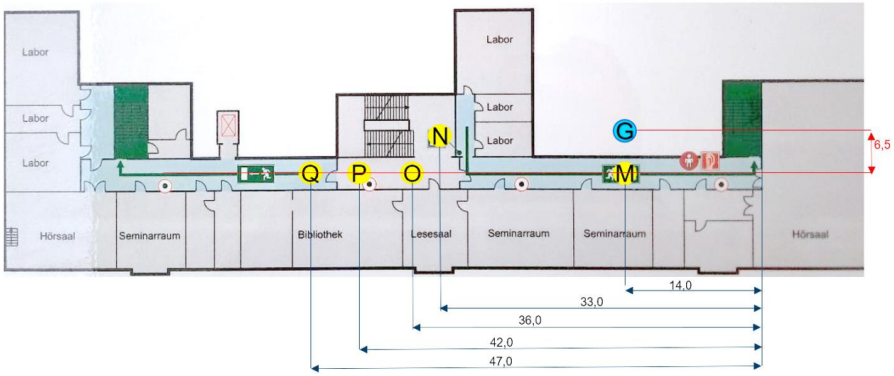


Abbildung 8: Verteilung der Wegpunkte im zweiten Stock mit Punkt G als Gateway im Erdgeschoss und Auswertung der Funkabdeckung an den Wegpunkten

3.3 Multihop

Durch die Meshfähigkeit von Multihop fähigen Protokollen können Telegramme über üblicherweise bis zu drei Punkte im Netzwerk weitergereicht werden, wodurch sich die Abdeckung eines Multihop-Netzwerks innerhalb eines Gebäudes erhöht. Durch die Platzierung eines Knoten am Wegpunkt J im Treppenhaus des zweiten Stockwerks ist es möglich auch, im Gang des gesamten dritten Stockwerks eine Funkverbindung zum Gateway aufzubauen. Dabei springen (hopping) die Telegramme von der bewegten Testknoten im dritten Stock über den Knoten im zweiten Stockwerk zum Gateway. Mithilfe von einem Hop ist es möglich, die Abdeckung innerhalb massiv zu erhöhen.

3.4 Fazit

Die höhere Reichweite innerhalb des Gebäudes durch Nutzung des 868 MHz Bandes fällt jedoch geringer aus als erwartet. Der Gewinn an Reichweite bewegt sich innerhalb von wenigen Metern innerhalb des Gebäudes. Es ist jedoch anzumerken, dass an jedem Wegpunkt aufgrund von unterschiedlichen Hindernissen auch unterschiedliche Bedingungen herrschen. Mit dem Funkmodul war es möglich, in etwa die Hälfte des Gebäudes abzudecken. Aufgrund der Mesh- und Multihop-Fähigkeiten können leicht ganze Gebäude erschlossen werden. Mit der Platzierung nur eines weiteren Knoten war es bereits möglich, das komplette zugängliche Referenzgebäude abzudecken.

Tabelle 6: Verteilung der Wegpunkte im zweiten Stock mit Punkt G als Gateway im Erdgeschoss und Auswertung der Funkabdeckung an den Wegpunkten

Wegpunkt	**M**	**N**	**O**	**P**	**Q**
Entfernung Luftlinie [m]	13,1	22,2	25,6	30,9	35,5
Anzahl der penetrierten Wände	1	4	4	5	5
Anzahl der penetrierten Stockwerke	2	2	2	2	2
433 MHz					
868 MHz					
2,4 GHz					
LoRa SF 7					
LoRa SF 12					

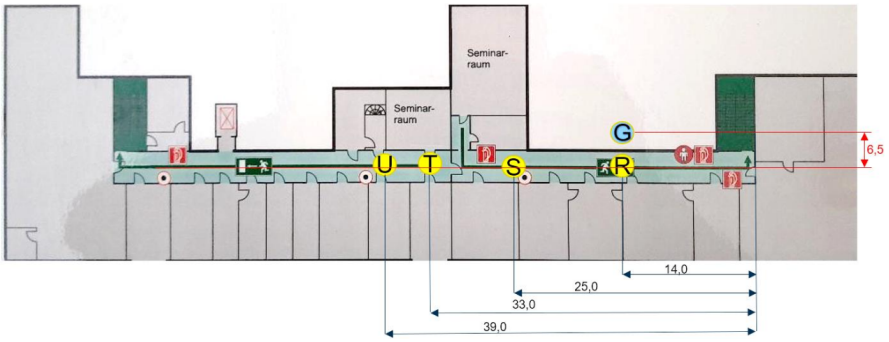


Abbildung 9: Verteilung der Wegpunkte im dritten Stock mit Punkt G als Gateway im Erdgeschoss und Auswertung der Funkabdeckung an den Wegpunkten.

Bei einem engmaschigen Netzwerk ist die Reichweite der einzelnen Nodes nicht der primäre Faktor, da mithilfe von Multihop die effektive Reichweite gesteigert werden kann. Die erzielten Reichweiten zwischen 26 und 41 m sind somit mehr als ausreichend für die Indoor-Anwendung in der Gebäudetechnik.

4 Outdoor-Reichweiten Test

4.1 Messaufbau

4.1.1 Testplatinen

Für die Untersuchungen der Funkausbreitung wurden auf zwei grundverschiedene verschiedene Funkmodule zurückgegriffen. Die klassische Modulationsart 2FSK (frequency-shift keying) wird durch die Funkmodule SPIRIT1 abgedeckt [STM16]. Dieses wird durch den Microcontroller MSP430 angesteuert und befindet sich auf einer Entwicklungsplatine der HTWK Leipzig. Die Modulation LoRa wird durch das Funkmodul RFM95C abgedeckt [Hop06]. Die Ansteuerung dieses Moduls findet über den Microcontroller ATSAMD21 statt. Mikrocontroller und Funkmodul befinden sich auf dem Entwicklungsboard Feather M0 der Firma Adafruit. In der Abbildung 10 sind beide Funkmodule grafisch dargestellt. In der Tabelle 8 sind die Daten der beiden Testplatinen zusammengefasst.

Tabelle 7: Verteilung der Wegpunkte im dritten Stock mit Punkt G als Gateway im Erdgeschoss und Auswertung der Funkabdeckung an den Wegpunkten

Wegpunkt	**R**	**S**	**T**	**U**
Entfernung Luftlinie [m]	18,3	21,3	26,4	31,0
Anzahl der penetrierten Wände	1	2	3	4
Anzahl der penetrierten Stockwerke	3	3	3	3
433 MHz				
868 MHz				
2,4 GHz				
LoRa SF 7				
LoRa SF 12				

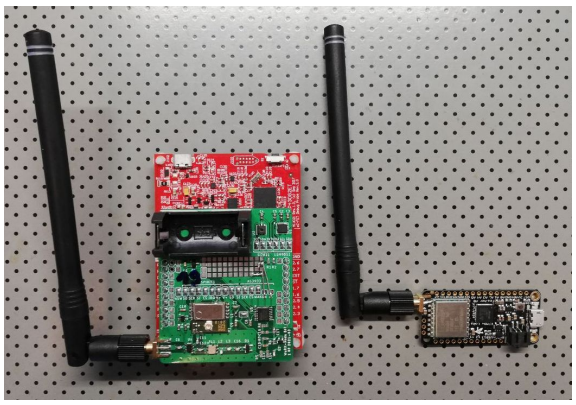


Abbildung 10: Foto der beiden verwendeten Funkmodule. SPIRIT1 mit MSP430-Entwicklungsboard links, RFM95C mit Feather M0-Entwicklunsboard rechts.

