

Technische Hochschule Mittelhessen
Fachbereich Informationstechnik - Elektrotechnik - Mechatronik

LoRa based IoT endpoint and gateway

Bachelorarbeit

von

Silvere Sacker Ngoufack

Betreuer:

Erster Prüfer Prof. Dr.-Ing. Hartmut Weber

Zweiter Prüfer Prof. Dr.-Ing. Martin Gräfe

Friedberg, den 2. Juli 2020

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	iii
Selbständigkeitserklärung	iv
Abstract	vii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung	1
1.3 Gliederung der Arbeit	3
2 Hardware Komponenten	4
2.1 STM32L4 Discovery Kit	4
2.1.1 HTS221 Temperatursensor- und Feuchtigkeitssensor	5
2.1.2 LSM6DSL 3D Gyroskope und 3D Beschleunigungssensor	9
2.2 LoRa Endgerät: i-nucleo-lrwan1	12
2.2.1 LoRa und LoRaWAN-Protokoll	14
2.2.2 Sicherung der Daten	19
2.2.3 Aktivierung des Endgeräts	20
2.2.4 AT Commandos	22
3 Gateway und LoRaWAN-Server	25
3.1 Gateway	25
3.2 Einstellung des LoRaWAN-Servers	26
3.3 MQTT broker zur Datenübertragung	26
4 Software-Entwicklung	27
4.1 Entwicklungsumgebung	27
4.1.1 Eclipse	27
4.1.2 Libopencm3 Bibliothek installieren	27
4.2 Sensoren Auslesen	27
4.3 LoRa Commandos senden	27
5 Fazit	28
5.1 Zusammenfassung	28

5.2 Ausblick	28
------------------------	----

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen derjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Bachelorarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst bedanke ich mich herzlich bei John Martial Madieu mein Chef. Für seine hilfreichen Anregungen und seine konstruktive Kritiken bei der Entwicklung dieser Arbeit möchte ich mich bedanken.

Ich bedanke mich bei meiner Eltern, dafür das sie mich immer unterstützt haben.

Ein besonderer Danke gilt meiner Freundin und meinen Freunden, die durch ihre Fragen und Anmerkungen mein Wissen erweitert haben.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, Silvere Sacker Ngoufack, die vorliegende Arbeit selbstständig und ausschließlich unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst zu haben. Inhalte dieser Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit oder Teile daraus wurden in dieser oder vergleichbarer Form noch keinem anderem Prüfungsgremium vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Fiedberg, den 03. August 2020

SILVERE SACKER NGOUFACK

Abbildungsverzeichnis

1.1	LoRaWAN Netzwerkarchitektur [2]	2
2.1	B-L475E-IOT01A Discovery kit [15]	4
2.2	Humidity sensor analog-to-digital flow [13]	5
2.3	Linear interpolation to convert LSB to %RH [13]	7
2.4	Linear interpolation to convert LSB to °C [13]	9
2.5	Flußdiagramm zur Datenermittlung	10
2.6	I-Nucleo-LRWAN1 [17]	12
2.7	I-Nucleo-LRWAN1 Architektur [17]	13
2.8	LABCSMART LoRa End-Node physisches Aussehen (a) und Verbindung (b)	14
2.9	Vergleich zwischen LoRa und andere IoT Kommunikationstechnologien [2]	16
2.10	Klassen von LoRaWAN [2]	17
2.11	Klasse A	18
2.12	Klasse B	18
2.13	Klasse C	19
2.14	LoRaWAN-Nachricht Verschlüsselung [3]	20
2.15	Join-Request Verfahren	22
3.1	LABCSMART LoRaWAN Gateway	26

Tabellenverzeichnis

2.1	Kalibrierregister für relative Feuchtigkeit	6
2.2	Kalibrierregister zur Temperaturermittlung	8
2.3	Rechweite abhängig der Umgebung	15

Abstract

1 Einleitung

Dieses Kapitel soll den Leser auf den Inhalt der Arbeit aufmerksam machen, ihn mit der Aufgabestellung vertraut machen und über die Strukturierung und Zielsetzung der Arbeit Auskunft geben.

1.1 Motivation

Objekte werden in der heutigen Tagen immer mehr mit Elektronik und Intelligenz versehen. Die Leute wollen aufgrund dieser Entwicklung, dass Prozesse oder bestimmte Aufgaben ohne menschliches Eingreifen erledigt und miteinander vernetzt werden. Das System soll nur überwacht werden und die Ergebnisse zu bestimmten Zwecken benutzt werden.

Das Internet der Dinge (in Englisch *internet of things*, Kurzform **IoT**) wird dazu benutzt, um die Interaktion zwischen Menschen und vernetzten elektronischen Geräten zu vereinfachen.

1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines vernetzten Systems bestehend aus einem 3D-Beschleunigungssensor, einem 3D-Gyroskop sowie einem Temperatur- und Feuchtigkeitssensor. Die Sensoren messen Daten und übergeben diese an den STM32L475 Mikrocontroller.

Der Mikrocontroller soll die Daten verarbeiten und mit Hilfe von einem LoRa-Node[18] drahtlos an einem Server übertragen. Bevor die Übertragung erfolgt, muss das LoRa-Node Zugang zu dem Netzwerk durch ein Gateway bekommen. Nach dem das LoRa-Node dem Netzwerk hinzugefügt wurde, können nun Informationen zwischen dem LoRa-Node und dem Netzwerk-Server bis zu einem Anwendungsserver vertauscht werden. Abbildung 1.1 gibt einen Überblick über den Aufbau des gesamten Systems.

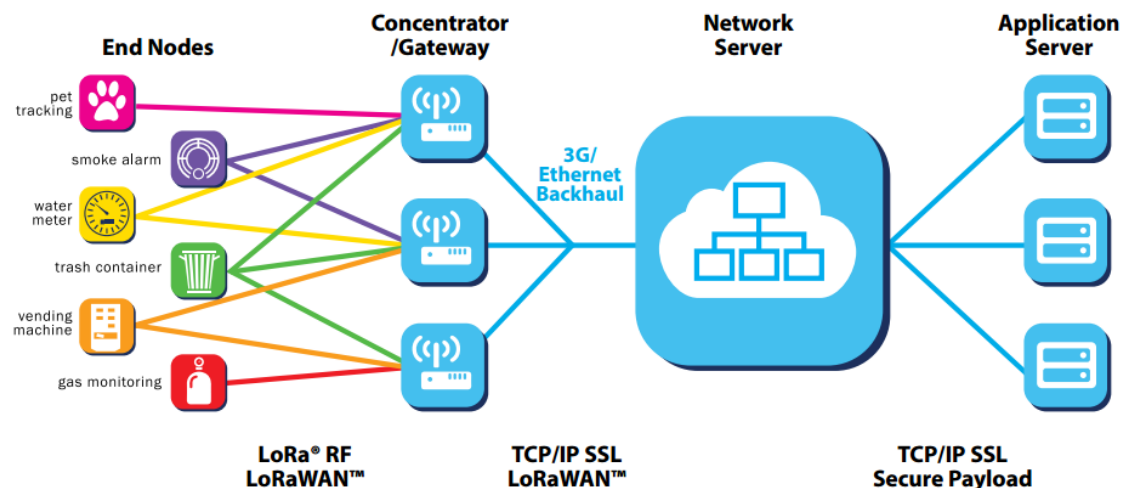


Abbildung 1.1: LoRaWAN Netzwerkarchitektur [2]

LoRa: ist eine abkürzung für *Long Range* und es ist eine drahtlose Technologie, das geringe Sendeleistung verbraucht wird, um kleine Datenpakete (0,3 Kbps bis 5,5 Kbps) über eine lange Strecke zu senden oder zu empfangen.

End Node Endgerät: ist ein Gerät, das aus zwei Teilen Besteht. Ein Funkmodul mit Antenne und einem Mikrocontroller zur Verarbeitung der Daten wie Sensordaten. Diese Daten können entweder an einem anderen LoRa-Node per Point-To-Point-Verbindung oder an einem LoRaWAN-Netzwerk versandt werden.

LoRaWAN: steht für *Long Range Wide Area Network* und ist das Kommunikationsprotokoll für den Netzwerk.

Gateway: ist ein Gerät, das aus mindestens einem Funkkonzentrator, einem Host und einer Netzverbindung zum Internet oder einen privaten Netzwerk (Ethernet, 3G, Wifi), möglicherweise einem GPS-Empfänger besteht.

LoRaWAN Server: ist ein abstrakter Computer, der die von dem Gateway empfangene RF-Pakete verarbeitet und sendet RF-Pakete als Antwort, dass das Gateway zurücksenden muss.

Application Server: ist eine Anwendung, womit der Benutzer die von den Sensoren gemessenen Daten entweder Tabellarisch oder Grafisch ansehen kann.

Uplink: ist die Kommunikation von einem Endgerät zu einem Gateway.

Downlink: ist die Kommunikations von einem Gateway zu einem Endgerät.

1.3 Gliederung der Arbeit

Das Kapitel 2 gibt einen detaillierten Überblick über allen Hardware-Komponenten, die bei der Durchführung dieser Arbeit verwendet werden. Hinzu kommt die Erläuterung der Software-Entwicklung. Als Erstes wird auf die Eigenschaften von des benutzten STM32-Nucleo Board eingegangen. Diesem Kapitel ist auch zu entnehmen, warum genau dieses Board gewählt wurde.

Als nächstes wird das LoRa Node und das LoRaWAN-Protokoll beschrieben. Dieser LoRa-Node wird dazu verwendet, um die gesammelten Daten dem Server drahtlos zu übertragen.

Das Kapitel 3 beschreibt wie das LoRaWAN-Protokoll, der LoRaWAN-Server und das Gateway funktionieren und zeigt die Konfigurationen, die zu übernehmen sind, um eine Verbindung mit einem LoRa-Node herzustellen.

Anschließend im Kapitel 5 wird eine Zusammenfassung und einen kleinen Ausblick der Arbeit gegeben.

2 Hardware Komponenten

In diesem Kapitel werden die für das Gesamtsystem benutzten Hardware-Komponenten hinsichtlich ihrer Funktionsweise und Ansteuerung in Einzelnen erläutert.

2.1 STM32L4 Discovery Kit

Das STM32L4 Discovery Kit ist ein IoT Knoten, womit ein Benutzer Anwendungen mit direkter Verbindung zu einem oder mehreren Cloud-Servern entwickeln kann. Dieses Discovery Kit ermöglicht eine Vielzahl von Anwendungen, indem es eine Multikink-Kommunikation (Bluetooth Low Energie) mit geringem Stromverbrauch Multiway-Erkennung der Umwelt ermöglicht (Siehe Abbildung 2.1).

