

# Bachelorarbeit

Benedict Heidmeyer

Notfall-Seecontainer-Positionssystem in einem dezentralen  
Netzwerk

Benedict Heidmeyer

# Notfall-Seecontainer-Positionssystem in einem dezentralen Netzwerk

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

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Ulrike Steffens  
Zweitgutachter: Prof Dr. Rüdiger Weißbach

Eingereicht am: 04. Dezember 2020

**Benedict Heidmeyer**

**Thema der Arbeit**

Notfall-Seecontainer-Positionssystem in einem dezentralen Netzwerk

**Stichworte**

Seecontainer, dezentrales Netzwerk, Havarie, MSC Zoe

**Kurzzusammenfassung**

In den letzten Jahren ist der Containerverkehr global stetig gestiegen. Containerschiffe werden immer größer, um den weltweiten Bedarf an Gütern zu befriedigen. Gleichzeitig steigt auch das Risiko einer Havarie und somit die Umweltschäden durch verloren gegangene Container auf dem Meer. Suchaktionen, zum Wiederauffinden der Container sind teuer und kosten Zeit. Aus diesem Grund muss an einer Lösung gearbeitet werden, die das Wiederauffinden vereinfacht.

Das Ziel dieser Arbeit ist es zu verifizieren, was nötig ist um eine Lösung zu entwickeln, die die Zeit zum Auffinden der Container verringert. Um das Ziel zu erreichen ist der Ansatz über ein dezentrales Netzwerk gewählt worden, in dem die Container die Knotenpunkte darstellen.

Ausgangspunkt ist die aktuelle technische Lage und die bereits vorhandenen technischen Lösungen. Wichtig ist es herauszufinden, in wie weit bestehende Technik Lösungen bereitstellt und diese soweit zu verbessern, dass das Ziel erreicht wird.

Des Weiteren ist ein Protokoll zur Kommunikation entwickelt worden, damit die bestehende Technik das Ziel optimal erfüllt.

Das Ergebnis zeigt eine Realisierbarkeit eines dezentralen Netzwerkes zwischen den Containern und eine Verringerung der Zeit zwischen Verlust und Wiederauffinden im Meer.

**Benedict Heidmeyer**

**Title of Thesis**

Emergency-Seacontainer-Positioningsystem in a decentralised network

**Keywords**

**Abstract**

In recent years, container traffic has steadily increased globally. Container ships are getting bigger and bigger to satisfy the worldwide demand for goods. At the same time, the risk of an accident and thus the environmental damage caused by lost containers on the sea. Searches to find the containers are expensive and take time. For this reason a solution is necessary to work on a solution which makes the locatability of lost containers easier.

The goal of this work is to verify what is needed to develop a solution that reduces the time between lost and locatability of the containers. To achieve this goal, the approach of a decentralized network has been chosen, in which the containers represent the nodes.

Starting point is the current technical situation and the already existing technical solutions. It is important to find out, to what extent existing technology provides solutions and to improve them to achieve the goal.

Furthermore, a protocol for communication has been developed to ensure that the existing technology fulfills the goal optimally.

The result shows a feasibility of a decentralized network between the containers and a reduction of the time between loss and retrieval in the sea.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>9</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>10</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>11</b>
1.1 Motivation . . . . .	11
1.1.1 Havarie der MSC Zoe am 04.01.2019 . . . . .	11
1.1.2 Warum eine Lösung wichtig ist . . . . .	12
1.2 Aufbau . . . . .	12
<b>2 Annahmen Lösung</b>	<b>14</b>
<b>3 Umgebung</b>	<b>16</b>
3.1 Betroffene bei einer Havarie . . . . .	16
3.1.1 Reeder . . . . .	16
3.1.2 Versicherung . . . . .	16
3.1.3 Charterer . . . . .	17
3.1.4 Land / Regierung . . . . .	17
3.2 Bestehende Technologien zur Ortung . . . . .	17
3.2.1 Satellite Tracker . . . . .	18
3.2.2 LoRa / LoRaWAN . . . . .	18
3.2.3 GSM Tracker . . . . .	20
3.2.4 Sonar . . . . .	24
3.2.5 Sicht . . . . .	25
<b>4 Entwicklung / Hardware</b>	<b>26</b>
4.1 Komponenten . . . . .	26
4.1.1 Mikrocontroller . . . . .	26
4.1.2 Funkmodul 2.4 GHz ISM . . . . .	27
4.1.3 LoRa / RYLR896 . . . . .	27

4.1.4	GPS . . . . .	28
4.1.5	Gyroscope . . . . .	28
4.1.6	SD Card . . . . .	28
4.2	Positionierung . . . . .	29
4.3	Stromverbrauch . . . . .	30
4.3.1	Stromverbrauch im Dauerbetrieb . . . . .	30
4.3.2	Stromverbrauch im Standby Betrieb . . . . .	31
4.3.3	Stromspeicher und Wiederaufladen . . . . .	31
<b>5</b>	<b>Protokolleigenschaften</b>	<b>34</b>
5.1	Static Mode . . . . .	34
5.2	Dynamic Mode . . . . .	35
5.3	Netzwerke . . . . .	36
5.3.1	Clusternetz . . . . .	36
5.3.2	Transportnetz . . . . .	36
5.4	Aufbau des Kopfdatenbereichs (Paket Header) . . . . .	36
5.5	Größe der Sendepakete (MTU) . . . . .	37
5.5.1	LoRa . . . . .	38
5.5.2	2,4 GHz ISM Band . . . . .	38
5.6	Eindeutigkeit der Senderadresse . . . . .	38
5.7	Routing-Tabelle . . . . .	38
5.7.1	Aufbau der Routing-Tabelle . . . . .	39
5.7.2	Nächstes Gateway / static Node . . . . .	40
5.7.3	Message Types zur Kommunikation in Routing-Tabelle . . . . .	40
5.7.4	Update der Routen . . . . .	40
5.7.5	Aktualisierung der Routen . . . . .	41
5.7.6	Austausch der Routen . . . . .	41
5.8	Node Positioning Table (NPT) . . . . .	43
5.8.1	Optionale Parameter im Header . . . . .	43
5.8.2	Payload zum Austausch des NPT . . . . .	43
5.9	Node Information Table (NIT) . . . . .	45
5.9.1	Basis Containerinformationen . . . . .	46
5.9.2	Codierung Containerinformationen . . . . .	47
5.9.3	Message Types . . . . .	48
5.9.4	Optionale Parameter im Header . . . . .	48
5.9.5	Paketaufbau . . . . .	48