Es ist zu erkennen, dass beide Mikrocontroller eine deutlich unterschiedliche Leistung aufweisen. Jedoch hat dies keinen Effekt auf die Ergebnisse der Funkmessungen. Beide Mikrocontroller sind einwandfrei in der Lage die Funkmodule anzusteuern und Datenpakete zu senden und zu empfangen. Würde man die Testplatinen als Sensorknoten einsetzen, so ist abzuwägen, welcher der beiden Mikrocontroller zu verwenden ist. Der MSP430 hat nur eine sehr geringe Rechenleistung und sehr geringen Speicherplatz, kann diese Defizite jedoch durch einen deutlich geringeren Energiebedarf wegmachen.

4.1.2 Planen der Versuchsdurchführung

Für die Messungen der Funkreichweiten im Umfeld der Stadt Zeitz wurden insgesamt 12 Messstationen ausgewählt, welche die Grundlage eines zukünftigen Funknetzes bilden können. Es soll untersucht werden, in welcher Entfernung und in welcher Qualität in der Umgebung zu diesen Stationen eine Funkverbindung aufgebaut werden kann. Alle zwölf Stationen wurden mit jeweils einen der beiden Testplatinen ausgestattet. Durch ein weiteres Paar der Testplatinen ist es nun möglich alle Messstationen anzusprechen und damit die Übertragungsqualität zu analysieren.

Ursprünglich sollten die Reichweiten in mehrere Frequenzbänder untersucht werden. Jedoch stellte der Chipmangel auf Grund der COVID-19-Pandemie ein großes Problem dar. Für das 868 MHz-Band stehen ausreichend Funkmodule für den SPIRIT1 und RFM95C zur Verfügung. Jedoch werden für das 433 MHz-Band spezielle Anpassnetzwerke benötigt, welche für beide Funk-

Tabelle 8: Technische Daten der beiden Testplatinen

Eigenschaft	**2FSK**	**LoRa**
Funktransceiver	SPIRIT1	RFM95C
Frequenzbereich	150 MHz bis 956 MHz	137 MHz bis 1020 MHz
Modulationsarten	(G)FSK, (G)MSK, OOK, ASK	(G)FSK, (G)MSK, LoRa, OOK
max. Ausgangsleistung	16 dBm	20 dBm
max. Empfindlichkeit	–123 dBm	–148 dBm
max. Datenrate	500 kbit/s	300 kbit/s
Microcontroller	MSP430G2553	ATSAMD21G18
RAM-Speicher	512 Byte	32 KByte
Flash-Speicher	16 KByte	256 KByte
Taktrate	8 MHz	48 MHz
Antenne	ANT-868-CW-HWR-SMA	
Mittenfrequenz	868 MHz	
Bandbreite	30 MHz	
Impedanz	50 Ω	
Antennengewinn	–2,3 dBi	

module nicht lieferbar sind. Eine Verwendung eines Funkmoduls im falschen Frequenzband führt zu einer erheblichen Dämpfung im Hochfrequenzpfad, sodass die Reichweite drastisch reduziert wird. Die Funkreichweite im 433 MHz-Band konnte daher nicht untersucht werden.

Um eine möglichst geringe Anzahl von Datenpaketen zwischen den Messstationen und dem Messpunkt zu versenden, wird eine bidirektionale Übertragung verwendet. Die Funkmodule am Messpunkt sprechen dabei immer eine Messstation an und warten anschließend auf eine Antwort. Durch diese Rücknachricht kann der received signal strength indicator (RSSI)-Wert am Messpunkt ausgelesen werden und abgespeichert werden.

4.1.3 Einstellungen der Funkkommunikation

Für die Funkkommunikation steht eine Vielzahl von Optionen zur Verfügung. So können für beiden Funkprotokolle die Datenrate, Modulationsart und Aufbau der Funknachricht konfiguriert werden. Für die Messung der Reichweite wurde nach besten Wissen Werte für eine zuverlässige, aber auch realistische Datenübertragung ausgewählt. So kann z. B. die Empfindlichkeit des LoRa-Empfängers deutlich erhöht werden, wenn der SF angepasst wird. Jedoch wird die Datenrate dadurch deutlich reduziert, sodass für wenige Bytes eine Zeitdauer von über einer Sekunde benötigt wird. In der Tabelle 9 werden die Einstellungen der Funkkommunikation für beide Protokolle zusammengefasst.

Die Sendeleistung des SPIRIT1-Funkmoduls ist durch seinen Aufbau auf 11 dBm begrenzt. Der Leistungsunterschied zwischen SPIRIT1 und RFM95 von 3 dB ist bei allen Messungen zu beachten. Die Binärdaten werden bei 2FSK dargestellt durch zwei verschiedene Frequenzen, die jeweils um 20 kHz vom Träger abweichen. Größere Werte für f_{dev} führen zu einer geringeren Fehlerrate, erhöhen jedoch die benötigte Bandbreite des Signals deutlich. Durch die Einstellung der Frequenzabweichung bei 2FSK und dem SF bei LoRa wurde eine annähernd gleiche Bandbreite in beiden Modulationsarten erzielt. Durch eine forward error correction (FEC) können Übertragungsfehler durch Rauschen oder Interferenzen zuverlässig entfernt werden. Dadurch erhöht

Tabelle 9: Einstellung der Funkkommunikation

Eigenschaft	**2FSK**	**LoRa**
Sendeleistung	11 dBm	14 dBm
Spreizung	f_{dev} [1] = 20 kHz	SF=7
Bandbreite	100 kHz	125 kHz
FEC[1]	deaktiviert	4/5
Resultierende Datenrate	38,4 kbit/s	5,4 kbit/s
Empfindlichkeit	–105 dBm	–125 dBm
Preamble	8 Byte	12 Byte
Sync Word	4 Byte	—
Header	1 Byte	8 Byte
Daten	12 Byte	20 Byte
CRC	2 Byte	2 Byte
Paketlänge	27 Byte	42 Byte
Paketdauer	5,63 ms	62,2 ms

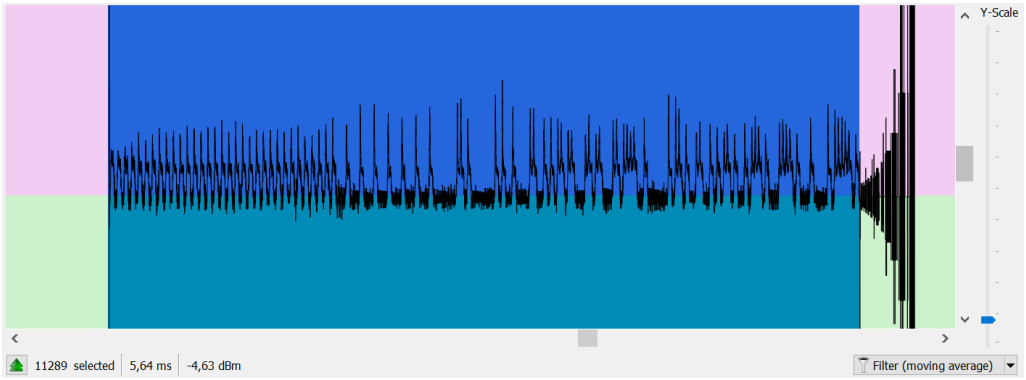
[1] Abweichung von der Trägerfrequenz
[2] forward error correction

sich die Zuverlässigkeit des Funkempfängers, jedoch nicht die Empfindlichkeit. Außerdem ist zu beachten, dass sich die Nachrichtenlänge bei aktivierter FEC erhöht. Bei einer FEC-Konfiguration von 4/5 müssen nun 5 Byte anstelle von 4 Byte versendet werden. Beim SPIRIT1 bleibt die FEC deaktiviert. Im Vergleich zwischen den beiden Modulationsarten ist die Datenrate beim LoRa um circa Faktor 7 reduziert. Dies führt zu einem deutlichen Unterschied in der Paketdauer und hat u. A. eine höhere Latenz und einen höheren Strombedarf im Sender zur Folge. Die angegebenen Empfindlichkeiten von –105 dBm für 2FSK und –125 dBm für LoRa sind dem entsprechenden Datenblatt entnommen unter der Beachtung der gegebenen Einstellungen. Die Datenpakete sind entsprechend der unterschiedlichen Protokolle auch unterschiedlich aufgebaut. Grundelemente eines Paketes wie Preamble, Header, Daten und CRC bleiben jedoch erhalten. Für das LoRa-Protokoll ergibt sich für den Testaufbau ein etwas größeres Datenpaket. Zusammen mit der reduzierten Datenrate ergibt sich ein Unterschied in der Paketdauer zwischen 2FSK und LoRa ein Unterschied von über Faktor 10.