Das STM32L4 hat einen eingebetteten ST-LINK Debugger/Programmierer, eingebettete Sensoren und viele andere Features, die in dem Datenblatt [15] erläutert zu finden sind. Genau wegen der Vielfalt an Eigenschaften wurde dieses Board ausgewählt. Man braucht kein Breadbord im Vergleich zu dem Arduino oder dem Raspberry-Pi, um die Sensoren mit den Schnittstellen (USART, SPI oder I2C) des Mikrocontrollers zu verbinden. Noch dazu eignet sich dieses Discovery Kit für ein Endgerät von STMicroelectronics, da Arduino-Verbinder vorhanden sind. Dazu ist nur das Endgerät in dieser Verbinder stecken.

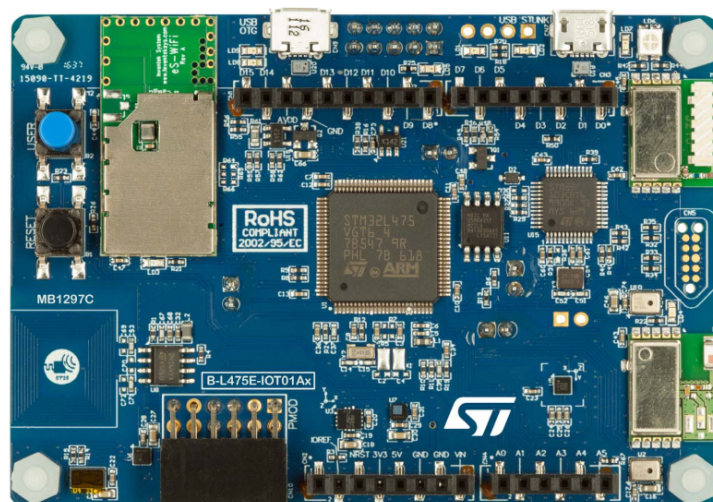


Abbildung 2.1: B-L475E-IOT01A Discovery kit [15]

Für diese Arbeit werden wir uns auf zwei Sensoren beschränken. Erstmal den HTS221[13] Temperatur- und Feuchtigkeitssensor und dann den LSM6DSK 3D-Gyroscope und 3D-Beschleunigungssensor [14]. Diese Daten werden erfasst und drahtlos an den LoRaWAN-Server übertragen. Die folgenden Unterkapitel beschreiben, wie diese Sensoren funktionieren und erklären, wie sie anzusteuern sind, damit die erhaltenen Daten im Rahmen der geforderten Toleranzen der Realität entsprechen. Laut dem Datenblatt ist mit einer Temperaturgenauigkeit von $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ und einer Feuchtigkeitsgenauigkeit von $\pm 3.5\%$ zu rechnen.

2.1.1 HTS221 Temperatursensor- und Feuchtigkeitssensor

In diesem Unterkapitel wird der HTS221 Temperatur- und Feuchtigkeitssensor beschrieben und erklärt wie die Temperatur und die Feuchtigkeit zu ermitteln sind.

Der HTS221 Sensor misst die relative Feuchtigkeit(H) und die Temperatur (T) und speichert die Daten (16-Bits von Datentyp Integer) als Zweierkomplement. Diese Daten können über I2C- oder SPI-Schnittstelle gelesen werden. Die gespeicherte Daten sind Rohdaten, die am Ausgang von dem Analog-Digital-Converter (ADC) verfügbar sind (Siehe Abbildung 2.2). Um die Temperatur in $^{\circ}\text{C}$ und die relative Feuchtigkeit in % zu bekommen, muss man die Daten aus den Registern auslesen und mit Hilfe der Formel 2.1.1 und 2.1.1 die richtigen Werten herausfinden.

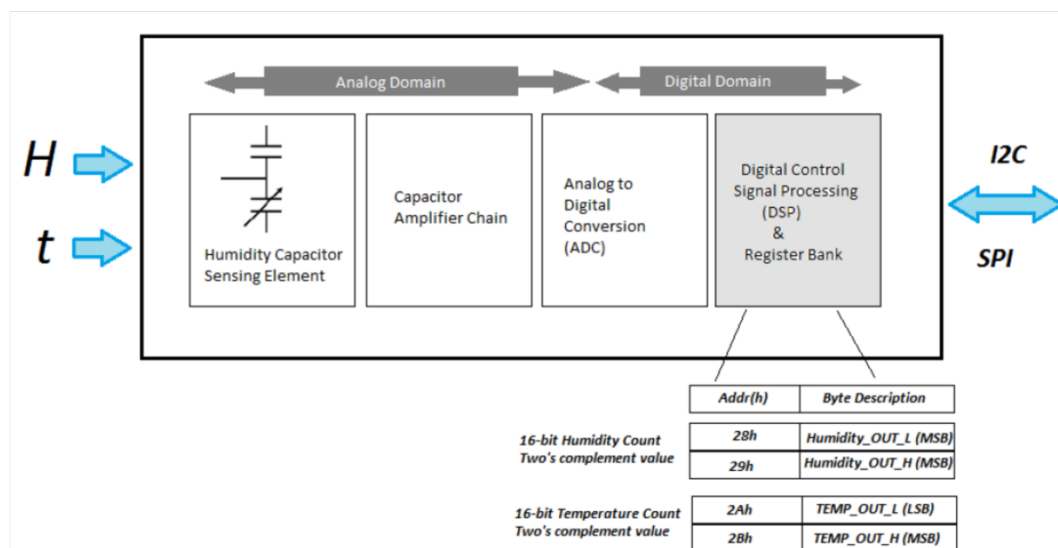


Abbildung 2.2: Humidity sensor analog-to-digital flow [13]

Feuchtigkeit ermitteln

An dieser Stelle wird erklärt wie die Feuchtigkeit von dem Sensor ermittelt wird. Der HTS221 Sensor speichert den Feuchtigkeitswert in Rohzählungen in zwei 8-Bit-Registern:

- *H_OUT_H* (0x29) (Höchstwertige Bits)
- *H_OUT_L* (0x28) (Niedrigwertige Bits)

Die zwei Bytes werden verkettet, um ein Zweierkomplement dargestelltes 16-Bit Wort zu bilden. Der relative Feuchtigkeitswert muss durch lineare Interpolation der Register (*HUMIDITY_OUT_H* & *HUMIDITY_OUT_L*) mit den Kalibrierregistern berechnet werden.

Der HTS221 Sensor ist bei der Herstellung schon kalibriert und die erforderlichen Koeffizienten sind ADC 16-Bit-Werte, die in den internen Register des Sensors zu lesen sind. Eine weitere Kalibrierung durch den Benutzer ist nicht erforderlich.

Die Tabelle 2.1 stellt die Register dar, in dem die Kalibrierwerte zur Ermittlung der relativen Feuchtigkeit gespeichert sind.

Variable	Adresse	Format ¹
<i>H0_rH_x2</i>	0x30	u(8)
<i>H1_rH_x2</i>	0x31	u(8)
<i>H0_TO_OUT_H</i>	0x36	s(16)
<i>H0_TO_OUT_L</i>	0x37	s(16)
<i>H1_TO_OUT_H</i>	0x3A	s(16)
<i>H1_TO_OUT_L</i>	0x3B	s(16)

Tabelle 2.1: Kalibrierregister für relative Feuchtigkeit

Nun wissen wir welche Register zu lesen sind, damit die relative Feuchtigkeit mithilfe der Interpolation berechnet wird. Die folgenden Schritten müssen vor der Berechnung durchgeführt werden:

- Werte von *H0_rH_x2* und *H1_rH_x2* aus Registern 0x30 und 0x31 lesen
- *H0_rH_x2* und *H1_rH_x2* durch zwei teilen
- Werte von *H0_TO_OUT* aus Registern 0x36 und 0x37 lesen
- Werte von *H1_TO_OUT* aus Registern 0x3A und 0x3B lesen
- Rohdate von *H_T_OUT* aus Registern 0x28 und 0x29 lesen

Nachdem diese Register gelesen wurden, kann nun die Berechnung der relative Feuchtigkeit erfolgen.

¹(u8) 16Bit-Wert ohne Vorzeichen, (s16) 16Bit-Wert mit Vorzeichen

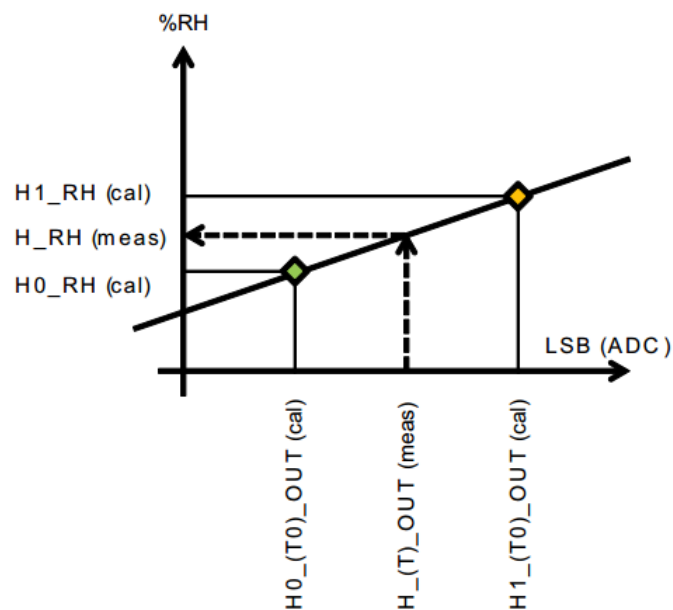


Abbildung 2.3: Linear interpolation to convert LSB to %RH [13]

Aus Abbildung 2.3 bekommt man mit Interpolation die folgende Formel [13]:

$$RH\% = \frac{((H1_{rH} - H0_{rH}) \cdot (H_{T_OUT} - H0_{T0_OUT}))}{(H1_{T0_OUT} - H0_{T0_OUT})} + H0_{rH}$$

Temperatur ermitteln

Der HTS221 Sensor speichert die Temperaturwerten in Rohzählungen in zwei 8-Bit-Registern:

- T_OUT_H (0x2A) (Höchstwertige Bits)
- T_OUT_L (0x2B) (Niedrigwertige Bits)

Die zwei Bytes werden verkettet, um ein Zweierkomplement dargestelltes 16-Bit Wort zu bilden. Die Polarität wird durch den höchstwertigen Bit vom T_OUT_H Register bekannt gegeben.