5.10	Node Time Table (NTT)	49
5.11	Node Event Table (NET)	50
5.11.1	Message Types	51
5.11.2	Optionale Parameter im Header	51
5.11.3	Paketaufbau	51
5.12	Inter Cluster Protocol	52
5.13	Routing	54
5.13.1	Clusternetz und Transportnetz	54
5.13.2	Adressieren eines Ziel Nodes	54
5.14	Finden eines Clusters	54
5.14.1	Cluster-Cluster LOOKUP	55
5.14.2	Node - Cluster LOOKUP	55
5.15	Cluster Bildung	55
5.15.1	Sonneneinstrahlung	56
5.15.2	Zustand der Batterie	56
5.15.3	Anzahl der Leaderships	56
5.15.4	Wie viele Sendeeinheiten sind direkt erreichbar?	57
5.15.5	Berechnung des Leadershipindex	57
5.15.6	Berechnung gemeinsamer Bewegungsvektor in Bewegung	58
5.16	Redundanz von Daten	58
5.16.1	Senden von Daten im Cluster	58
5.16.2	Vorhalten von Informationen im Cluster	59
5.16.3	Quittierung von Nachrichten durch Statisches Modul	59
5.16.4	Verifizierung der Informationen	59
5.16.5	Löschen von Nachrichten von einem fremden Node	60
5.16.6	Löschen von Nachrichten vom eigenen Node	60
5.17	Austreten aus Cluster	61
5.18	Cluster Auflösung	61
5.19	Notfall - Erkennung und Handeln bei Havarie	61
5.20	Einschränkungen des Protokolls	62
<b>6</b>	<b>Anwendung des Moduls</b>	<b>63</b>
6.1	Praktischer Test Unterwasserkommunikation	63
6.1.1	Versuchsaufbau	63
6.1.2	Ablauf	64
6.1.3	Ergebnis / Schlussfolgerung	64

6.2	Praktischer Test Funk durch Metall mit LoRa . . . . .	64
6.2.1	Versuchsaufbau . . . . .	64
6.2.2	Ablauf . . . . .	65
6.2.3	Ergebnis / Schlussfolgerung . . . . .	65
<b>7</b>	<b>Ergebnis</b>	<b>66</b>
7.1	Einschränkungen und Lösungen . . . . .	66
7.1.1	Technische Einschränkungen . . . . .	66
7.1.2	Einschränkung Sendeleistung . . . . .	67
7.1.3	Lösung für Sendeleistung . . . . .	67
7.2	Berechnung der Reichweite . . . . .	67
7.3	Modul in der Praxis . . . . .	69
7.4	Schlusswort . . . . .	69
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>71</b>
	<b>Verzeichnis der Webadressen</b>	<b>72</b>
	<b>A Anhang</b>	<b>76</b>
	<b>Selbstständigkeitserklärung</b>	<b>77</b>



# Abbildungsverzeichnis

3.1	Produktkosten Tetis Satellitetracker von Satphonestore . . . . .	18
3.2	Weltweite Abdeckung LoRaWAN® . . . . .	20
3.3	Vodafone Netzabdeckung Norddeutschland stand 05.03.2020 . . . . .	21
3.4	Vodafone Netzabdeckung Niederlande, Stand 05.03.2020 . . . . .	22
3.5	Abstand der Transfeighter [MT] zur Küste Stand 05.03.2020 10:55 CET . . . . .	23
5.1	Paket Header . . . . .	36
5.2	Header . . . . .	41
5.3	Payload Routing-Tabelle Inter-Cluster . . . . .	41
5.4	Payload Routing-Tabelle Intra-Cluster . . . . .	42
5.5	Optionaler Parameter Node Information Table Header . . . . .	48
5.6	Inter-Cluster Payload des Node Information Tables . . . . .	48
5.7	Intra Cluster Payload des Node Information Tables . . . . .	49
5.8	Node Time Table . . . . .	49
5.9	Optionaler Header Node Time Table . . . . .	49
5.10	Optionaler Parameter Node Event Table Header . . . . .	51
5.11	Inter-Cluster Payload des Node Event Tables . . . . .	51
5.12	Intra Cluster Payload des Node Event Tables . . . . .	52
5.13	Paket Intra Cluster Sensorupdate . . . . .	59
7.1	MSC Zoe Infografik - Foto: MSC . . . . .	68

# Tabellenverzeichnis

4.1	Stromverbrauch Module im Dauerbetrieb . . . . .	30
4.2	Stromverbrauch Module im Standby Betrieb . . . . .	31
5.1	Aufbau Node Information Table . . . . .	45
5.2	Containerinformationen nach ISO 6346 . . . . .	46
5.3	Containerinformationen nach ISO 6346 . . . . .	48
5.4	Aufbau Node Event Table . . . . .	50

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

### 1.1.1 Havarie der MSC Zoe am 04.01.2019

2. Januar 2019: Ein Sturm weht über die Nordsee. Über das Frachtschiff MSC Zoe – und reißt hunderte Container von Bord. Container, die unzählige Waren enthalten. Unter anderem auch Lithium Ionen Akkus und Chemikalien für die Kunststoffverarbeitung. Ein Aufschrei geht durch die Medien. Wie kann so etwas in 2019 noch passieren? Mit der Technik, die uns zur Verfügung steht? Wieso hat die Küstenwache nicht schneller reagiert? Erst nach vier Stunden sei dem Kapitän aufgefallen, dass Container über Bord gegangen seien. [4]

Am 19.09.2019 wurde die Suche nach den Containern entgültig eingestellt. Deutschland wolle eine klare Feststellung und den Fall abschließen, was dazu führte, dass die restlichen Container wohl auf Ewigkeit auf dem Grund oder unter der Wasseroberfläche der Nordsee bleiben werden. Am Anfang ging man noch von 271 Containern aus bis man diese Zahl im April um 51 Container erhöhte. Es dauerte 3 Monate bis die konkrete Zahl der verlorenen Container bekannt gewesen ist. Wie soll eine Suche nach etwas möglich sein, wenn man nicht genau weiß nach was gesucht wird?