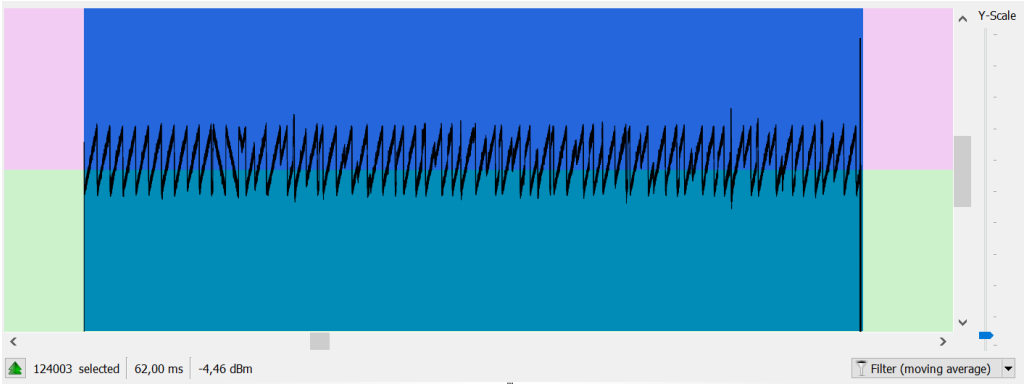
Zum Überprüfen der Konfiguration und Berechnungen der Paketlänge wurden beide Datenpakete mit dem software-defined radio (SDR) HackRF aufgenommen und mit der Software Universal Radio Hacker[1] ausgewertet. Abbildung 11 zeigt diese Pakete indem das demodulierte Signal im Verlauf der Zeit dargestellt wird.

In Abbildung 11a ist das 2FSK-modulierte Datenpaket zu sehen. Der entsprechende Bitstream wird durch ein Rechtecksignal dargestellt. Eine binär '1' ist dabei ein Ausschlag nach oben ($f_c + f_{\text{dev}}$). Ein Ausschlag nach unten ($f_c - f_{\text{dev}}$) stellt eine binär '0' dar. In Abbildung 11b sind die Chirps des LoRa-Paketes dargestellt. Aufwärts- bzw. Abwärtschirps werden verwendet um die Daten zu kodieren. In unteren Teil der beiden Abbildungen sind die gemessenen Paketdauern zu sehen. Diese stimmen sehr gut mit den berechneten Werten überein.

[1] siehe `https://github.com/jopohl/urh`



(a) 2FSK



(b) LoRa

Abbildung 11: Frequenzdemodulierte Signale der Testpakete beider Funkprotokolle

4.2 Auswahl der Messstationen und Messpunkte

4.2.1 Messstationen

Insgesamt 12 Messstationen in der Stadt Zeitz und in einigen umliegenden Gemeinden wurden verteilt. Die Auswahl der Positionen orientieren sich an den Aufstellorten von Gasanlagen und Fernwärmeanlagen. Es wurde versucht, eine gute Abdeckung der Stadt sicherzustellen. Es wurden auch unterschiedlichste Aufstellvarianten ausprobiert, um den Einfluss der Parameter relativen Einbauhöhe zum Boden, der absoluten Einbauhöhe zum Normalhöhennull und Innen- bzw. Außenantenne zu validieren. Es wurden stark bebaute Gebiete und auch Areale mit mehr Grünflächen ausgewählt. Des Weiteren wurde beispielhaft in zwei Gemeinden Daten aufgenommen, um sie auf andere umliegende Gemeinden zu interpolieren. Die Höhenkarte der Stadt Zeitz, siehe Abbildung 13 spielt ebenfalls eine Rolle die Messstationen passend zu platzieren.

Jede Messstation verfügt über zwei Sende und Empfangseinheiten. Sie repräsentieren die zwei konkurrierenden Kommunikationsarten. Jede Messstation ist immer empfangsbereit. Sobald ein für sie adressiertes Telegramm empfangen wird, sendet es eine Antwort, die wir protokolliert haben. Tabelle 10 zeigt die Bezeichnung der Stationen und die exakte GPS-Position. Alle Stationen sind auf der Karte in Abbildung 12 eingezeichnet.

Tabelle 10: Daten der verwendeten Messstationen

Nr.	Länge	Breite	Beschreibung
A	51,03200	12,15618	Druckerhöheranlage Bergsiedlung
B	51,06880	12,12263	Erdhochbehälter Weißenfelser Straße
C	51,04903	12,13488	Rathausturm
D	51,07520	12,15758	Zangenberg
E	51,06085	12,13209	GWG Leipziger Straße
F	51,05398	12,10797	Grana
G	51,05226	12,12030	Albrechtstraße
H	51,05085	12,14793	Schützenplatz
I	51,03631	12,15879	Redinet
J	51,04092	12,13439	Schwanenteich
K	51,05720	12,17922	Tröglitz
L	51,08164	12,10826	Theißen

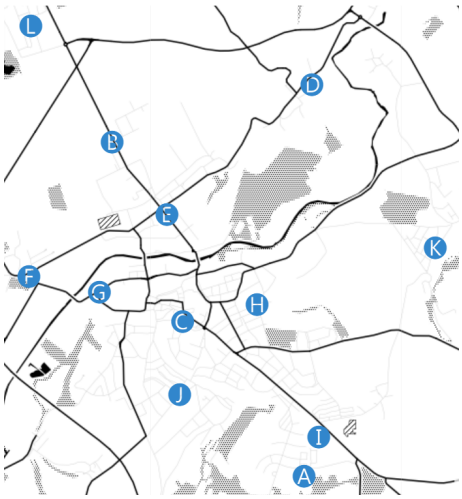


Abbildung 12: Messstationen der Studie auf der Karte

4.2.2 Messpunkte

Das Gegenstück zu den Messstationen bilden die Messpunkte. An diesen Punkten wurden folgende Informationen gesammelt:

- Uhrzeit
- GPS-Daten
- Empfangsqualität LoRa
- Empfangsqualität 2FSK
- Auslastung 433 MHz Band
- Auslastung 868 MHz Band
- Auslastung 2,4 GHz Band

Die Messungen starteten immer in der Nähe der Messstationen. Je nachdem, wie die Messungen ausfielen, wurden neue Messpunkte nachfolgenden Kriterien ausgesucht.