- Ist dieser Bit 0, die gelesene Temperatur ist positiv.
- Ist dieser Bit 1, die gelesene temperatur ist negativ. In diesem fall ist der Zweierkomplement des gesamten Wort zu bilden, um den richtigen Wert zu bekommen.

Auch hier ist die Temperatur durch lineare Interpolation von den Kalibrierregistern und den Registern T_OUT_H und T_OUT_L in Zweierkomplement zu berechnen.

Die Tabelle 2.2 stellt diese Kalibrierregister dar.

Registern	Adresse	Format
$T0_degC_x8$	0x32	u(8)
$T1_degC_x8$	0x33	u(8)
$T1/T0msb$	0x35	(u2),(u2)
$T0_OUT_H$	0x3D	s(16)
$T0_OUT_L$	0x3C	s(16)
$T1_OUT_H$	0x3F	s(16)
$T1_OUT_L$	0x3E	s(16)

Tabelle 2.2: Kalibrierregister zur Temperaturermittlung

Da die Kalibrierregister vom Hersteller mit den korrekten Werten versehen werden, werden wir nun diese Register lesen und mithilfe der gelesenen Werte die Temperatur ermitteln. Bevor man die Temperatur mit linearer Interpolation berechnet, sind die folgenden Schritten erstmal erforderlich.

- Die Koeffiziente $T0_degC_x8$ und $T1_degC_x8$ aus den Registern 0x32 und 0x33 lesen
- Die Werte von $T0_degC_x8$ und $T1_degC_x8$ durch 8 dividieren, um die Koeffiziente $T0_degC$ und $T1_degC$ zu bekommen.
- Die höchstwertige Bits von $T1_degC$ (T1.9 und T1.8) und $T0_degC$ (T0.9 und T0.8) aus dem Register 0x35 lesen. Diese Werte an den im Schritt 2 ermittelten Werten verketteten, damit $T0_degC$ und $T1_degC$ vollständig werden.
- Der Wert von $T0_OUT$ aus den Registern 0x3C und 0x3D lesen.
- Der Wert von $T1_OUT$ aus den Registern 0x3E und 0x3F lesen.
- Der Wert von T_OUT aus den Registern 0x2A und 0x2B lesen.

Nachdem diese Kalibrierregister gelesen wurden, kann man mittels linearer Interpolation die Temperatur in °C berechnen.

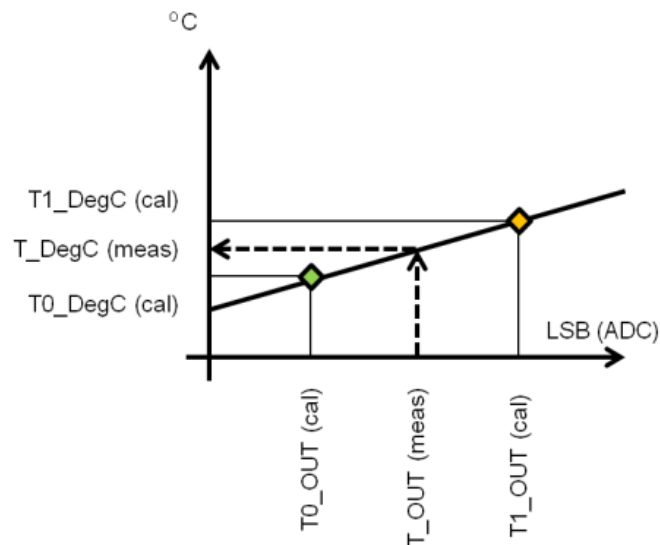


Abbildung 2.4: Linear interpolation to convert LSB to °c [13]

Abbildung ?? zeigt der Graph woraus die lineare Interpolation stammt. Die folgende Formel wurde sogar daraus hergeleitet.

$$T[c] = \frac{((T1_degC - T0_degC) \cdot (T_OUT - T0_OUT))}{(T1_OUT - T0_OUT)} + T0_degC$$

Da die Kalibrierwerten zur Berechnung der Temperatur und der relativen Feuchtigkeit bei der Herstellung des Bausteins vorab festgesetzt sind, soll man die Kalibrierregister bei der Programmierung nur ein mal auslesen. Dies erspart den Rechenaufwand des Mikrocontrollers.

2.1.2 LSM6DSL 3D Gyroskope und 3D Beschleunigungssensor

Dieses Unterkapitel berichtet von dem LSM6DSL 3D-Gyroskope und 3D-Beschleunigungssensor. Hier ist zu entnehmen, wie die X-,Y-, und Z-Koordinaten des Sensoren zu ermitteln sind und wie der Sensor abhängig vom Zweck skaliert werden kann.

Der LSM6DSL ist ein digitaler 3D-Beschleunigungsmesser und ein 3D-Gyroskopsystem mit einer digitalen seriellen I2C/SPI Schnittstelle mit einer leistung von 0.65mA im kombinierten Hochleistungsmodus. Das Gerät verfügt über einen von Benutzer wählbaren dynamischen Beschleunigungsbereich von $\pm 2 \mid \pm 4 \mid \pm 8 \mid \pm 16g$ (g is gleich 9,81m/s) und einen Winkelgeschwindigkeitsbereich von $\pm 125 \mid \pm 250 \mid \pm 500 \mid \pm 1000 \mid \pm 2000dps$ (Degrees per second).

Das extrem geringe Größe und das geringe Gewicht des SMD-Packets machen den

LSM6DSL zu einer idealen Wahl für tragbare Anwendungen wie Smartphones, IoT-verbundene Geräte und andere Anwendungen, bei der reduzierte Paketgröße und -gewicht erforderlich sind.

Der LSM6DSL bietet drei mögliche Betriebskonfiguration:

- nur Beschleunigungsmesser aktiv und Gyroskope inaktiv
- nur Gyroskope aktiv und Beschleunigungsmesser inaktiv
- beide aktiv mit unabhängigem Output Data Rate (ODR)

Der Beschleunigungsmesser und der Gyroskop können unabhängig voneinander konfiguriert werden unter anderem: Power-down, Low-Power, Normal- und High-performance Modus. Um den Stromverbrauch des Sensors zu reduzieren, kann der Gyroskop in einem Ruhestand gesetzt werden.

Sobald das Gerät mit Strom versorgt wird, werden die Kalibrierkoeffizienten vom eingebetteten Flash-Speicher zu den internen Registers. Dieser Vorgang dauert ungefähr 15 Millisekunden. Nach dieser Zeit fallen der Beschleunigungsmesser und der Gyroskop im Power-Down Modus. Durch der *CTRL1_XL* bzw. *CTRL2_G*-Register können die Geräte geweckt werden, indem man das Betriebsmodus auswählt.

Wenn die Daten verfügbar sind, wird eine Unterbrechung (Interrupt demnächst) ausgelöst, wenn der entsprechende Byte vom Beschleunigungsmesser bzw. vom Gyroskop in dem *INT1_CTRL*- Register geschrieben wurde. Das Vorhandensein der Daten kann nun mit Hilfe des Statusregister abgefragt werden. Das *XLDA*-Bit wird auf 1 gesetzt, wenn am Ausgang des Beschleunigungsmesser ein neuer Datensatz verfügbar ist. Das *GDS*-Bit wird auf 1 gesetzt, wenn am Gyroskopausgang ein neuer Datensatz verfügbar ist.

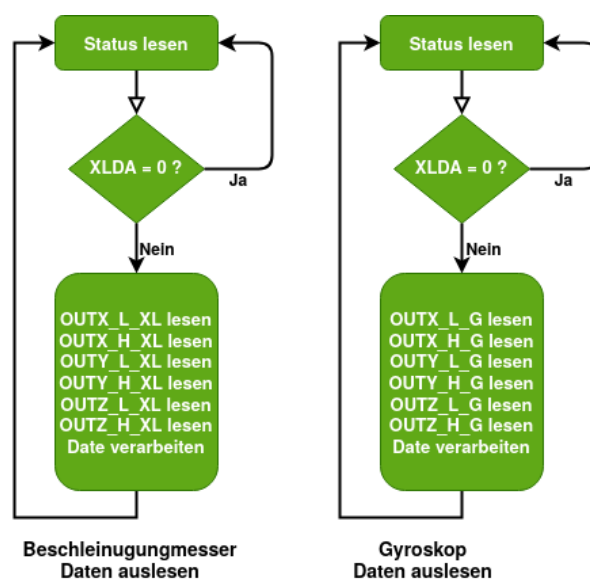


Abbildung 2.5: Flußdiagramm zur Datenermittlung

Das Abbildung 2.5 ist der Flußdiagram zur ermittlung der Achsen- und Winkelveränderungen des Beschleunigungsmesser und des Gyroskop.

Wie oben schon erläutert, kann das Gerät so eingestellt werden, dass ein neuer Satz von Messdaten durch ein Signal erkennbar wird. Das *XLDA*-Bit von dem *STATUS_REG*-Register wird auf 1 gesetzt, wenn Daten aus dem Beschleunigungsmesser zum Lesen verfügbar sind. Das Signal kann durch den *INT1*-Pin angesteuert werden, indem das *INT1_DRDY_XL*-Bit vom *INT1_CTRL*-Register auf 1 gestetzt wird.

Für den Gyroskopsensor wird das *GDA*-Bit auf 1 gesetzt, wenn die Daten zum lesen verfügbar sind. Das Signal kann durch den *INT1*-Pin angesteuert werden, indem das *INT1_DRDY_G*-Bit vom *INT1_CTRL*-Register auf 1 gestetzt wird. Die gemessenen Beschleunigungsdaten werden in *OUTX_H_XL*-, *OUTX_L_XL*-, *OUTY_H_XL*-, *OUTY_L_XL*-, *OUTZ_H_XL*-, *OUTZ_L_XL*-Register gesendet. Die gemessenen Winkelgeschwindigkeitsdaten werden dagegen in *OUTX_H_G*-, *OUTX_L_G*-, *OUTY_H_G*-, *OUTY_L_G*-, *OUTZ_H_G*-, *OUTZ_L_G*-Register gesendet. Die vollständigen Ausgangsdaten für die X-,Y- und Z-Achsen sind durch die Verkettung von *OUTX_H_XL(G)* und *OUTX_L_XL(G)*, *OUTY_H_XL(G)* und *OUTY_L_XL(G)*, *OUTZ_H_XL(G)* und *OUTZ_L_XL* zu erhalten, wobei die Beschleunigungsdaten und die Winkelgeschwindigkeitsdaten als 16-Bit Werte dargestellt sind.