Laut Angaben der HAZ übernimmt der Reeder MSC die vollen Kosten der Reinigung. [25] Darunter fallen sowohl die Suche nach den Containern als auch die Reinigungskosten für die Strände Deutschlands und den Niederlanden.

### 1.1.2 Warum eine Lösung wichtig ist

Unfälle passieren und sind nicht zu vermeiden. Aus diesem Grund sind auch Havarien auf Containerschiffen kaum zu vermeiden. Was jedoch vermindert werden kann, sind die daraus resultierenden Schäden. Treibende Container die kurz unter der Wasseroberfläche treiben, sind eine Gefahr für Kutter und Küstenfischer. [10]

Im Jahr 2007 verlor ein Containerschiff im Rhein mehrere Container. Die Aufräumarbeiten hielten mehrere Tage an und blockierten die Schifffahrt. [14] Bei der MSC Zoe ging die Suche über 9 Monate und der Schaden ging in die Millionenhöhe. Verdrehte Strände und ausgelaufene, giftige Substanzen gelangten in die Umwelt. Es ist also unumgänglich, solche Schäden zu verringern. Der Fokus dieser Arbeit liegt darauf eine Lösung zu erarbeiten, um die wirtschaftlichen und umweltlichen Schäden einer Havarie zu minimieren. Zusätzlich wird validiert, ob diese Schäden durch eine technische Lösung gemindert werden können.

## 1.2 Aufbau

Die Arbeit gliedert sich in drei Teilbereiche auf, welche sich auf Design Science von Hevner zurückführen lassen.

### **Teil 1 Die Motivation und die Vorstellung der Beteiligten**

Im ersten Teil werden alle Beteiligten vorgestellt, die im Falle einer Havarie entweder aktiv oder passiv an der Bergung oder dem Schaden beteiligt sind. Zudem werden die bestehenden Technologien vorgestellt, die für die Wiederauffindbarkeit der Container beitragen. Auf Basis der menschlichen und technischen Ausgangsposition wird eine neue Lösung entwickelt. Die Anforderung an die Lösung ist eine Verbesserung der aktuellen Lage durch eine technische Optimierung. Teil 1 umfasst das Kapitel 1

### **Teil 2 Die Erarbeitung der Lösung**

Im zweiten Teil (Kap.3, Kap.4, Kap.5) werden am Anfang alle Bestandteile erklärt, die zu einer neuen Lösung beitragen können. Sie dienen als Grundlage für die Erarbeitung einer neuen Lösung. Zusätzlich wird eine mögliche Verhaltensweise erläutert.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit Annahmen darüber, wie die Welt aussehen müsste, damit das Problem nicht mehr auftritt. Hierunter zählen die Technik, die Politik und die Wirtschaft. Die Abschnitte zu Wirtschaft und Politik dienen zur Vollständigkeit, es wird aber

kein Fokus darauf gelegt. Im Kapitel 4 wird auf die Entwicklung der Technik detaillierter eingegangen. Wie sollte die Hardware aussehen und wo muss die Hardware sich auf dem Container befinden.

Schlussendlich wird in Kapitel 5 für das Verhalten der Hardware ein Kommunikationsprotokoll vorgestellt. Durch diese Logik wird es erst möglich die Lösung zu entwickeln.

### **Teil 3 Die Validierung**

Kap.6, Kap.7 Im dritten und letzten Teil wird die entwickelte Lösung mit den aus Kap 2 und 3 beschriebenen Umständen verglichen und validiert. Lässt sich die Lösung in die Realität umsetzen und ist sie wirtschaftlich.

## 2 Annahmen Lösung

In diesem Kapitel wird erläutert wie eine gute Lösung aussehen kann. Es werden die Bereiche Technik, Politik und Wirtschaft betrachtet und in diesen Bereichen ein Szenario dargestellt, was im Falle einer Havarie eintreten müsste. Die Bereiche wurden gewählt, da nur ein Zusammenspiel von Technik, Politik und Wirtschaft eine Lösung bieten kann.

Für eine Gewährleistung einer schnellen Wiederauffindbarkeit, wird ein System benötigt welches folgende Eigenschaften mitbringt:

Zum einen bedarf es eines Positionssystems, zur Standortbestimmung des Containers. Jedoch reicht eine einfache Positionserkennung nicht aus, diese muss auch an einen Empfänger übertragen werden. Dies geschieht über Transponder mit einer gewissen Reichweite. Anzunehmen wären hier Funk über Mobilfunknetz oder Satellit, oder direkten Schiffsfunk. Nachteil bei Satelliten sind die hohen Übertragungskosten. Gerade wenn man erkennen möchte, ob ein Container über Bord gegangen ist, ist es erforderlich alle Container mit einem Positionssystem auszustatten. Neben der reinen Positionssensorik bedarf es auch noch eines Sensors, der das Fallen oder die Neigung des Containers erkennt. Neigt sich der Container stark oder hat er eine zu hohe Fallgeschwindigkeit, kann man von einem Sturz des Containers auf dem Schiff ausgehen und unverzüglich handeln. Laut Angaben von [www.hamburg-container.com](http://www.hamburg-container.com) [3] sind 38 Mio. Container weltweit im Umlauf. Würde man alle Container mit einem Transponder ausstatten und dieser Transponder hätte einen Verkaufspreis von 1.000 €, läge die Gesamtinvestition bei 38 Mrd. €. Angenommen jedes Jahr tritt eine Havarie auf und diese kostet dem Reeder 1 Mrd. €, um die Schäden zu beheben, könnte dieser 38 Jahre einen Schaden verursachen bis sich die Positionssysteme rentiert haben. Zusätzlich würden noch Kosten für die digitale Übertragung der Daten auftreten.