- Abgleich theoretische Sendereichweite und urbaner Praxis
- RSSI wert LoRa und 2FSK

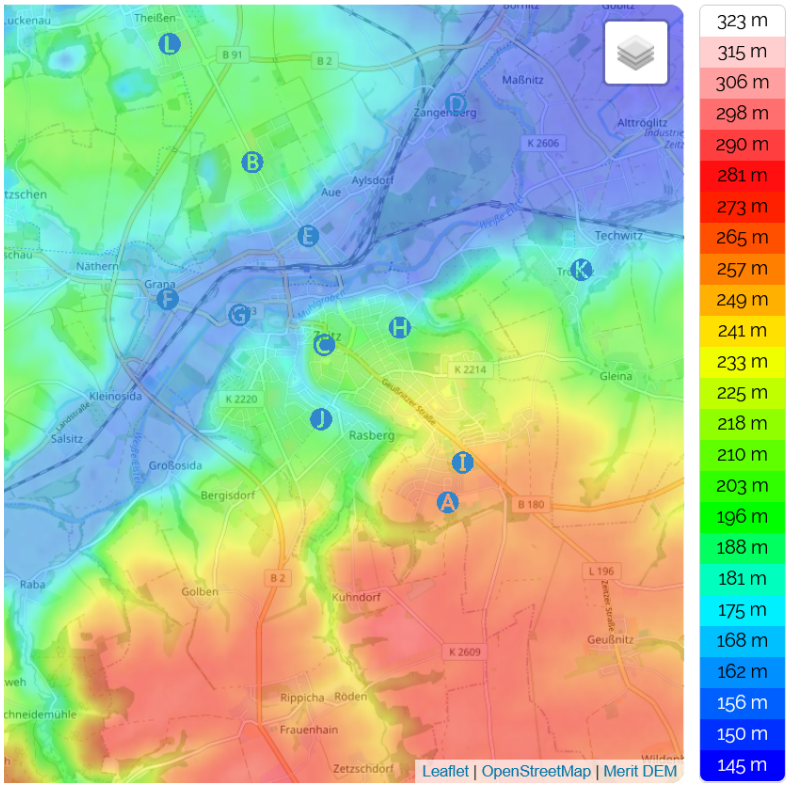


Abbildung 13: Höhenkarte mit Messpunkten

- Auffälligkeiten in der Auslastung im 433 MHz, 868 MHz oder 2,4 GHz Band

An den entsprechenden Messpunkten wird mit beiden Testplatinen versucht eine Funkverbindung zu allen 12 Messstationen auszubauen. Die genauen GPS-Koordinaten der Messpunkte sind der Datentabelle auf Seite 40 zu entnehmen.

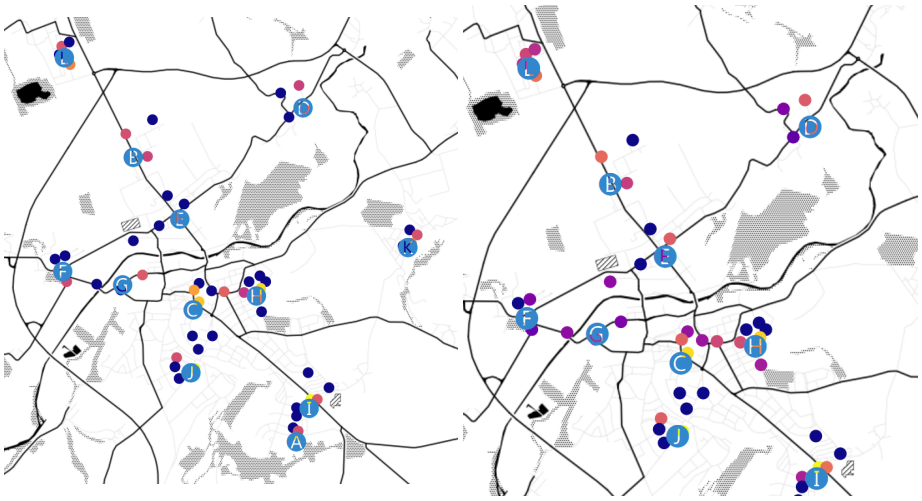
4.3 Ergebnisse und Auswertung

4.3.1 Erfolgreiche Funkverbindungen

Die Tabelle 14 zeigt allen erfolgreichen Funkverbindungen des 2FSK-Protokolls und Tabelle 15 alle erfolgreichen Funkverbindungen des LoRa-Protokolls.

Übersichtlicher lassen sich die Daten auf der Karte in Abbildung 14 darstellen. Hier wird jeweils die beste Funkverbindung als farbiger Punkt an der Position der Messstelle dargestellt. Dunkelblaue Punkte stellen dabei dar, dass keine Funkverbindung an diesem Punkt hergestellt werden konnte. Gelbe Punkte stellen Datenverbindungen mit einem sehr starken Signal dar. Dafür sind typische RSSI-Werte über –90 dBm.

Wie unterschiedlich stark die Ausbreitung eines LoRa-Signals sein kann, zeigen die beiden Bilder in Abbildung 15. Es spielen eine Reihe von Faktoren eine Rolle. Es stellt sich heraus, dass der Knoten im Rathaus bei Weitem die besten Ergebnisse liefert. Auch kann man eine klare Korrelation zwischen dem Höhenprofil der Stadt und dem RSSI-Verlauf der Stationen erkennen. Die Funkwellen unterliegen Brechung, Reflexion und Beugung. Sie sind deshalb sehr von Ihrer Umgebung abhängig wie in 3 zu sehen ist. Was für LoRa gilt, gilt auch für FSK. Der einzige Unter-



(a) 2FSK (b) LoRa

Abbildung 14: Farbige Darstellung der RSSI-Werte auf der Karte

schied ist, die Empfindlichkeit, die bei LoRa deutlich höher ist. Auf weitere Parameter wird in 4.3.2 eingegangen.

(a) Rathaus (C) (b) Schützenplatz (H)

Abbildung 15: Funkausbreitung des LoRa-Signals ausgehend von zwei verschiedenen Stationen

In der Abbildung 16 wurden die gemessenen RSSI-Werte der beiden Funkprotokolle der Übertragungsdistanz gegenübergestellt.

Aus den Tabellen ist zu entnehmen, dass der praktisch erreichte Grenzwert bei FSK bei –108 dBm liegt und damit besser ist als der vom Hersteller angegebene Wert. Dies lässt sich jedoch auf die vom FTZ optimierte Hardware zurückführen. Die FSK und LoRa RSSI-Werte an denselben Messpunkt legen immer nahe, dass die FSK Technik ausgereifter ist als die von LoRa, denn sie zeigt durchgehend bessere Werte. Dies könnte an dem RX Frontend von LoRa Hardware liegen, welche für 915 Mhz und 868 Mhz ausgelegt sind. Sie können damit nicht optimal ausgelegt sein. Bei Line of Sight konnten maximal Werte von 1,9 km durch LoRa und 900 m durch FSK erreicht werden.

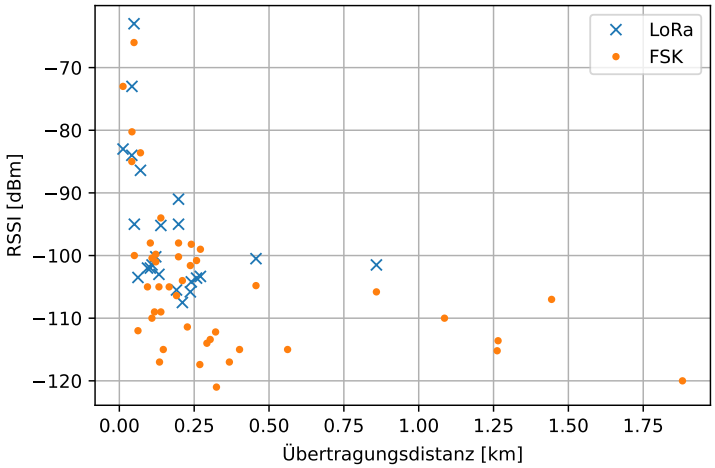


Abbildung 16: Abhängigkeit der RSSI-Werte von der Übertragungsdistanz

4.3.2 Verbesserungspotenzial

Höhe des Aufstellortes

Ein wichtiger Punkt für einen optimalen Empfang der Messstationen ist die Höhe des Installationsortes und vor allem die Höhe der Antenne. Die Station muss so hoch wie möglich installiert werden, um einen besseren Empfang zu gewährleisten. Dies ließ sich leider im Rahmen dieser Studie nicht immer Einhalten. Die folgenden Abbildungen zeigen den RSSI-Wert des Signals in Abhängigkeit von der Entfernung zum Endpunkt und der Höhe der Station bei 4m, 8m, 12m und 30m. Es werden zwei Anwendungsfälle vorgestellt: einer für städtisches Gebiet und einer für ein ländliches Gebiet.[Gil16]