Mit dem LSM6DSL kann man den Inhalt des unteren und oberen Teils der Ausgangsdatenregister vertauschen, sodass die Darstellung entweder Big-Endian oder Little-Endian entspricht. Dies ist möglich, sofern man das *BLE*-Bit von dem *CTRL3_C*-Register auf 0 (Little-Endian Standardmäßig) oder auf 1 (für Big-Endian) Big-Endian bedeutet, dass der höchstwertige Byte des Datensatzes in der niedrigsten Speicherstelle gespeichert wird. Little-Endian bedeutet, dass der niedrigstwertige Byte des Datensatzes in der niedrigsten Speicherstelle gespeichert wird.

Im Unterkapitel 4.2 werden die Funktionen zur Datenermittlung in der Programmiersprache C sowohl für den HTS221 (Temperatur- und Feuchtigkeitssensor) als auch für den LSM6DSL (3D-Beschleunigungssensor und 3D-Gyroskop) dargestellt und erklärt wie die Kommunikationsschnittstelle (hier I2C) zu benutzen ist.

2.2 LoRa Endgerät: i-nucleo-lrwan1

Die im Kapitel 2.1.1 ermittelten Sensordaten sollen laut der Aufgabestellung mit Hilfe eines drahtlosen Protokoll an einem Server versandt werden. Um diese Daten drahtlos und auf eine lange Strecke zu übertragen, haben wir uns auf das LoRaWAN-Protokoll entschieden. Die Gründe warum genau dieses Protokoll ausgewählt wurde, werden in diesem Kapitel genannt. Noch dazu wird nicht nur auf die Eigenschaften des benutzten Endgerät eingegangen sondern auch auf den Unterschied von diesem Modul gegenüber anderen Modulen, die auf dem Markt zu finden sind.

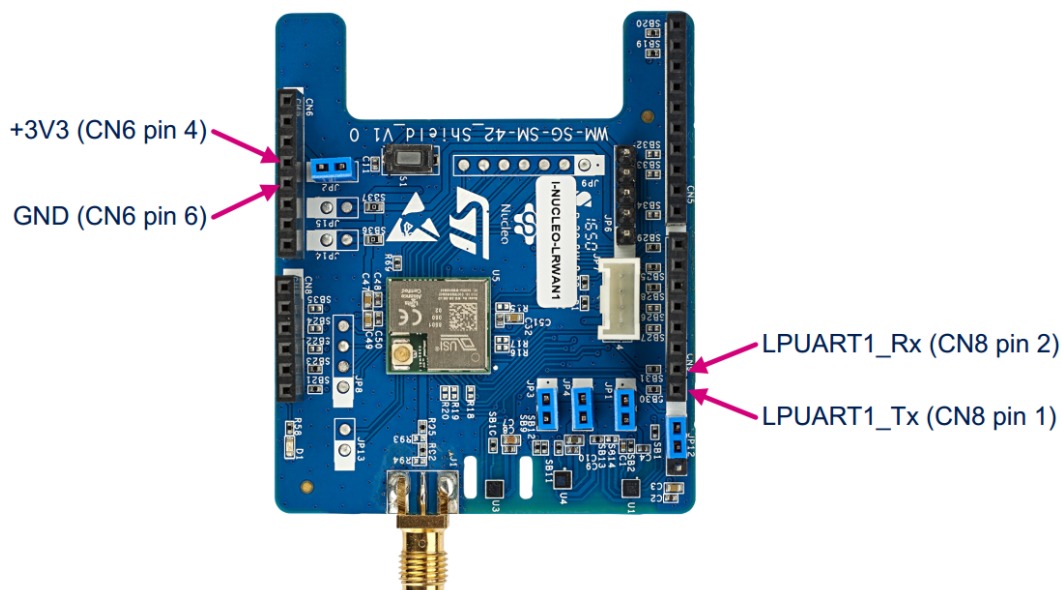


Abbildung 2.6: I-Nucleo-LRWAN1 [17]

Abbildung 2.6 zeigt das Endgerät, das zur Datenübertragung verwendet ist. Diese Platine mit Arduino-Connectoren und mehr ist eine integrierte Lösung, die jedem ermöglicht Anwendungen mit der LoRa-Technologie zu entwickeln. Das I-Nucleo-LRWAN1 verfügt über den USI® LoRaWAN™ Technologiemodul für kostengünstiges und stromsparendes Weitverkehrsnetz (LPWAN), welches mit einem eingebetteten Stapel von AT-Befehlen (AT-Befehl beschreiben) mitgeliefert wird. Dieses Board wurde ausgewählt, weil es durch ein externes Board wie das Nucleo-L053 oder user B-L475E-IOT01A Discovery kit 2.1 über mehrere Schnittstellen wie LPUART, SPI oder I2C angesteuert werden kann. Noch dazu verfügt das I-Nucleo-LRWAN1 über die folgenden eingebetteten Sensoren.

- ST Beschleunigungs- und Magnetosensor (LSM303AGR)
- ST relative Feuchtigkeits- und Temperatursensor (HTS221)
- ST Drucksensor (LPS22HB)

Im Vergleich zu anderen Endgeräten, worauf keine Sensoren vorhanden sind, braucht man keine zusätzlichen Sensoren kaufen. Die Kommunikation mit einem anderen Mikrocontroller erfolgt einfach durch UART, man braucht nicht auf das integrierte Radio-Modul zum Senden oder Empfangen von Daten und Befehle zu kümmern. Das Bild 2.7 zeigt, dass das I-Nucleo-LRWAN1 mit einem STM32L0-Mikrocontroller versehen ist, der dazu zuständig ist, die Kommunikation zwischen dem I-Nucleo-LRWAN1 und einem externen Mikrocontroller zu vereinfachen. Das SX1272-Chip ist das eigentliche LoRa-Radio-Modul, das die Daten oder die AT-Befehle per Funk durch die Antenne an entweder einem Gateway (Router) oder einem anderen Endgeräten sendet.

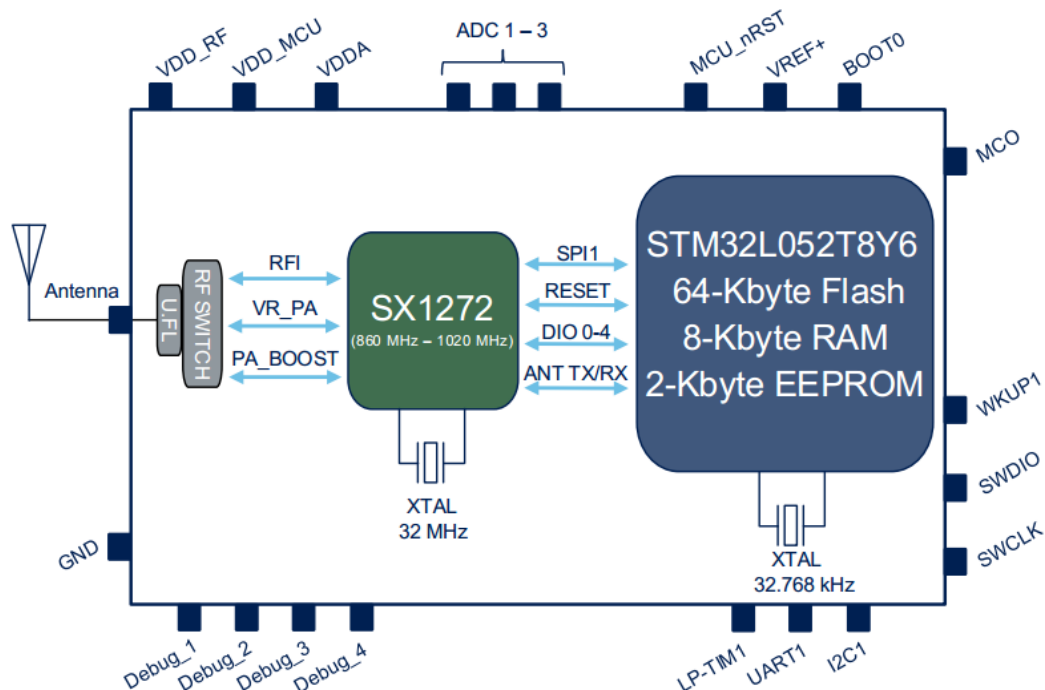


Abbildung 2.7: I-Nucleo-LRWAN1 Architektur [17]

Das I-Nucleo-LRWAN1 wird mit Hilfe seiner Arduino-Connectoren mit einem externen Board verbunden. Für diese Abschlussarbeit wird dieses Endgeräts an den Arduino-Connectoren des B-L475E-IOT01A Discovery kit verbunden (Siehe Abbildung 2.8)

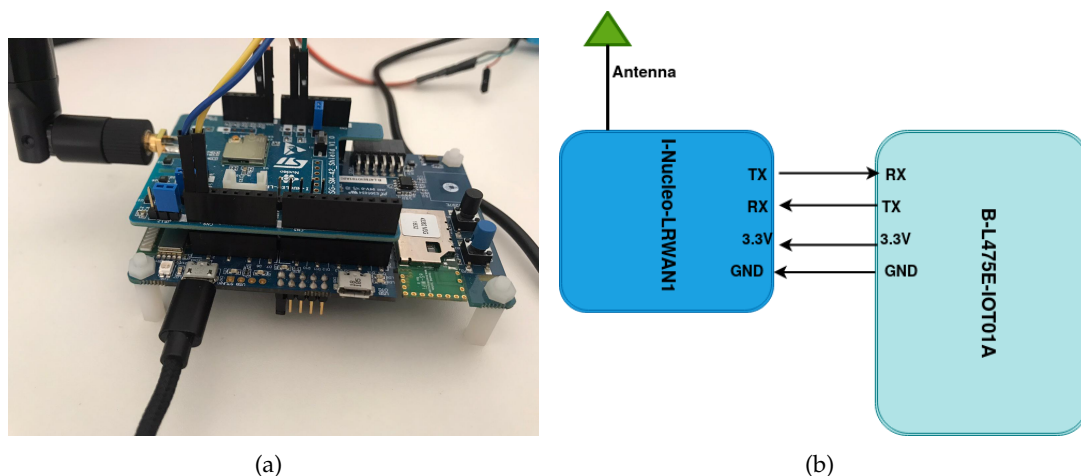


Abbildung 2.8: LABCSMART LoRa End-Node physisches Aussehen (a) und Verbindung (b)

Dem Bild 2.8(b) ist zu entnehmen, dass beide Komponenten durch eine UART-Schnittstelle kommunizieren. Das I-Nucleo-LRWAN1 wird von dem B-L475E-IOT01A mit Strom versorgt. Die Aufgabe des B-L475E-IOT01A besteht darin, erstmal die Sensordaten zu verarbeiten, als nächsten sendet es durch die UART-Schnittstelle AT-Befehle zur Konfiguration des I-Nucleo-LRWAN1, sodass die erhaltene Sensordaten mit Hilfe des LoRa-WAN-Protokoll gesendet werden.