Aus diesen Gründen darf die Lösung selbst nur einen geringen Herstellungs- und Supportkosten aufweisen. Unter den Supportkosten fallen Übertragungskosten, z. B. via Satellit oder Mobilfunknetz und die Instandhaltung der Technik am Container selbst. Würde man zusätzlich jedes mal wenn der Container für den Einsatz mit Waren gefüllt wird zusätzlich mit Technik ausgestattet werden, müsste man Personal schulen, damit diese

die Technik richtig anbringen und installieren. Dieser Arbeitsschritt sorgt auf der einen Seite für einen höheren Aufwand menschlichen Handels und zum anderen auch für ein höheres Risiko menschlichen Versagens. Aus diesem Grund muss die Technik fest am Container verbaut werden.

## 3 Umgebung

### 3.1 Betroffene bei einer Havarie

#### 3.1.1 Reeder

Ein Reeder besitzt die Schiffe und stellt dem Charterer die Crew, den Kapitän und ein funktionierendes Schiff zur Verfügung. [29]

Bei der Havarie der MSC Zoe am 2.1.2019 übernahm die Reederei MSC sämtliche Kosten, die bei der Reinigung aufgetreten sind. Wie in der Einleitung bereits beschrieben, hielten die Such- und Reinigungsarbeiten bis in den Herbst 2019 an. Die Such- und Reinigungsarbeiten müssen Milliarden gekostet haben und sie waren nicht sonderlich erfolgreich.

#### 3.1.2 Versicherung

Zum Schutze der Ladung kann diese komplett versichert werden. Im Falle einer Havarie, z. B. beim Auflaufen auf eine Sandbank oder wie im Falle der MSC Zoe der Verlust der Container.

Man spricht bei einer Containerversicherung, die alle Gefahren umfasst von einer Allgefahrenversicherung. Diese umschließt alle Risiken, die während eines Transportes auf der ganzen Welt auftreten können. Reinigungskosten müssen zusätzlich versichert werden. [6]

Durch die in dieser Arbeit aufgezeigte Lösung können Versicherungen auf konkrete Daten zurückgreifen, wie Position, Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Neigung.

So ließen sich Policen anders aufbauen und eventuell günstiger verkaufen. Wäre es also möglich, dass unbeschädigte Container rechtzeitig geborgen werden könnten, so würden



auf die Versicherung nur die Kosten der Bergung zukommen und nicht die Kosten eines Kompletverlustes.

#### 3.1.3 Charterer

Charterer sind die Unternehmen, die ein Schiff für eine bestimmte Zeit mieten. In diesem Fall wird ein Zeitcharter betrachtet, der ein Containerschiff gechartert hat. Diese Unternehmen mieten das ladefähige und mit einer Crew ausgerüstete Schiff für einen bestimmten Zeitraum vom Reeder. [29]

#### 3.1.4 Land / Regierung

Im Falle einer Havarie ist auch die Regierung der angrenzenden Länder beteiligt und nicht nur die Charterer und Reeder. Die Regierung beteiligt sich durch spezielle Flugzeuge und Schiffe an der Bergung der Container und Säuberung der Umwelt.

In Deutschland gibt es dafür eine gemeinsame Einrichtung der Bundes- und Küstenländern - das Havariekommando. [12] Dieses kümmert sich auch im Havariefall der MSC Zoe um die Suche und Bergung der über Bord gegangenen Seecontainer. Es wird mit speziellen Ölüberwachungsflugzeugen und Mehrzweckschiffen nach den Containern am Meeresboden gesucht. Im Kapitel 3.2.4 wird genauer beschrieben, wie der Vorgang von sonarbasiertem Suchen abläuft.

Land und Regierung können von einer Lösung für das Auffinden der verlorenen Container profitieren, da die Zeitspanne zwischen Verlust und Wiederfinden sich reduziert. Ein schnelles Bergen reduziert Kosten und Umweltschäden.

### 3.2 Bestehende Technologien zur Ortung

In diesem Kapitel werden alle bestehenden Technologien zur Ortung von Seecontainern angesprochen und deren Nachteile im Bezug auf eine Havarie erläutert. Nachdem der Umweltminister Olaf Lies bereits gefordert hat Container mit Peilseindern auszustatten und das Havariekommando die Entwicklungen von Smart Containern unterstützt, muss untersucht werden, ob es bereits eine passende Lösung auf dem Markt gibt. Dazu werden die Technologien Satellit, LoRaWAN<sup>®</sup>, GSM, Sonar und die Sicht ausführlich untersucht

und auf die Lösungsfindung hingehend untersucht. Dabei stellen Satellit, LoRaWAN<sup>®</sup> und GSM (Mobilfunk) die Kommunikationsschnittstellen für die Datenübertragung dar und Sonar und Sicht gelten als aktuelle Maßnahmen zum Wiederauffinden der Container im Havariefall.

### 3.2.1 Satellite Tracker

Dieser Satelliten Tracker arbeitet mit einem Iridium-Satelliten und mit einer weltweiten GSM Verbindung. [33]

Wie man in der Tabelle 3.1 erkennen kann, sind die Kosten für eine Satellitenverbindung sehr hoch. Lediglich der Tetis Hybrid und der Tetis Hybrid R Vertrag bieten eine Verbindung zu einem Iridium Satelliten an. Würde man jeden Container mit einem Tracker ausstatten wären die monatlichen Kosten nicht tragbar. Zusätzlicher Nachteil: Die Tracker haben keine Verbindung zu einem Satelliten, wenn sie verdeckt sind.