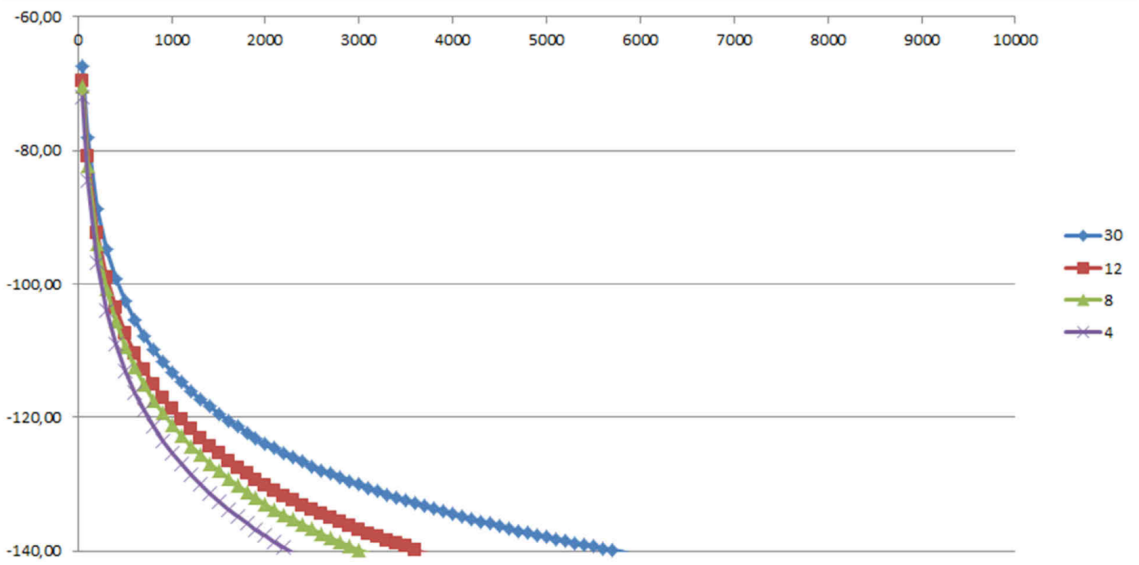


Abbildung 17: Städtisches Gebiet mit RSSI in dBm (links), Abstand zum Aufstellort im m (oben) und Aufstellhöhe (rechts) [Gil16]

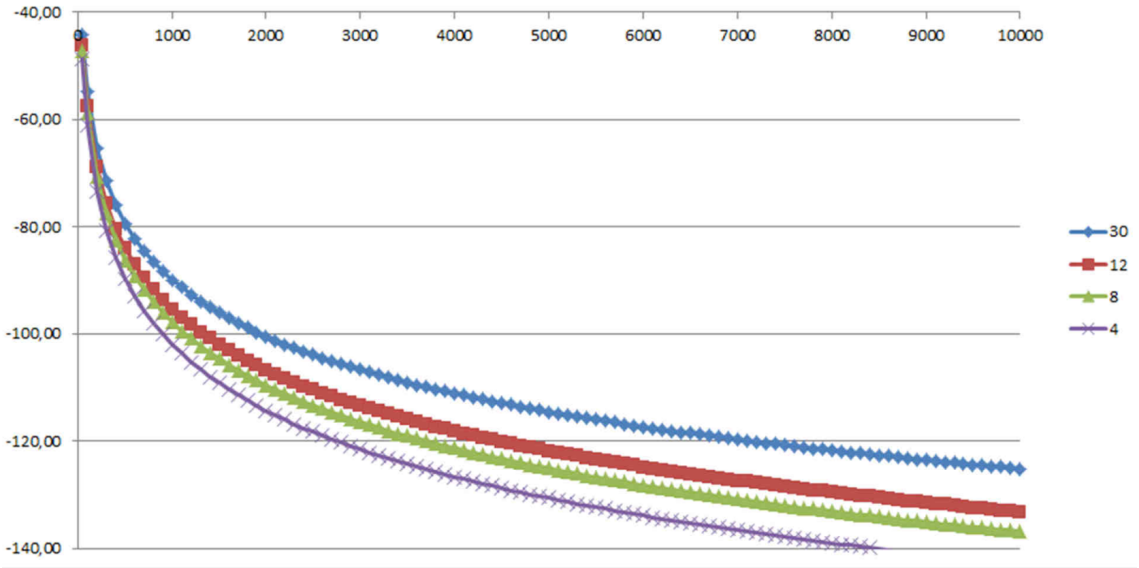


Abbildung 18: Ländliches Gebiet mit RSSI in dBm (links), Abstand zum Aufstellort im m (oben) und Aufstellhöhe (rechts) [Gil16]

Fresnelzone

Funkwellen breiten sich im Allgemeinen in einer geraden Linie vom Sender zum Empfänger aus. Dies gilt natürlich nur, wenn keine Hindernisse zwischen dem Sender und dem Empfänger sind. In den meisten Fällen befinden sich jedoch einige Hindernisse zwischen dem Sender und dem Empfänger. Dann stoßen die Funkwellen auf die Hindernisse und werden reflektiert oder gebeugt. Diese reflektierten oder gebeugten Wellen können, wenn sie am Empfänger ankommen, eine Phasenauslöschung mit den normalen Signalen verursachen, wodurch die empfangene Leistung verringert wird (Fading). Der Fading-Effekt hängt von der Entfernung zwischen dem Empfänger und dem Sender, der Beschaffenheit der Hindernisse und der der damit verbundenen Phasenverschiebung ab. [Gil16]

Um die Fading-Effekte zu minimieren, müssen Hindernisse in einem „Fresnel-Ellipsoid“ vermieden werden. Die Fresnelzone ist ein theoretisches Ellipsoid, das sich zwischen dem Sender und dem Empfänger befindet. Eine globale Regel besagt, dass 60% des Fresnel-Ellipsoids frei von Hindernissen sein müssen. Falls sich Gebäude auf der Sendestrecke befinden, muss die Antennenhöhe angepasst werden, um sicherzustellen, dass sich das Gebäude nicht mehr als 40% einnehmen. [Gil16]

LoRa und 2FSK

LoRa hat durchgehend eine bessere Durchdringung als FSK. Jedoch wird sich dieser Vorteil teuer erkauft. Bei LoRa wird die Datenrate drastisch gesenkt und auch die Sendezeit deutlich erhöht. Das bedeutet, dass weniger Teilnehmer pro Netz teilnehmen können und auch, dass weniger Telegramme pro Knotenpunkt gesendet werden können. Die Reichweite der Messung kann nochmals deutlich erhöht werden, wenn man den Spreadingfaktor von 7 auf 12 erhöht, jedoch werden die angesprochenen Problematiken größer. Auf Grundlage der gemessenen Daten ist es ratsam, ein stadtübergreifendes LoRa-Netz aufzubauen, welches deutliche Redundanzen benötigt. Des Weiteren wird für informationsintensive Anwendungen, die in stark urbanen Bereichen benötigt werden, ein auf Multihop Netzwerk mit höherer Datenrate empfohlen. Dies benötigt zwar

mehr Aufwand beim Aufbau, jedoch ist die Datenrate deutlich erhöht und die Limitierung der Telegramme nahezu aufgehoben.

5 Untersuchungen zur Ausnutzung der Frequenzbänder

5.1 Messaufbau

In diesem Abschnitt soll die Auslastung der Frequenzbänder untersucht werden. Als Frequenzbänder wurden das 433 MHz-, 868 MHz- und 2,45 GHz-Band ausgewählt, da als frei-verwendbare ISM- bzw. SRD-Frequenzbänder zur Verfügung stehen.