2.2.1 LoRa und LoRaWAN-Protokoll

In diesem Teil der Thesis erfahren Sie was LoRa und das LoRaWAN-Protokoll sind, als auch wie das Protokoll implementiert wird, damit ein Endgerät in dem LoRaWAN-Netzwerk hinzugefügt wird.

LoRa: Die Physikalische Schicht

Eine einzige Technologie kann nicht alle Anwendungen des IoT decken. Technologien wie Wifi und Bluetooth Low Energie (BLE) sind weit verbreitete Standard und decken die Kommunikation persönlicher Geräte recht gut. Die Mobilfunktechnologie passt hervorragend zur Anwendung, die einem hohen Datendurchsatz benötigen.

Diese Technologien sind zwar gut aber haben es bestehen einige Nachteile, wie dem hohen Energieverbrauch und die Strecke von einem Sender zu einem Empfänger ist relativ kurz. LoRa bieten Lösungen zu diesen Nachteilen an, nämlich eine mehrjährige Batterielebensdauer, die Übertragung von kleinen Datenmengen über große Entfernun-

gen. LoRa ist die physikalische Schicht oder die verwendete drahtlose Modulation, um eine lange Bereichskommunikationsverbindung zu schaffen.

Viele ältere drahtlose Systeme verwenden die Frequenzumtastungen (Englisch *Frequency Shifting Keying*, Kurzform **FSK**) als physikalische Schicht, weil es eine sehr effiziente Modulation zur Erzielung geringer Leistung ist. LoRa basiert auf der Chirp-Spreizspektrum-Modulation (Englisch *Chirp Spread Spectrum modulation*). Diese Modulation behält die gleiche Eigenschaft der geringer Leistung wie FSK-Modulation bei und erhöht aber deutlich die Kommunikationsreichweite. Das Chirp-Spreizspektrum wird seit Jahrzehnten auf Grund seiner Kommunikationsreichweite und seiner Robustheit gegenüber Störungen in der Militär- und Weltraumkommunikation eingesetzt. LoRa ist derzeit die erste kostengünstige Implementierung für den kommerziellen Einsatz.

Es existiert konkurrierende Technologien zu LoRa wie Narrowband IoT (NB-IoT) und Sigfox. Das LoRa kann Video- und Audio-Nachrichten nicht übertragen, man kann nur sehr kleine Datenpakete wie Sensordaten übertragen. Der Hauptpunkt von LoRa ist die Kommunikation über lange Strecken und die Verwendung einer sehr geringen Sendeleistung von ungefähr 20mW.

Die LoRa-Technologie wurde von einem kleinen französischen Start-Up Namens Cycleo entwickelt. In 2012 wurde Cycleo von der Firma Semtech gekauft. Die Reichweite zwischen LoRa-Sender und -Empfänger hängt von der Umgebung ab, in der das Gerät betrieben wird. Die Abdeckung von Innenräumen hängt weitgehend von der Art des verwendeten Baumaterials ab. Die Tabelle 2.3 zeigt die Reichweite der LoRa-Technologie abhängig der Umgebung.

Umgebung	Reichweite in km
Städtische Gebiete	2 bis 5
ländliche Gebiete	5 bis 15
Direkte Sichtlinie	>15

Tabelle 2.3: Reichweite abhängig der Umgebung

Es gibt aber Wirtschaftler, die dazu gekommen sind einen Weltrekord zu stellen, indem sie eine LoRa-Verbindung bis auf 200km geschafft haben. Ein Beispiel ist Herr Andreas Spiess [1].

Abbildung 2.9 ist zu entnehmen, dass LoRa im Vergleich zu anderen Technologien wie Wifi oder 4G eine kleine Baudrate hat. Aber seine Reichweite ist deutlich größer als weit bekannte Technologien wie Bluetooth oder Wifi.

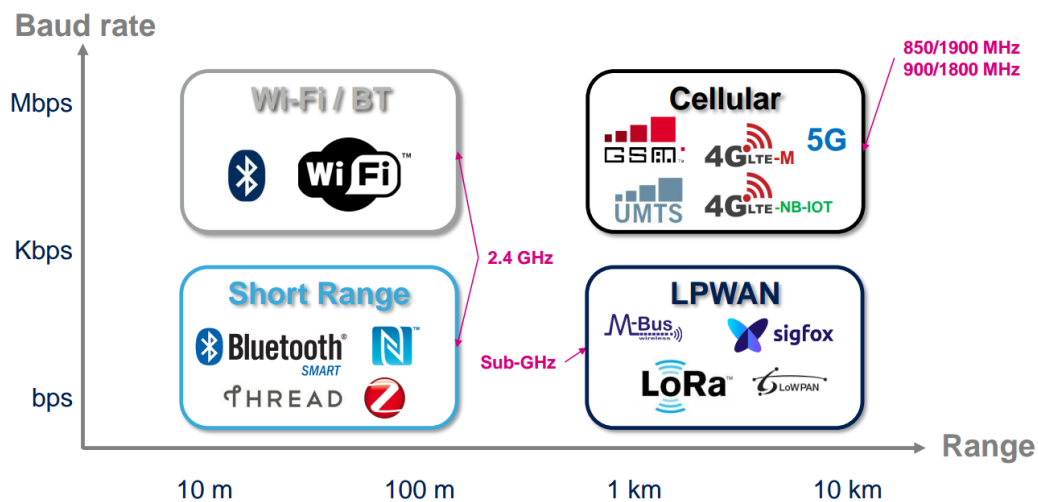


Abbildung 2.9: Vergleich zwischen LoRa und andere IoT Kommunikationstechnologien [2]

Die LoRa-Technologie kann man in vielen Gebiete Einsetzen. Die folgende Auflistung gibt einen groben Überblick auf einige Einsatzgebiete.

- **Intelligente Dienstprogramme**
 - Überwachung eines Leistungstransformators
 - Wasserstandsüberwachung
 - Kraftstoffüberwachung
- **Gesundheit und Hygiene**
 - Temperatur- und Feuchtigkeitsüberwachung
 - Umweltüberwachung
- **Sicherheit**
 - Radioaktivitätsüberwachung
 - Intelligenter Geschwindigkeitsblitzer
- **Landwirtschaft**
 - Überwachung des Tierschutzes
 - Überwachung der Pflanzenwachstumsbedingungen
- **Effizienz**
 - Asset Management (Tracking von Containern, Paletten)
 - Deichmanagement (Verfolgung von Autos, Lieferwagen, Lastwagen)

LoRaWAN: Das Kommunikationsprotokoll

LoRaWAN beschreibt das Kommunikationsprotokoll und die Systemarchitektur des Netzwerks, während LoRa die physikalische Schicht, die die Fernkommunikationsverbindung ermöglicht. Das Protokoll und die Netzwerkarchitektur haben den größten Einfluss auf die Bestimmung der Batterielebensdauer eines Endgeräts, die Netzwerkkapazität, die Servicequalität, die Sicherheit und die Vielzahl der vom Netzwerk bereitgestellten Anwendungen.

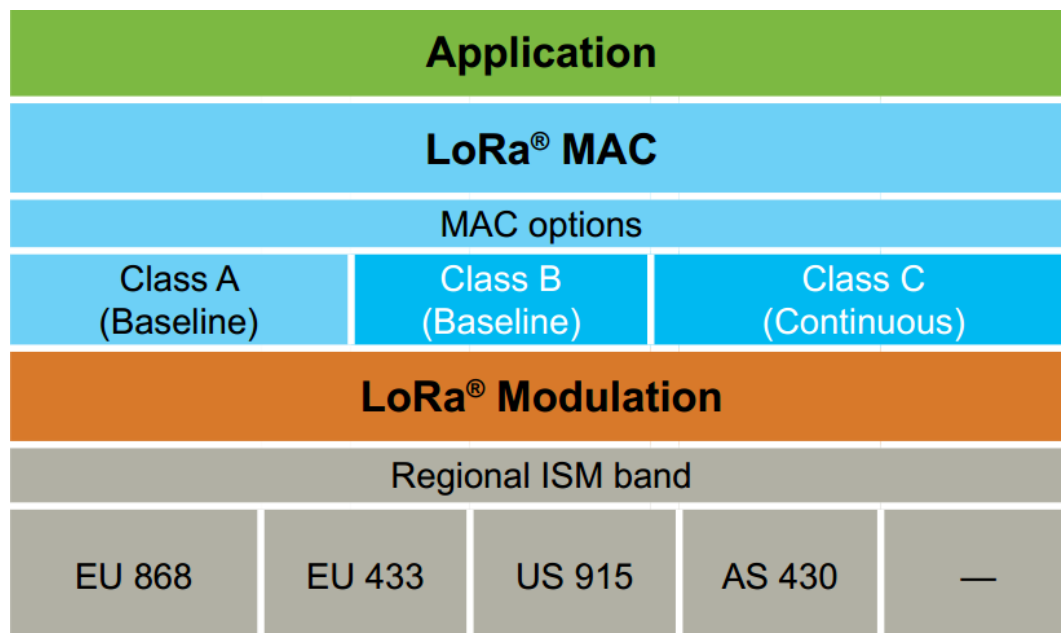


Abbildung 2.10: Klassen von LoRaWAN [2]

Wie es auf Abbildung 2.10 zu entnehmen ist, ist das LoRaWAN mit verschiedenen Schichten aufgebaut. Die erste Schicht ist die regionale Schicht, hier geht es um die Frequenzbereiche, die abhängig von der Region zur Datenübertragung verwendet werden können. Die ISM-Bandfrequenzen von Europa liegen zwischen 863 MHz und 870 MHz. Als nächstes kommt die LoRa-Modulation als physikalische Schicht des Netzwerks. LoRaWAN verfügt über viele Klassen, nämlich die Klasse A, B und C. Diese Klassen werden später in diesem Unterkapitel im Einzelnen erklärt. Am Ende kommt die Anwendung der LoRa-Technologie.