	<b>Tetis</b>	<b>Tetis R</b>	<b>Tetis Hybrid</b>	<b>Tetis Hybrid R</b>
<b>Subscription Fee</b>	\$99/Year	\$99/Year	\$279/Year	\$279/Year
<b>Monthly Option</b>	\$9.99/Month	\$9.99/Month	\$24.99/Month	\$24.99/Month
<b>Coverage Area</b>	Worldwide (GSM)	Worldwide (GSM)	Truly Global	Truly Global
<b>GSM Updates</b>	Every 6 Hours	Every 6 Hours	Every 6 Hours	Every 6 Hours
<b>Iridium Updates</b>	N/A	N/A	200/Month	200/Month
<b>Logging</b>	N/A	Every 15 Minutes	N/A	Every 15 Minutes
<b>GSM Alerts</b>	100	100	100	100
<b>Additional Alerts</b>	\$0.03 each	\$0.03 each	\$0.06 each	\$0.06 each
<b>International GSM Roaming</b>	\$10/Month	\$10/Month	\$10/Month	\$10/Month
<b>Programming Fee</b>	\$19.00	\$19.00	\$59.00	\$59.00

Abbildung 3.1: Produktkosten Tetis Satellitetracker von Satphonestore

### 3.2.2 LoRa / LoRaWAN

Im Folgendem wird der LoRaWAN<sup>®</sup> Tracker von Lobarö genauer angeschaut - sowie erklärt, was LoRa<sup>®</sup> und LoRaWAN<sup>®</sup> sind.

LoRa<sup>®</sup> ist die Kurzform für Long Range und beschreibt eine Spread-Spektrum-Modulationstechnik. Diese Modulationstechnik wurde aus der Chirp-Spread-Spektrum-

Technologie (CSS) abgeleitet. Aufgrund seiner Low-Power Arbeitsweise ist es in den letzten Jahren zu einem wichtigen Bestandteil in der Welt des IoT<sup>1</sup> geworden. [35]

LoRaWAN<sup>®</sup> ist ein Low-Power Kommunikationsprotokoll, welches auf LoRa<sup>®</sup> aufsetzt. Es wurde speziell für batteriebetriebene Systeme entwickelt, die eine Übertragungsbereichweite benötigen, jedoch nur geringe Daten übertragen.

Die Website von Semtech beschreibt es mit folgenden Worten:

The LoRaWAN<sup>®</sup> open specification is a low power, wide area networking (LPWAN) protocol based on LoRa<sup>®</sup> Technology. Designed to wirelessly connect battery operated things to the Internet in regional, national or global networks, the LoRaWAN<sup>®</sup> protocol leverages the unlicensed radio spectrum in the Industrial, Scientific and Medical (ISM) band. The specification defines the device-to-infrastructure of LoRa<sup>®</sup> physical layer parameters and the LoRaWAN<sup>®</sup> protocol, and provides seamless interoperability between devices. While Semtech provides the radio chips featuring LoRa<sup>®</sup> Technology, the LoRa<sup>®</sup> Alliance<sup>®</sup>, a non-profit association and the fastest growing technology alliance, drives the standardization and global harmonization of the LoRaWAN<sup>®</sup> protocol. [35]

Der Lobar LoRaWAN<sup>®</sup> GPS-Tracker sendet in dem LoRaWAN<sup>®</sup> mit der LoRa<sup>®</sup> Technologie. Dieser Tracker hat als Sensoren einen Erschütterungs- einen Temperatur- und einen Lagesensor integriert. Zwei AA Batterien versorgen den Tracker mit genug Strom, um diesen über mehrere Jahre laufen zu lassen.

Die Abfrage der Sensordaten passiert getriggert oder zeitgesteuert. Trigger kann zudem auch der Bewegungssensor sein, der bei Erschütterung eine Nachricht sendet.

Wie man der Abbildung 3.2 entnehmen kann bietet LoRaWAN<sup>®</sup> aktuell eine Abdeckung in 58 Ländern. Die gelb eingezeichneten Flächen definieren die Abdeckung von LoRaWAN<sup>®</sup> [20]

Vorteil der LoRa<sup>®</sup> Technologie und dem darauf basierenden LoRaWAN<sup>®</sup> Netz ist die kostenlose Übertragung. Durch die 133 Operators die ein Gateway zum Internet für die Daten zur Verfügung stellen, hat man fast<sup>2</sup> weltweiten Empfang. Zusätzlich muss man sich wegen der energiesparenden Maßnahmen keine Sorge um die Lebensdauer machen.

---

<sup>1</sup>Internet of Things

<sup>2</sup>Die grauen Flächen sind nicht von LoRaWAN<sup>®</sup> abgedeckt

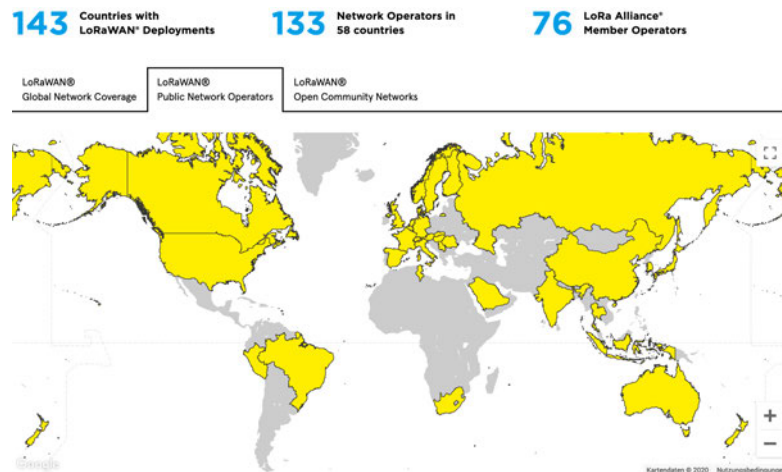


Abbildung 3.2: Weltweite Abdeckung LoRaWAN®

Bei einem aktuellen Preis von 129 EUR pro Tracker [19] liegt dieser in einem erschwinglichen Preisgebiet, so dass mehrere Container damit ausgestattet werden können.