Um jeweils ein Frequenzband auf einmal aufnehmen zu können, benötigt es einen sehr breitbandigen Empfänger. Hierfür empfiehlt sich der Einsatz eines software-defined radio. Für die Messungen wurden insgesamt drei HackRF One verwendet, wobei jedes SDR genau ein Frequenzband aufnimmt. Der HackRF One ist auf Grund seiner Eigenschaften sehr gut für diese Aufnahmen geeignet. Es werden Trägerfrequenzen von 1 MHz bis 6 GHz unterstützt. Die Bandbreite des HackRF One wird vor allem von der Abtastrate bestimmt. Diese kann zwischen 2 MHz und 20 MHz konfiguriert werden. An dieser Stelle ist anzumerken, dass es nicht möglich ist das gesamte 2,45 GHz-Band zu untersuchen, da die Bandbreite auf 20 MHz begrenzt ist. Für eine vollständige Aufnahme des 2,45 GHz-Bandes sind Datenmenge bis 800 MByte pro Sekunde zu erwarten [Gre].

Um die Ausnutzung der Frequenzbänder im Detail analysieren zu können, werden von den Aufnahmen des HackRF One sogenannte Wasserfall-Diagramme erstellt. Ein Wasserfall-Diagramm stellt die Frequenzbestandteile eines Signals in Abhängigkeit der Zeit dar. Wasserfall-Darstellungen aus dem Bereich der Amateurfunktechnik sind auf Signale optimiert, die mehrere Sekunden andauern. Die Wasserfall-Darstellungen dieser Studie wurden so konfiguriert, dass auch sehr kurze Funkpakete dargestellt werden können. Tabelle 11 zeigt die Konfiguration der Wasserfall-Darstellungen für die Frequenzbereichsauslastung dieser Studie dar.

Tabelle 11: Konfiguration der Wasserfall-Darstellungen

Band	**433 MHz**	**868 MHz**	**2,45 GHz**
Mittenfrequenz [MHz]	434,0	866,5	2450
Bandbreite [MHz]	2	10	20
Aufnahmedauer [s]	10	10	5
Zeitschritt [ms]	2,5	2,5	1

Die Mittenfrequenz- und Bandbreite-Einstellungen wurden an die tatsächlichen Frequenzbereiche siehe Tabelle 1 angelehnt. Beim 2,45 GHz-Bandes wurde aufgrund der hohe Bandbreite die Aufnahmedauer auf 5 s reduziert. Eine Schrittweite von 2,5 ms wurde bei 433 MHz und 868 MHz gewählt. Da in diesen Frequenzbändern nur geringe Datenraten zulässig sind, sollten alle Pakete des Frequenzbereiches detektiert werden können. Im 2,45 GHz-Band sind die Datenraten deutlich höher und Paketdauern deutlich kürzer. Der Zeitschritt wurde daher auf 1 ms reduziert.

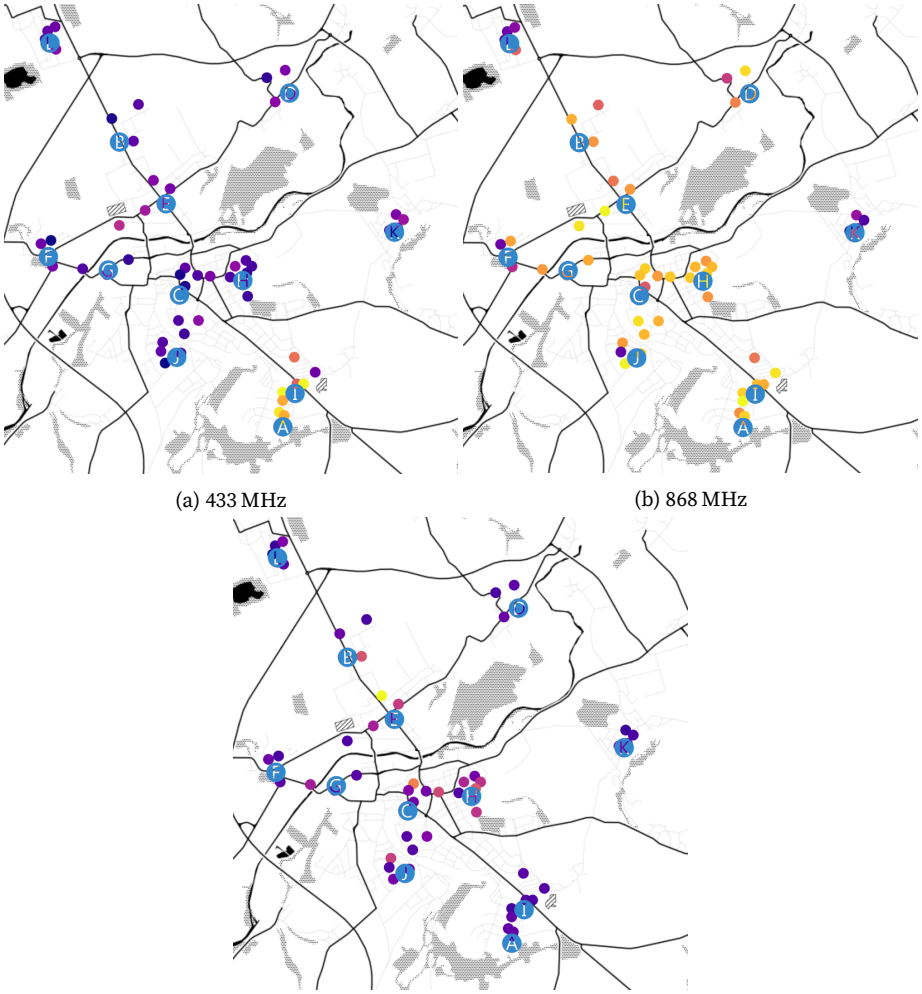
5.2 Ergebnisse und Auswertung

Ausschnitte der aufgenommenen Wasserfall-Darstellungen sind in der Abbildung 20 zu sehen. Schwarze Bereiche des Bildes stellen dabei Werte mit geringen Hochfrequenzaktivität und weiße

Bereiche mit hoher Aktivität dar. Entsprechend der Einstellung des Zeitschrittes wird erweitert sich das Bild um jeweils eine Pixelreihe nach unten. Die linke Bildhälfte stellt Frequenzbestandteile dar, die kleiner sind als die Mittenfrequenz. In der rechten Bildhälfte sind die höherfrequenten Anteile zu sehen.

Aus den Wasserfalldiagrammen wurde ein Mittelwert bestimmt. Dieser kann als Maß für die Ausnutzung des Funknetzes genutzt werden. Da weder HackRF One noch Auswertealgorithmus kalibriert werden kann, sind diese Werte als einheitenlos zu betrachten. Jedoch sind Vergleiche zwischen den Werten desselben Frequenzbandes ohne weiteres möglich. Die gemessenen Werte der Frequenzauslastung in den Bändern 433 MHz, 868 MHz und 2,45 GHz an den insgesamt 55 Messpunkten sind auf Seite 40 zu sehen.

Diese Daten wurde in Abbildung 19 graphisch dargestellt. Für die Darstellung wurde eine relative Skala verwendet. Blaue Messpunkte entsprechend dabei einer sehr geringen Auslastung und gelbe einer sehr starken Auslastung.