Alle Endgeräte funktionieren nicht gleich, dies aufgrund der von dem Entwickler implementierten Klasse.

Klasse A (All end-devices) : Ein Endgerät der Klasse A ermöglicht eine bidirektionale Kommunikation, wobei nach jedem Uplink eines Endgeräts für kurze Zeit zwei kurzen Downlink-Empfangsfenstern folgen. Diese Empfangsfenster werden jeweils für eine Zeit *RECEIVE_DELAY1* (für das erste Fenster) und *RECEI-*

VE_DELAY2 geöffnet. Die Dauer dieser Zeiten werden sowohl in dem Endgerät als auch in dem Server gespeichert. Verglichen zu den anderen Klassen, sind Endgeräte der Klasse A die niedrigste Leistungsfresser.

Nachdem die zwei Downlink-Empfangsfenster geschlossen sind, kann das Gateway keine weitere Downlinks mehr senden. Die nächsten Downlinks werden erst berücksichtigt, wenn das Endgerät ein Uplink gesendet hat. Das unten stehende Bild zieht dieses Verhalten recht gut.

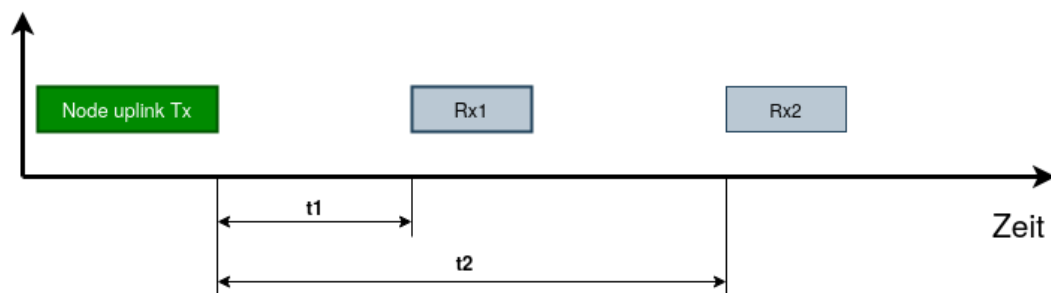


Abbildung 2.11: Klasse A

Klasse B (Beacon) : Zusätzlich zu den zufälligen Empfangsfenster der Klasse A, Geräte der Klasse B öffnen zusätzliche Empfangsfenster zu geplante Zeiten. Damit das Endgerät seine Empfangsfenster an den geplanten Zeiten öffnen kann, bekommt es ein synchronisiertes Beacon von dem Gateway. Dies ermöglicht dem Gateway zu wissen, wann das Endgerät auf Downlinks wartet. Diese Klasse verbraucht mehr Leistung als die Klasse A.

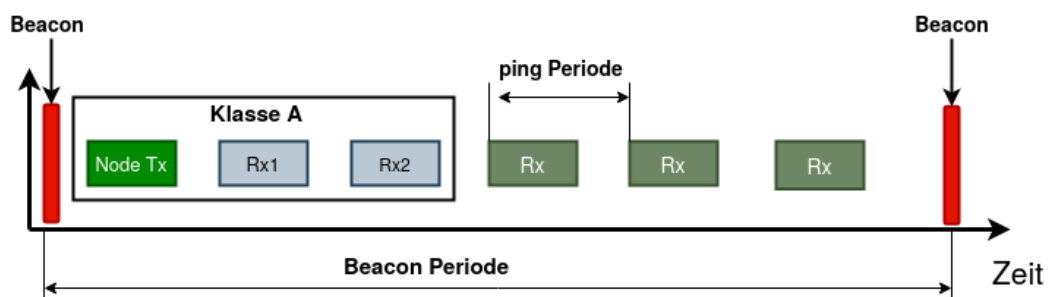


Abbildung 2.12: Klasse B

Klasse C (Continuously listening) : Endgeräte der Klasse C haben fast immer geöffnete Empfangsfenster, die sich nur beim Senden schliessen. Diese Klasse verbraucht Energie am meisten.

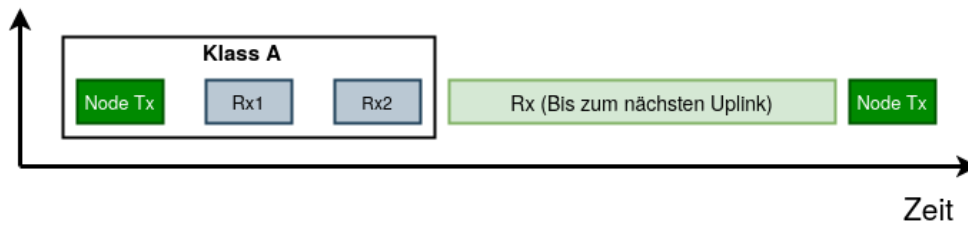


Abbildung 2.13: Klasse C

Im Rahmen dieser Thesis wird nur die Klasse A berücksichtigt, weil das ausgewählte Endgerät die Klasse B nicht unterstützt und die Klasse C zu viel Energie verbraucht.

2.2.2 Sicherung der Daten

Wir wollen nicht, dass die gesendeten Informationen durch ein Dritter ohne Zugriffsrechte auf das Netzwerk die Informationen lesen kann. Unabhängig davon, ob die Netzwerksicherheit oder die Vertraulichkeit und Sicherheit der Daten gewährleistet werden soll, ist das Thema Sicherheit äußerst wichtig. Eine Frage, die übrigens das Internet der Dinge als Ganzes betrifft.

Um die Netzwerk- und Datensicherheit zu gewährleisten, verwendet das LoRaWAN-Netzwerk zwei AES-128-Verschlüsselungen. Der erste ist der Netzwerksitzungsschlüssel (Englisch *Network Session Key* Kurzform **NwkSKey**) stellt die Authentizität der Geräte im Netzwerk sicher. Der zweite ist der Anwendungssitzungsschlüssel (Englisch *Application Session Key* Kurzform **AppSKey**). Der NwkSKey wird von dem Endgerät und dem Server benutzt, um den Nachrichtenintegritätscode (Englisch *Message Integrity Code* Kurzform **MIC**) zu berechnen und die Integrität aller Daten zu prüfen. Es wird weiterhin verwendet, um das Nutzdatenfeld von MAC-Daten zu verschlüsseln und zu entschlüsseln.

Der AppSKey wird auch vom Endgerät und Server verwendet, diesmal, um das Nutzdatenfeld von anwendungsspezifischen Daten zu verschlüsseln und zu entschlüsseln. Die Anwendungsnutzdaten werden zwischen dem Endgerät und dem Anwendungsserver Ende-zu-Ende verschlüsselt. Das heißt, der Netzwerkservers kann möglicherweise den Inhalt der übertragenen Daten ändern.

Laut Abbildung 2.14 werden die zu sendenden Daten erst mit dem AppSKey verschlüsselt. Ein Header, der andere Adressen des Endgeräts enthält, wird an den verschlüsselten Daten hinzugefügt. Nach dieser Verknüpfung wird der MIC berechnet, der nach der Berechnung an den verschlüsselten Daten und dem Header hinzugefügt wird. Nun können die Daten versandt werden.

Nachdem der Server die Daten empfangen hat, kann die Integrität dieser Daten vom Server mit Hilfe des MICs geprüft werden. Die Daten werden nur berücksichtigt, wenn

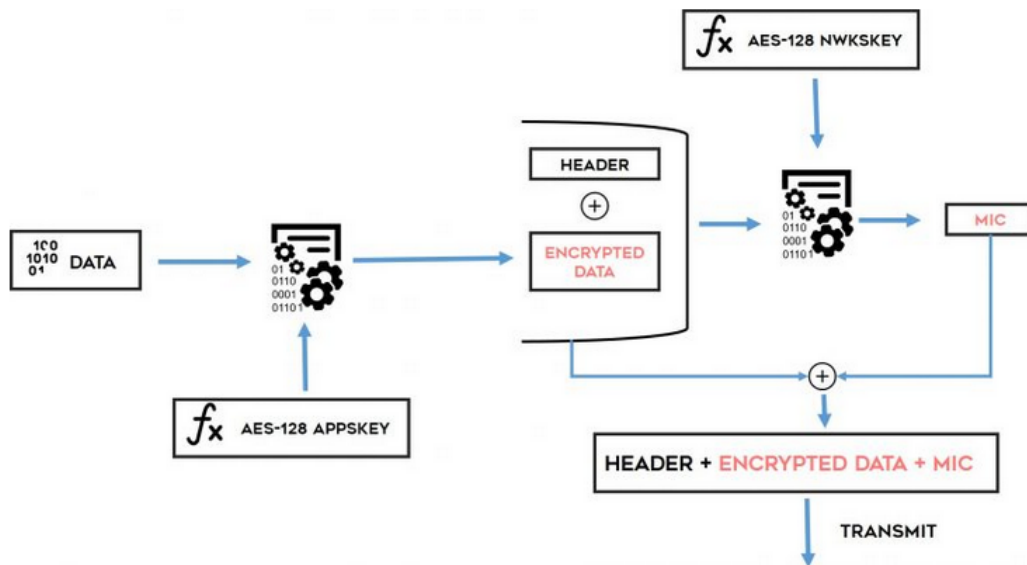


Abbildung 2.14: LoRaWAN-Nachricht Verschlüsselung [3]

der MIC stimmt, ansonsten werden sie verworfen.

2.2.3 Aktivierung des Endgeräts

Damit ein Endgerät dem LoRaWAN-Netzwerk hinzugefügt werden kann, muss es erst spezifiziert und aktiviert werden. Die Aktivierung eines Endgeräts kann auf zwei Arten erfolgen, entweder per Over-The-Air-Aktivierung (Englisch *Over-The-Air Activation* kurzform **OTAA**), oder per Aktivierung durch Personalisierung (Englisch *Activation By Personalization* kurzform **ABP**), wobei die zwei Schritte der Personalisierung und Aktivierung in einem Schritt erfolgt.

Aktivierung durch OTAA

Damit die Over-The-Air-Aktivierung vollständig wird, müssen Endgeräte zwecks Datenaustausch mit einem Server einem Join-Verfahren folgen. Dieses Verfahren wird auch durchgeführt, wenn es vorkommen würde, dass ein Endgerät die Sitzungsinformationen verloren hat. Bevor ein Endgerät das Join-Verfahren startet, muss er folgende Informationen haben: Eine global eindeutige Endgeräteerkennung (**DevEUI**), eine Anwendungserkennung (**AppEUI**) und ein AES-128-Schlüssel (**AppKey**).