Die Provider, die die Sensordaten entgegennehmen befinden sich nicht auf offener See oder in den Küstenregionen, weswegen LoRaWAN® lediglich eine Abdeckung an Land bietet. Somit kommt eine Nutzung dieses Systems für die Container nicht in Betracht. Jedoch ist die LoRa® Technologie eine Lösung für weite Funkstrecken.

#### 3.2.3 GSM Tracker

Eine weitere Möglichkeit, Container zu orten ist das GSM Netz. Der Hersteller M2M Global Solutions Ltd. bietet einen eigenen GPS-Tracker an. Der von M2M entwickelte GT-BY3 bestimmt die Position (longitude und latitude) über GPS und sendet diese Informationen einmal am Tag via SMS. Bei dieser Übertragungsweise garantiert der Hersteller eine Batterielaufzeit von drei Jahren. Zusätzlich hat der GT-BY3 einen eingebauten Bewegungssensor, der eine SMS oder eine E-Mail versendet, sollte sich der Tracker bewegen.

Preise gibt der Hersteller auf seiner Internetseite nicht an, lediglich eine Anmerkung, dass die GPS-Tracker sich weltweit in das beste Netz einwählen können, um die Daten zu übertragen und das für einen monatlichen Pauschalpreis.



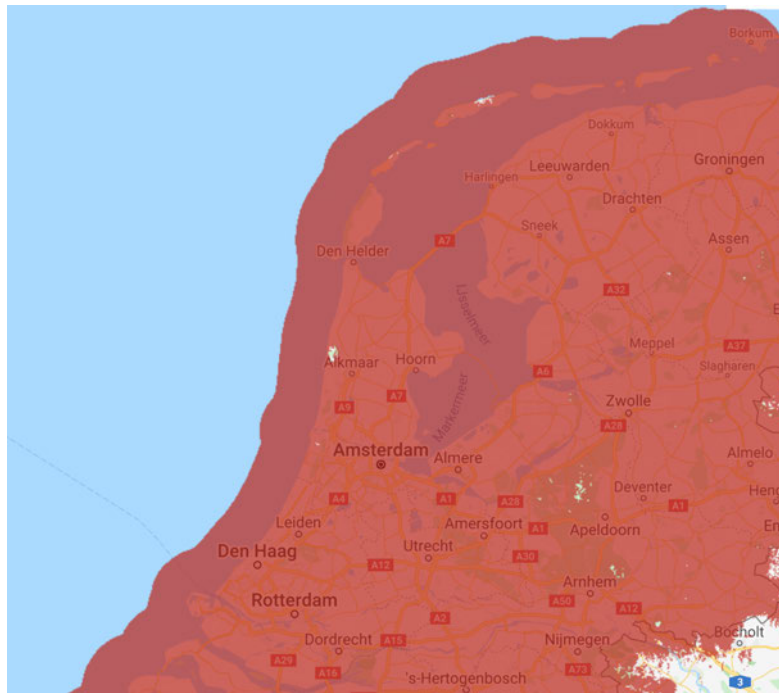


Abbildung 3.4: Vodafone Netzabdeckung Niederlande, Stand 05.03.2020

Wie in Abbildung 3.3 und 3.4 zu erkennen ist, bietet Vodafone eine Teilabdeckung des GSM Netzes der Nordsee an. Dies ermöglicht eine Nutzung des Trackers in diesem Gebiet und so auch eine Ortung von Containern, die einen GSM-Tracker benutzen. [43] Wie die Abbildung 3.4 erkennen lässt, reicht die Abdeckung nicht weit in die Nordsee hinein. Die Vodafone NL bietet auf Internetseite leider keinen Maßstab zur exakten Abmessung des Bereiches an, sodass nur geschätzt werden kann wie weit das Netz in die Nordsee reicht. [44]

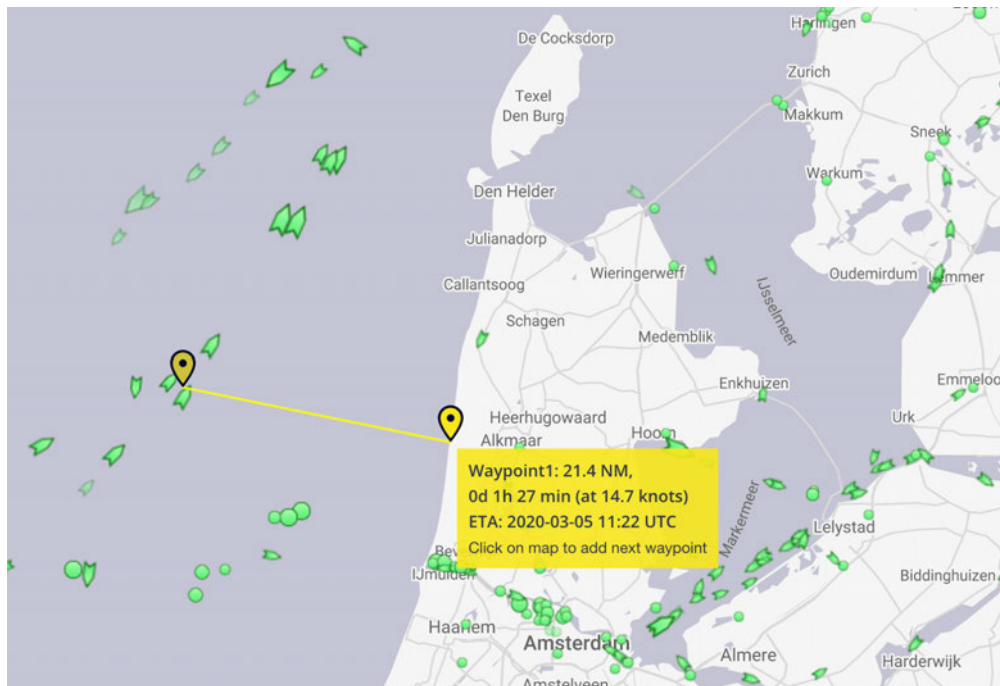


Abbildung 3.5: Abstand der Transfeighter [MT] zur Küste Stand 05.03.2020 10:55 CET

Aus Abbildung 3.4 ist erkennbar, dass die Netzabdeckung in die Nordsee hinein, ungefähr den gleichen Abstand zu Alkmaar aufweist, wie zwischen Alkmaar und Hoorn. Die direkte Entfernung (Luftlinie) zwischen Alkmaar und Hoorn beträgt ca. 20 km<sup>3</sup>. Der kürzeste Abstand zwischen Alkmaar und der Nordseeküsten beträgt ca. 8 km. Daraus lässt sich ableiten, dass das Vodafone Netz in den Niederlanden maximal 12 km in die Nordsee hinausragt.