(a) 433 MHz

(b) 868 MHz

(c) 2,45 GHz

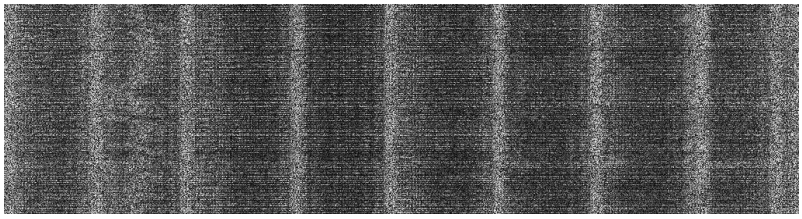
Abbildung 19: Farbige Darstellung der Ausnutzung der Frequenzbänder

Im 433 MHz-Band unterscheiden sich die Auslastung lokal sehr deutlich. Im Südosten der Stadt Zeitz wurden sehr starke Störungen gemessen. Ein Ausschnitt dieses Störsignals ist in Abbildung 20a zu sehen. Es handelt sich hierbei um ein kontinuierliches und breitbandiges Störsignal. Die meisten weiteren Messungen in diesem Band haben eine deutlich geringere Auslastung. An

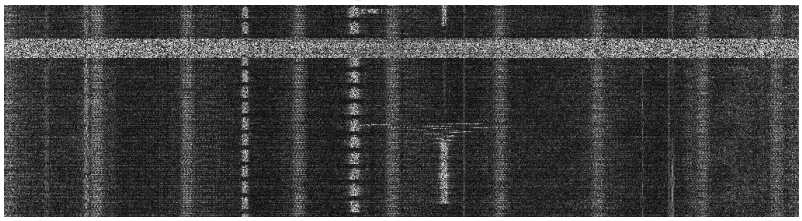
den meisten anderen Messpunkten sind im 433 MHz-Band nur temporäre Störungen z. B. durch Datenübertragungen zu erkennen. Abbildung 20b zeigt hierfür ein Beispiel. Im Vergleich zwischen Abbildung 20a und 20b ist zu sehen, dass die Störungen der ersten Aufnahme auch in der zweiten enthalten sind. Jedoch sind diese deutlich schwächer ausgeprägt. Dies kann durch einen größeren Abstand zum Störer erklärt werden, jedoch ist auch eine zeitliche Korrelation nicht auszuschließen. Zwischen den Messungen liegt eine Zeitdifferenz von circa 3 h.

In den Messungen des 868 MHz-Bandes sind deutliche Abweichungen zwischen den stark bewohnten und den Randgebieten der Stadt zu erkennen. Die Belastung des 868 MHz-Bandes nimmt deutlich im Zentrum der Stadt Zeitz zu. Ein Ausschnitt einer stark gestörten Aufnahme ist in Abbildung 20c zu sehen. Diese ist vor allem gekennzeichnet durch breitbandige, sowie langandauernde Störungen. Abbildung 20d zeigt eine Aufnahme mit geringeren Störungen. Lediglich ist ein kurzes Datenpaket zu erkennen.

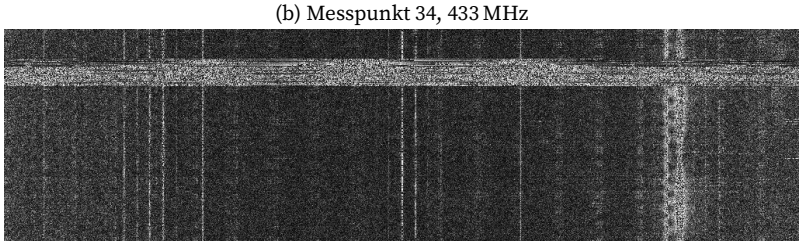
Im 2,45 GHz-Band ist ein ähnlicher Zusammenhang zwischen Stadtzentrum und Bandauslastung. Jedoch sind gerade im Stadtzentrum einige Aufnahmen mit einer starken Auslastung entstanden. Im 2,45 GHz-Band sind Sender mit höheren Leistungen zugelassen. Zusätzlich nimmt die Empfangsleistung auf Grund der Friis-Übertragungsgleichung und der geringeren Wellenlänge deutlich stärker mit der Distanz ab. Dadurch kann es zu solch extremen Aufnahmen kommen, wenn die Aufnahme in der näheren Umgebung eines 2,45 GHz-Senders entstanden ist. Abbildung 20e zeigt eine Aufnahme mit sehr geringer Auslastung. Insgesamt vier Datenpakete sind zu erkennen. Es ist zu erkennen, dass die Datenpakete im 2,45 GHz-Band deutlich breitbandiger, aber kürzer andauern. Abbildung 20f zeigt eine Aufnahme mit starker Auslastung. Hier sind viele Datenpakete mit großer Empfangsleistung zu erkennen.



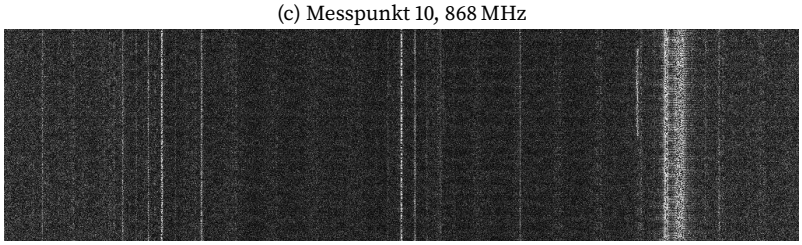
(a) Messpunkt 13, 433 MHz



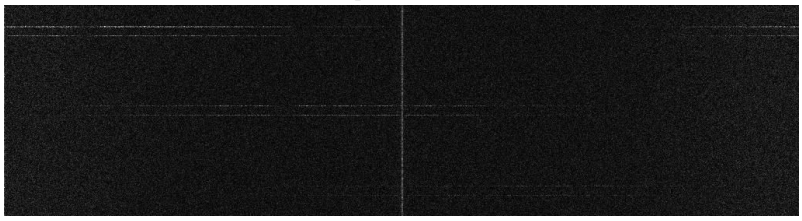
(b) Messpunkt 34, 433 MHz



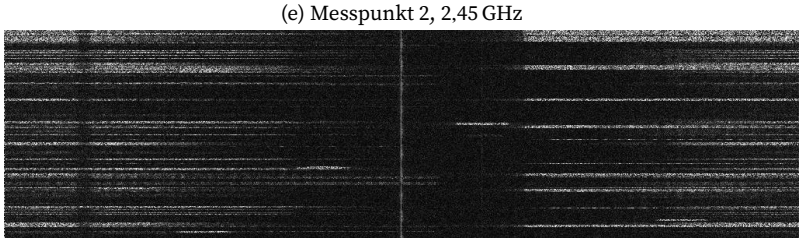
(c) Messpunkt 10, 868 MHz



(d) Messpunkt 41, 868 MHz



(e) Messpunkt 2, 2,45 GHz



(f) Messpunkt 38, 2,45 GHz

Abbildung 20: Ausschnitte aus den aufgenommenen Wasserfall-Darstellungen. Detaillierte Beschreibungen der einzelnen Störsignale sind dem Fließtext zu entnehmen.

Literatur

[Bun20] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. *Smart meter und Digitale Stromzähler*. 2020. URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/smart-meter-und-digitale-stromzaehler.html.

[Bun] Bundesnetzagentur. *Frequenzplan*. Online, 30.11.2021. URL: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Grundlagen/Frequenzplan/frequenzplan-node.html.

[Dut98] Harry J. R. Dutton. *Understanding Optical Communications*. Prentice Hall, 1998.

[Fri46] H. T. Friis. „A Note on a Simple Transmission Formula“. In: *Proceedings of the IRE* 34.5 (1946), S. 254–256. DOI: 10.1109/JRPROC.1946.234568.

[Gag+21] Giovanni Battista Gaggero u. a. „A Possible Smart Metering System Evolution for Rural and Remote Areas Employing Unmanned Aerial Vehicles and Internet of Things in Smart Grids“. In: *Sensors* 21.5 (2021), S. 1627.

[Gil16] Michel Gilbert. *Installation and Maintenance Manual LoRa IoT Station Wirnet Station*. 2016. URL: https://www.ime.de/shop/www.ime.de/produktdatenblaetter/A40668.pdf.

[Gre] Great Scott Gadgets. *HackRF One*. Online, 29.11.2021. URL: https://greatscottgadgets.com/hackrf/one/.

[Gre98] Walter Greulich. *Lexikon der Physik in Sechs Bänden*. Spektrum Akademischer Verl., 1998.

[Hof13] Michael H.W. Hoffmann. *Hochfrequenztechnik - Ein systemtheoretischer Zugang*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2013. ISBN: 978-3-642-59089-4.