AppEUI: ist 8-Byte-Wert, codiert in Hexadezimalformat und bezeichnet eine Kennung des Anwendungsanbieters.

DevEUI: ist ein 8-Byte-Wert mit hexadezimaler Codierung und bezeichnet die eindeutige Kennung eines Endgeräts. Manche LoRa-Radiomodule beinhalten eine

DevEUI vom Hersteller her. Wenn nicht schon vorhanden, diese kann vom Anwendungsanbieter gesetzt werden.

AppKey: ist ein 16-Byte-Wert in Hexadezimalformat. Wenn ein Endgerät mit OTAA das Netzwerk beitrifft, wird dieser Schlüssel zur Herstellung des NwkSKey und des AppSKey verwendet, um die Netzwerkkommunikation und die Anwendungsdaten zu verschlüsseln und zu prüfen.

Sobald das Endgerät mit diesen Informationen versehen ist, kann es eine Join-Abfrage (**Join request**) am Server schicken. Der Server antwortet mit einer Join-Zustimmung (**Join accept**), wenn das Endgerät dem Netzwerk beitreten darf. Die Join-Accept-Nachricht wird wie ein normales Downlink gesendet aber benutzt zwei unterschiedliche Verzögerungen verglichen mit *RECEIVE_DELAY1* und *RECEIVE_DELAY2* der im Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Verzögerungen. Diese Verzögerungen sind *JOIN_ACCEPT_DELAY1* und *JOIN_ACCEPT_DELAY2*. Dem Endgerät wird keine Antwort geschickt, wenn die Join-Abfrage abgelehnt wurde.

Die Join-Accept-Nachricht enthält ein 3-Byte-Anwendungs-Nonce (*AppNonce*), eine Netzwerkennung (*NetID*), eine Endgerätadresse (*DevAddr*), eine Verzögerung zwischen TX und RX (*RxDelay*) und eine optionale Liste der Kanalfrequenz (*CFList*). Die *DevAddr* und das *AppNonce* sind die wichtigsten Informationen bei einer Join-Accept-Nachricht.

DevAddr: ist eine 4-Byte-Adresse, womit der Server und das Endgerät nach Aktivierung kommunizieren.

AppNonce: ist ein zufälliger Wert oder eine Form einer eindeutigen ID, die vom Netzwerkserver bereitgestellt wird und vom Endgerät verwendet, um den NwkSKey und den AppSKey abzuleiten. Der NwkSKey und der AppSKey werden mit der internen Funktion *aes128_encrypt* (im LoRa-Radiomodul vom Hersteller zur Verfügung gestellt) und wird wie folgt bestimmt [2]:

NwkSKey = *aes128_encrypt*(AppKey, 0x01 | AppNonce | NetID | DevNonce | pad)

NwkSKey = *aes128_encrypt*(AppKey, 0x02 | AppNonce | NetID | DevNonce | pad)

Nun können Endgeräte, die dem Netzwerk beigetreten sind, Informationen mit dem Netzwerkserver austauschen (Uplinks und Downlinks). Abbildung 2.15 beschreibt das oben erläuterte Verfahren.

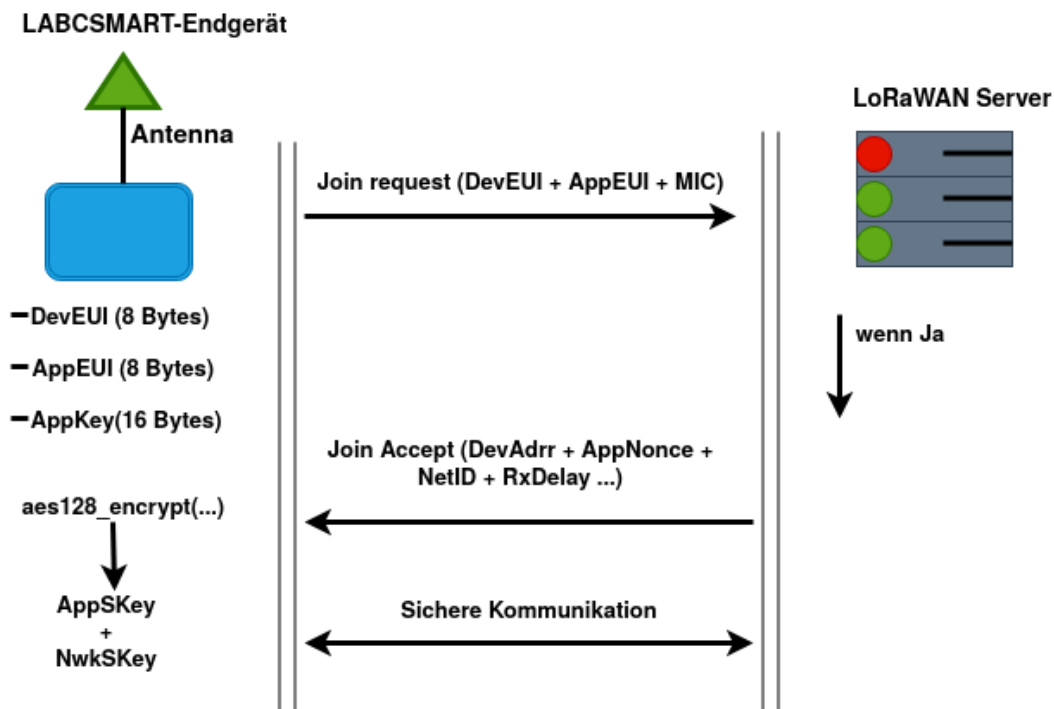


Abbildung 2.15: Join-Request Verfahren

Aktivierung durch ABP

Bei dieser Aktivierungsart, braucht das Endgerät keine Join-Abfrage senden, hier geht es um, eine direkte Bindung eines Endgerät zu einem bestimmten Netzwerk. Das bedeutet, dass die *DevAddr* und die zwei Sitzungsschlüssel (*AppSKey* und *NwkSKey*) an Stelle der *DevEUI*, *AppEUI* und *AppKey*, im Endgerät gespeichert werde. Jedes Endgerät soll einen eindeutigen Satz von *AppSKey* und *NwkSKey*. Das Kompromittieren der Schlüssel eines Geräts sollte die Sicherheit der Kommunikation anderer Geräte nicht beeinträchtigen.

Zusammengefasst ist OTAA komplexer als ABP aber bietet eine höhere Sicherheit. Falls ein Prototyp oder ein kleines Netzwerk erstellt werden soll, ist ABD genug. Wenn es um ein größeres Netzwerk geht, ist OTAA empfohlen, weil es sicherer und agiler ist.

2.2.4 AT Commandos

Nun wissen wir was LoRa und LoRaWAN sind und wie es funktioniert, aber nicht wie Informationen (Appkey, NwkKey und mehr) dem Endgerät zugewiesen werden als auch wie die Daten am Server gesendet werden. Im Kapitel 2.2 wurde das Wort "AT-Befehl" kurz erwähnt, in diesem Abschnitt erfahren Sie was diese Befehle sind und welche gebraucht werden, damit die eine Verbindung per OTAA oder per ABP erfolgreich wird.

Im UNIX-Systemen ist AT ein Kommando, das bewirkt, das andere Kommandos nur einmal ausgeführt werden. Hier ist es benutzt, um das i-nucleo-lrwan1 einzustellen. Da das LoRa-Radiomodul sich nicht selbst einstellen kann, ist auch die Aufgabe des B-L475E-IOT01A 2.1 die Einstellung durchzuführen. Das i-nucleo-lrwan1 verfügt über eine UART-Schnittstelle (Siehe 2.6), um mit dem B-L475E-IOT01A zu kommunizieren. Diese UART-Schnittstelle hat folgende Konsolekonfiguration:

- Baudrate: 115200
- Daten: 8 Bit
- Parität: keine
- Stopbit: 1 Bit

Die Syntax des Kommandos ist wie folgt:

- Allgemeine Kommandos:
 - **AT**: Prüft ob die UART Schnittstelle benutzbar ist
 - **ATE [=enable]**: Aktivieren oder Deaktivieren des lokalen Echos
 - **ATZ**: Modul zurücksetzen
 - **AT+VERB [=enable]**: Ausfallende Antwort aktivieren oder deaktivieren
- LoRa MAC-Kommandos: **AT+Kommando [=parameter]** Die MAC-Kommandos werden hier nicht alle dargestellt, da es zu lang wäre sie alle zu erklären. Zur Erklärung aller Kommandos siehe das AT-Befehlsreferenzhandbuch [18]. Die Zeichen [] bedeuten, dass das Parameter optional ist. Mit Parametern ist ein AT-Befehl wie ein Set-Befehl, und ohne ist es ein Get-Befehl.

Da wir nun wissen, wie diese Kommandos zu nutzen sind, können wir Beispiele für OTAA und ABP machen (diese Einstellungen wurden getestet und funktionieren einwandfrei).

OTAA: Die folgenden AT-Befehle werden von B-L475E-IOT01A nacheinander per UART am i-nucleo-lrwan1 gesendet.

- **AT+BAND=0**: Setzt die Region des Netzwerks (Hier EU868)
- **AT+CLASS=0**: Die Klasse A wird verwendet
- **AT+DC=1**: Deaktiviert den Auslastungsgrad
- **AT+DR=0**: Setzt die TX-Datenrate (LoRa SF12/125KHz 250 Bit/s)
- **AT+RX2DR=0**: Setzt die TX-Datenrate (LoRa SF12/125KHz 250 Bit/s)
- **AT+RX1DT=1000**: Setzt die Verzögerung des ersten Empfangsfensters (in ms)
- **AT+RX2DT=2000**: Setzt die Verzögerung des zweiten Empfangsfensters (in

ms)

- **AT+JRX1DT=5000**: Setzt die Verzögerung des zweiten Empfangsfenster (in ms)
- **AT+JRX2DT=6000**: Setzt die Verzögerung des zweiten Empfangsfenster (in ms)
- **AT+RF=14,8671000000,12,0,1**: Konfiguriert das LoRa-Radiomodule. Ausgangsleistung: 14dBm, Frequenz: 867.1MHz, Spreading factor: SF12, Bandbreite: 125KHz, Cyclic Codingrate: 4/5.
- **AT+APPEUI=ABC123ADF135CBD8**: Setzt die AppEUI
- **AT+AK=00112233445566778899AABBCCDDEEFF**: Setzt den AppKey
- **AT+JOIN=1**: Sendet eine Join-Abfrage als OTAA

ABP: Die Folgenden AT-Befehle werden von B-L475E-IOT01A nacheinander per UART am i-nucleo-lrwan1 gesendet.