In der Abbildung 3.5 wurde mit dem Distance Tool von MarineTraffic der Abstand der Transfeighter zur Küste berechnet [23]. Die grünen Punkte stellen die letzte bekannte Position von Cargo Vessels (Containerschiffe) dar. Die Distanz betrug 21,4 Nautical Miles (39,6328 km).

Vergleicht man nun diese 12 km und die Distanz aus Abbildung 3.5 (ca. 40 km) so erkennt man, dass die Seestraße in denen die Containerschiffe fahren, außerhalb der Netzabdeckung ist<sup>4</sup>.

<sup>3</sup>mit Google Maps Distance Calculator berechnet

<sup>4</sup>Der Vergleich beruht auf einer Abschätzung und nicht auf einer exakten Berechnung

Ein weiterer Nachteil ist ebenfalls, dass für jeden Tracker eine SIM-Karte eines Telefonbetreibers benötigt wird, die wiederum weltweit einsetzbar ist. Das ist mit hohen Kosten verbunden. Nach den aktuellen Preisen der Vodafone Deutschland GmbH kostet das Senden einer SMS 0,4601 EUR Netto<sup>5</sup>[45]

Eine Havarie auf See lässt sich so nicht erkennen, aber das System bietet den Vorteil, Container zu erkennen sobald sie in das GSM Netz schwimmen.

#### 3.2.4 Sonar

Gehen Container bei einer Havarie verloren, so werden diese mit Hilfe eines Sonargerätes geortet. Sonar steht für **SO**und **N**avigation **A**nd **R**anging. Bei der Sonar Ortung wird eine Schallwelle erzeugt und das Echo registriert. Die Laufzeit der Schallwelle und des Echos an einem reflektierten Objekt wird dann gemessen und die Distanz zu dem Objekt berechnet. Bei herkömmlichen Sonar Geräten wird der Schall gebündelt und in eine Richtung ausgesendet. Bei dem Seitensichtsonar werden an beiden Seiten eines Sonarschiffes zwei flächenförmige Impulse emittiert. Diese Impulse erzeugen auf Grund von Ihrer großen Fläche eine Vielzahl von Echos. Aus diesen Daten lässt sich ermitteln, ob und in welche Entfernung sich Objekte befinden. [39]

Bei der Havarie der MSC Zoe im Januar 2019 wurden Sonarschiffe eingesetzt, um die gesunkenen Container auf dem Meeresgrund oder im Wasser aufzuspüren. Alle schiffsrelevanten Hindernisse vor den deutschen Nordseeinseln wurden fachgerecht entfernt. Das Aufräumgebiet umfasste ca. 770 m<sup>2</sup>. [9]

Der Nachteil dieser Technologie besteht darin, dass sich nicht bestimmen lässt, ob es sich bei dem erkannten Objekt um den gesuchten Container handelt. Erst nach dem Aussenden des Unterwasserroboters und genauerer Betrachtung kann ein Container identifiziert werden. Ein weiteres Problem stellt die Vielzahl an Objekten dar. Falls sich viele Steine oder andere Gegenstände auf dem Grund befinden sollten, müsste jedes mal der Roboter ausgesendet werden, um das Objekt zu untersuchen. Das zieht die Suche in die Länge.

---

<sup>5</sup>Privatkunden, Selbständige und Freiberufler (ohne Rahmenvertrag)



### **3.2.5 Sicht**

Wie in der Einleitung erläutert, wurde die Suche nach den über Bord gegangenen Containern mit Hilfe von Ölfflugzeugen und Havarieschiffen durchgeführt. Aktuell gibt es keine nicht-technische Möglichkeit, etwas Verlorenes zu Suchen - außer auf Sicht. [13]

## 4 Entwicklung / Hardware

In diesem Kapitel werden die zur technischen Lösung beitragenden Komponenten vorgestellt. Es wird darauf eingegangen, welche Komponenten genutzt werden und wie viel Energie jede einzelne verbraucht. Zu diesen Komponenten zählen der Mikrocontroller STM32L15xUC, ein Near-Field Transceiver, das LoRa<sup>®</sup> Funkmodul RYLR896, ein GPS Sensor und für die Bestimmung der Neigung ein Gyroscope. Dieses Setup ist für die technische Lösung die Grundvoraussetzung.

Außerdem wird darauf eingegangen, wo sich die Hardware auf dem Container befinden sollte, um alle Bedingungen bestmöglich zu gewährleisten, z. B. die Energiegewinnung durch Solar.

### 4.1 Komponenten

Für die in 5 beschriebene Funktionsweise werden hier die Komponenten detailliert beschrieben.

#### 4.1.1 Mikrocontroller

Als Microcontroller wird der STM32L15xUC eingesetzt. Dieser von der Firma ST hergestellte Microcontroller zählt zu den energiesparsamsten. Mit drei SPI und zwei  $I^2C$  Anschlüssen lassen sich alle Sensoren bestens verbinden.

Sein Stromverbrauch beträgt im Normalbetrieb  $185 \mu\text{A} / \text{MHz}$ . Bei einer Geschwindigkeit von 32 MHz liegt der Verbrauch bei  $32 \text{ MHz} * 185 \mu\text{A} = 5,92 \text{ mA}$ . Im Standby Modus mit RTC<sup>1</sup> werden  $1,15 \mu\text{A}$  verbraucht.