[Hop06] Hope Microelectronic. *RFM95/96/97/98(W) - Low Power Long Range Transceiver Module*. 2006.

[KB06] Richard Hanebuth Klaus Beuth Stephan Breide. *Nachrichtentechnik*. Bd. 7. Vogel Business Media, 2006.

[LoR20] LoRa Alliance. *Why LoRaWAN is the Connecivity Platform for Smart City Applicatios*. 2020. URL: https://www.semtech.com/lora/resources/lora-white-papers.

[PKJ17] Hwa-Pyeong Park, Mina Kim und Jee-Hoon Jung. „Spread spectrum technique to reduce EMI emission for an LLC resonant converter using a hybrid modulation method“. In: *IEEE Transactions on Power Electronics* 33.5 (2017), S. 3717–3721.

[Uni] *revision of world urbanization prospects*. URL: https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html.

[Ros20] Alexander Rosenkranz. *Der Gaszähler: Bauarten und Funktionsweise*. 2020. URL: https://heizung.de/gasheizung/wissen/der-gaszaehler-bauarten-und-funktionsweise/.

[Sch15] Patrick Schnabel. *Kommunikationstechnik-Fibel Grundlagen der Kommunikationstechnik, Netze und Übertragungssysteme, Funktechnik und Mobilfunk, Breitbandtechnik, voice over IP*. Schnabel, 2015.

[STM16] STMicroelectronics NV. *SPIRIT1 - Low data rate, low power sub-1GHz transceiver*. Okt. 2016.

[VDE10] VDE. *VDE-Analyse Smart Energy 2020*. 2010. URL: https://www.vde.com/de/etg/publikationen/studien/etg-vde-studie-smart-energy2020.

[Ver] *Wechselstromzä,hler*. URL: https://www.verivox.de/strom/themen/wechselstromzaehler/.

[Wol] Christian Wolff. *Grundlagen der radartechnik*. URL: http://www.radartutorial.eu/01.basics/Freiraumd\"a,mpfung.de.html.

A Zusammenfassung Stand der Technik

Tabelle 12: Zusammenfassung des Stand der Technik

	Qundis	**Ista**	**Modularis**	**LineMetrics**	**Discovergy**	**EasyMeter**	**EMH metering**
Gaszähler		Funkmodul zum Nachrüsten		LoRa Funksensor	ja	nein	nein
Wasserzähler	ja	ja	ja	LoRa Funksensor	nein	nein	nein
Wärmezähler	ja	ja	ja	LoRa Funksensor	nein	nein	nein
Heizkostenverteiler	ja	ja	ja	LoRa Funksensor	nein	nein	nein
Rauchwarnmelder	ja	ja	ja	LoRa Funksensor	nein	nein	nein
Stromzähler	Funksensor zum Nachrüsten	Funkmodul zum Nachrüsten		LoRa Funksensor	ja	ja	ja
Schnittstellen	C- und T Mode, wM Bus	M-Bus	wM-Bus	LoRa	LNA, Mobilfunk oder RS-485	LoRa oder wM-Bus	
Gateway	ja	ja	ja	ja	nein	nein	ja
Kommunikation	Mobilfunk	Modem/PC	Mobilfunk	Mobilfunk			
Software	Q SAM	ista Webportal	M-Fair und Webportal	LineMetricsCloud	Discovergy Portal		

B Datentabelle

Tabelle 13: GPS-Koordinaten und Ergebnisse der Funkauslastung der Messpunkte

Nr.	Breite	Länge	433	868	2.4
0	51.03669	12.15878	63	55	23
1	51.03667	12.16014	83	54	22
2	51.03556	12.15578	83	57	22
3	51.03446	12.15584	74	59	23
4	51.03303	12.15516	81	52	23
5	51.03203	12.15601	79	52	23
6	51.03256	12.15620	74	57	23
7	51.04014	12.15818	65	50	23
8	51.03818	12.16255	43	58	23
9	51.04799	12.14861	37	52	29
10	51.04960	12.14797	40	58	27
11	51.05046	12.14499	39	56	22
12	51.05190	12.14611	48	55	28
13	51.05261	12.14836	40	52	24
14	51.05186	12.14947	38	55	29
15	51.05102	12.14846	36	56	33
16	51.05061	12.14088	45	56	31
17	51.05069	12.13830	39	53	24
18	51.05160	12.13572	41	57	36
19	51.05080	12.13476	33	56	25
20	51.04931	12.13578	34	47	24
21	51.04484	12.13852	47	54	25
22	51.04486	12.13446	39	58	23
23	51.04312	12.13554	37	55	23
24	51.04205	12.13118	40	53	30
25	51.04087	12.13087	42	36	22
26	51.03938	12.13168	32	59	25
27	51.04060	12.13487	41	56	24
28	51.05082	12.11965	49	52	23
29	51.05267	12.12408	36	54	23
30	51.05157	12.11468	39	53	27
31	51.05184	12.10843	45	43	23
32	51.05481	12.10610	43	37	24
33	51.05518	12.10812	32	54	22
34	51.05716	12.12227	54	58	22
35	51.05912	12.12749	50	59	28
36	51.06011	12.13105	49	57	25
37	51.06188	12.13265	44	53	30
38	51.06300	12.12918	46	50	43
39	51.06805	12.12508	41	52	32
40	51.07091	12.12070	34	54	24
41	51.07282	12.12611	40	48	22
42	51.07630	12.15263	36	44	22
43	51.07314	12.15431	47	51	24
44	51.07411	12.15752	48	54	22
45	51.07721	12.15643	45	57	23
46	51.05852	12.17919	45	40	21
47	51.05789	12.18076	49	35	22
48	51.05680	12.17955	47	36	23
49	51.05655	12.17790	42	31	25
50	51.05620	12.17893	33	45	24
51	51.07995	12.10913	47	48	23
52	51.08115	12.10691	37	35	19
53	51.08229	12.10741	42	37	21
54	51.08280	12.10899	43	39	25

C Erfolgreiche Funkverbindungen

Tabelle 14: Liste der erfolgreichen Funkverbindungen mit 2FSK

Station	**Punkt**	**Entfernung** [m]	**RSSI** [dBm]
A	5	12	-83
A	6	62	-104
B	39	191	-106
B	40	271	-103
C	16	456	-100
C	19	198	-91
C	20	71	-86
C	29	859	-102
D	44	122	-100
D	45	237	-106
E	36	109	-102
F	31	240	-104
H	10	139	-95
H	11	211	-108
H	15	42	-84
I	0	42	-73
I	1	103	-102
J	24	258	-104
J	27	49	-63
K	47	132	-103
K	48	50	-95
L	51	198	-95
L	53	94	-102

Tabelle 15: Liste der erfolgreichen Funkverbindungen mit LoRa

Station	**Punkt**	**Entfernung** [m]	**RSSI** [dBm]
A	5	12	-73
A	6	62	-112
B	39	191	-106
B	40	271	-99
C	16	456	-105
C	17	303	-113
C	18	292	-114
C	19	198	-100
C	20	71	-84
C	28	1086	-110
C	29	859	-106
C	30	1444	-107
C	31	1881	-120
C	34	1265	-114
C	36	1262	-115
D	42	368	-117
D	43	324	-121
D	44	122	-100
D	45	237	-102
E	36	109	-100
E	37	122	-101
F	31	240	-98
F	33	134	-117
G	28	166	-105
G	29	269	-117
G	30	402	-115
G	34	562	-115
H	9	321	-112
H	10	139	-94
H	11	211	-104
H	15	42	-85
I	0	42	-80
I	1	103	-98
I	2	227	-111
J	24	258	-101
J	27	49	-66
K	46	147	-115
K	47	132	-105
K	48	50	-100
K	49	117	-109
L	51	198	-98
L	52	109	-110
L	53	94	-105
L	54	139	-109