- **AT+BAND=0**
- **AT+CLASS=0**
- **AT+DC=1**
- **AT+DR=0**
- **AT+RX2DR=0**
- **AT+RX1DT=1000**
- **AT+RX2DT=2000**
- **AT+JRX1DT=5000**
- **AT+JRX2DT=6000**
- **AT+RF=14,8671000000,12,0,1**
- **AT+ADDR=12345678**: Setzt die Geräteadresse
- **AT+NSK=1122334455663EAB546829CB361CAB7D**: Setzt den NwkSKey
- **AT+ASK=887766554433BCFACDE52476CA4598BA**: Setzt den AppSKey
- **AT+JOIN=0**: Sendet eine Join-Abfrage als ABP

Daten senden: **AT+SEND=2,Daten,1** Hier werden die Daten durch das Port 2 gesendet. Die Daten müssen in hexadezimaler Format sein, und sollen nicht größer als 64 Bytes sein. Die 1 am Ende steht für die Bestätigung des Datenempfangs.

Im AT-Befehlsreferenzhabdbuch stellt das Appendix 3 Tabellen für die Konfiguration der Datenrate abhängig von der Region zur Verfügung.

3 Gateway und LoRaWAN-Server

Nun ist es möglich ein Endgerät, so einzustellen, dass es fähig ist, Uplinks an einem LoRaWAN-Server zu senden und Downlink vom Server zu bekommen. Aber was ist das LoRaWAN-Server und wozu wird das Gateway benutzt. Diese Fragen werden in diesem Kapitel beantwortet.

3.1 Gateway

Es gibt fertige Gateways auf dem Markt, die man kaufen und direkt einsetzen kann. Für diese Thesis wird ein selbst gebautes Gateway benutzt. Der Grund dafür ist, dass es billiger als fertige Gateway ist, sich ein eigenes zu bauen. Noch dazu steckt eine wissenschaftliche Idee dahinter. Zu wissen, wie ein Gateway gebaut wird, welche Komponenten und welche Software im Spiel kommen.

Ein Gateway ist ein Gerät, das aus mindestens einem Konzentrator, einem Host und einer Netzverbindung zum Internet oder einem privaten Netzwerk (Ethernet, 3G, Wi-Fi), möglicherweise einem GPS-Empfänger besteht. Der Konzentrator ist ein Board, das Funkpakete senden und empfangen kann. Ein Konzentrator basiert auf einem Semtech-Mehrkanalmodem (*SX130x*), einem Transceiver (*SX135x*) und/oder eigenständige Modems mit geringem Stromverbrauch (*SX127x*).

Ein Host ist ein eingebetteter Computer, auf dem die Paketweiterleitung ausgeführt wird. Der Host steuert den Konzentrator über eine SPI-Schnittstelle. Für diese Arbeit ist der Host ein Raspberry-Pi. Ein Gateway kann viele Endgeräte gleichzeitig behandeln. Die Kommunikation zwischen einem Endgerät und einem Gateway ist bidirektional, das heißt das Endgerät sendet dem Gateway Daten, aber kann auch Daten von dem Gateway empfangen.

Die Kommunikation von einem Endgerät zum Gateway ist ein Uplink, während die Kommunikation vom Gateway zum Endgerät ein Downlink ist. Ein Endgerät sendet Uplinks als Broadcast, das heißt die gesendeten Daten werden von allen Gateways des Netzwerks bekommen. Das Gateway leitet das Datenpaket an den Netzwerkserver weiter. Der Netzwerkserver sammelt die Nachrichten aller Gateways, filtert doppelte Daten heraus und bestimmt das Gateway mit der besten Rezeption. Der Netzwerkserver leitet seine Daten zu dem entsprechenden Anwendungsserver, womit der Nutzer

die Sensordaten ansehen und/oder verarbeiten kann.

Bekommt den Netzwerks server eine Antwort vom Anwendungsserver, bestimmt der Netzwerks server welche Gateway benutzt wird, um dem Endgerät die Antwort zu senden (Downlink).

Der Konzentrador kann Funkpakete zwar empfangen und senden, er ist aber nur eine elektronische Komponente und braucht eigentlich eine Software, um empfangene oder zu sendenden Pakete zu bearbeiten. Diese Software heisst LoRa-Paket-Forwarder [12]. Der Paket-Forwarder ist ein Programm, das auf dem Host ausgeführt wird, um Funkpakete, die vom Konzentrador empfangen werden über eine IP/UDP- Verbindung an den Server weiterleitet und sendet die vom Servergesendete Funkpakete weiter. Der Packet-Forwarder kann auch ein netzwerkweites synchrones GPS-Signal senden, das zur Koordination aller Endgeräte des Netzwerks verwendet wird.

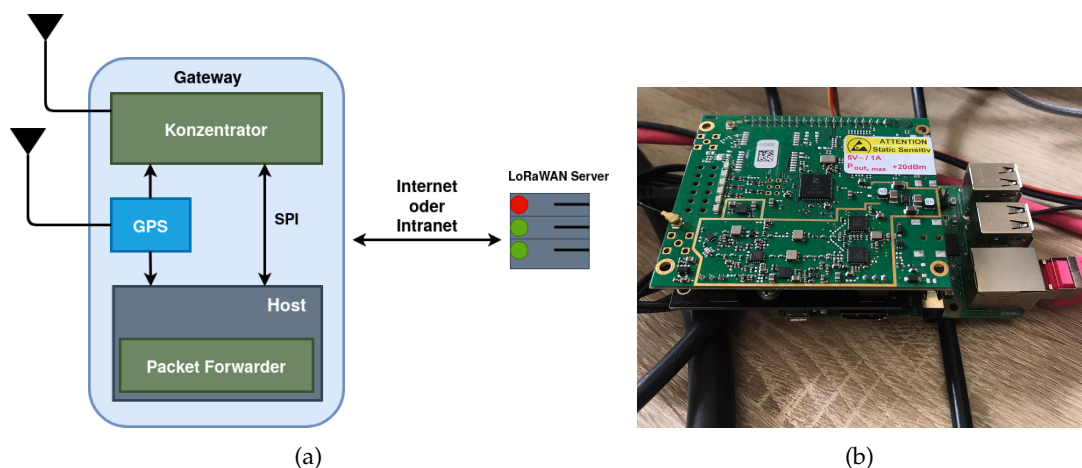


Abbildung 3.1: LABCSMART LoRaWAN Gateway

Abbildung 3.1(a) zeigt die Netzwerkkomponenten, beginnend mit dem Gateway und seinen Bestandteilen. Es ist deutlich zu sehen, dass das der Konzentrador und der Host durch einer SPI-Schnittstelle verbunden sind und die Verbindung zwischen dem Gateway und dem Server das Internet oder Intranet ist. Unser Prototyp 3.1(b) ist alles in einem einzigen Modul. Das heisst, der Konzentrador, das Gateway und der Server zusammen in einem Block eingebaut sind. Der Raspberry-Pi ist gleichzeitig der Host und der Server.

3.2 Einstellung des LoRaWAN-Servers

3.3 MQTT broker zur Datenübertragung

4 Software-Entwicklung

4.1 Entwicklungsumgebung

4.1.1 Eclipse

4.1.2 Libopencm3 Bibliothek installieren

4.2 Sensoren Auslesen

4.3 LoRa Commandos senden

5 Fazit

5.1 Zusammenfassung

5.2 Ausblick

Literaturverzeichnis

- [1] 120 lora / lorawan range world record attempt. will i succeed? 2017. https://www.youtube.com/watch?v=adhWIo-7gr4&list=PL3XBzmAj53Rkkogh-lti58h_GkhzU1n7U&index=6&t=506s.
- [2] LoRa Alliance. What is lorawan. 2020. <https://loro-alliance.org/resource-hub/what-lorawanr>.
- [3] Ali Benfattoum. De la technologie lora au reseau lorawan. 2016. <https://www.frugalprototype.com/technologie-lora-reseau-lorawan/>.
- [4] Warren Gay. *Beginning STM32. Developing with FreeRTOS, libopenm3 and GCC*. 2018. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-3623-9>.
- [5] Petr Gotthard. Compact server for private lorawan networks. 2016. <https://github.com/gotthardp/lorawan-server/tree/master/doc>.
- [6] Brian Gough. *An Introduction to GCC for the GNU Compilers gcc and g++*. Network Theory Limited, Bristol UK, 2005. <http://www.network-theory.co.uk/gcc/intro/>.
- [7] libopenm3. libopenm3 lowlevel open-source library for arm cortex mcus. 2013. <https://github.com/libopenm3>.
- [8] Muhammad Ali Mazidi, Shujen Chen, and Eshragh Ghaemi. *STM32 ARM Programming for Embedded Systems. Using C language with STM32F4 ARM*. 2014.
- [9] Richard Reese. *Understanding and using C pointers*. O'Reilly Media, Sebastopol, 2013.
- [10] Mickael Remond. *Erlang Programming*. 2003.
- [11] saleae. Debug hardware like the pros with the logic analyzer you will love. 2020. <https://www.saleae.com/>.
- [12] Semtech. Lora network packet forwarder project. 2013. https://github.com/Lora-net/packet_forwarder.

- [13] STMicroelectronics. Capacitive digital sensor for relative humidity and temperature. STMicroelectronics, 2018. <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/hts221.html#resource>.
- [14] STMicroelectronics. inemo inertial module: always-on 3d accelerometer and 3d gyroscope. 2018. <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/lsm6dsl.html#resource>.
- [15] STMicroelectronics. Discovery kit for iot node, multi-channel communication with stm32l4. 2019. <https://www.st.com/en/evaluation-tools/b-1475e-iot01a.html#resource>.
- [16] STMicroelectronics. dm00083560-stm32l47xxx-stm32l48xxx-stm32l49xxx-and-stm32l4axxx-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics. 2019. <https://www.st.com/en/evaluation-tools/b-1475e-iot01a.html#resource>.
- [17] STMicroelectronics. Usi lora expansion board for stm32 nucleo. 2019. <https://www.st.com/en/evaluation-tools/i-nucleo-lrwan1.html#resource>.
- [18] USI. Wm-sg-sm-42 at command reference manual. 04 2018. https://github.com/USIWP1Module/USI_I-NUCLEO-LRWAN1/tree/master/preloaded_firmware.