---

<sup>1</sup>Real Time Clock

### 4.1.2 Funkmodul 2.4 GHz ISM

Für die Kommunikation zwischen den Nodes innerhalb eines Clusters, oder auch wenn static Nodes<sup>2</sup> in Reichweite sind wird das nRF24L01+ Funkmodul verwendet. Der Vorteil von diesem Modul sind die eingebauten Interrupts. So kann der Mikrocontroller in den DeepSleep<sup>3</sup> Modus wechseln, wenn keine Sensordaten aggregiert, oder Daten ausgetauscht werden. Der Mikrocontroller wird dann geweckt, falls eine Nachricht, die für ihn bestimmt ist, eintrifft. [28]

Die Versorgungsspannung liegt bei dem Modul zwischen 1,9 V und 3,6 V. Jedoch können die Pins mit 5 V betrieben werden, wodurch man diese einfach mit dem Board verbinden kann, ohne einen Level-Shifter<sup>4</sup> zu benutzen.

Der Energieverbrauch beträgt bei Übertragungen 12 mA, 26  $\mu$ A im Standby Modus und 900 nA im Power Down Modus.

### 4.1.3 LoRa / RYLR896

Das RYLR896 wird die Kommunikation bei weiteren Distanzen aufbauen. Durch seine LoRa Modulation kann eine Reichweite von bis zu 15 km erreicht werden. Die RF Output Power Range liegt bei 15 dBm. Das RYLR896 Modul hat eine Semtech SX1276 Engine eingebaut, der die LoRa Modulation integriert hat. Der Vorteil dieses Chips ist, dass die Kommunikation bereits mit AES128 verschlüsselt ist und eine Übertragungssicherungsschicht eingebaut ist. Das bedeutet, Pakete werden im Falle eines Verlustes neu verschickt und bestätigt. Zusätzlich können Empfänger direkt adressiert werden. Nachteil an diesem Modul ist, dass Adressen nur von 0 - 65535 vergeben werden. Damit können nicht alle Module abgedeckt werden, jedoch unterschiedliche Netzwerk IDs vergeben werden (0 - 15), was wiederum den Adressbereich erweitert. Laut DataSheet ist die NetzwerkID = 0 und die public ID von LoRaWAN<sup>®</sup>. Zur Vermeidung von Interferenzen sollte von einer Nutzung abgesehen werden.

Beim Senden verbraucht das Modul 43 mA und beim Empfangen 16,5 mA. Im Deep Sleep Modus verbraucht es lediglich 0,5  $\mu$ A. Dieses Modul kann keine Interrupts bei

---

<sup>2</sup>siehe 5

<sup>3</sup>Zustand in dem kaum Operationen durchgeführt werden und somit kaum Strom verbraucht wird

<sup>4</sup>Pegelwandler werden verwendet um Spannungen zu wandeln z.B. 0 V/5 V auf -13 V/13 V

einkommenden Nachrichten geben. Der Mikrocontroller muss dauerhaft laufen, damit auf Nachrichten reagiert werden kann.

Der aktuelle Rekord mit dem SX1276 liegt bei 702 km [22] und wurde vom TheThings-Network am 26.08.2017 aufgestellt. [32]

### 4.1.4 GPS

Zur Standortbestimmung wird ein NEO 6M GPS Modul von ublox eingesetzt. In maximal 32 Sekunden<sup>5</sup> wird eine Verbindung zu GPS Satelliten aufgebaut. Die Position mit einer Genauigkeit von 2,5 m ermittelt. Die Ansteuerung läuft via SPI direkt an das Board. Besteht eine Verbindung zu einem Satelliten hat dieses Board einen maximalen Stromverbrauch von 100 mA. Aufgrund dieses hohen Stromverbrauches sollte das Modul nicht dauerhaft laufen, sondern nur gelegentlich der Standort abgefragt werden. [27] So kann eine lange Batterielaufzeit gewährleistet werden.

### 4.1.5 Gyroscope

Für die Detektierung eines freien Falls oder einer Schiefelage wird der MMA7660F von Freescale eingesetzt. Dieser Chip lässt sich auf eventgesteuerte Interrupts programmieren. Durch diesen Interrupt<sup>6</sup> lässt sich wiederum der Microcontroller starten und dieser übermittelt den aktuellen Standort.

Dabei liegt der Stromverbrauch im Betrieb lediglich bei maximal  $294\mu\text{A}$ <sup>7</sup> und im Standby Modus bei  $2\mu\text{A}$ . [24]

### 4.1.6 SD Card

Zur Speicherung aller relevanten Informationen wird die SD-Card von SanDisc eingesetzt. Auf dieser lassen sich vergangene Positionsdaten und wie unter Kapitel 5 beschrieben, die Informationen über Routing-Tabelle und Teilnehmer speichern.

---

<sup>5</sup>Diese Angabe bezieht sich auf einen Kaltstart

<sup>6</sup>Hardwaregesteuertes Signal, dass das laufende Programm unterbrechen kann [15]

<sup>7</sup>Output Data Rate (ODR) = 120 / Aktualisierungsrate 120 Hz

## 4.2 Positionierung des Moduls am Container

Durch das Metall am Container wird die Sendeleistung enorm eingeschränkt. Metall besitzt eine so hohe Dämpfung, dass Signale innerhalb des Containers schlecht nach außen gelangen. Aus diesem Grund darf das Modul nicht innerhalb des Containers sitzen sondern außerhalb, um auch die Schiff-zu-Schiff Kommunikation zu erhöhen. Im Kapitel 6.2 wird die Dämpfung von Schiffscontainern genauer untersucht.

Die angebrachten Solarzellen für die Stromversorgung können innerhalb des Containers keine Sonnenenergie zu Strom wandeln. Aus diesem Grund ist der beste Platz für die Module auf dem Dach des Containers.

Wie in Kapitel 5 beschrieben, wird ein Leader eines Clusters danach ausgewählt, ob er Sonneneinstrahlung hat. Module die sich als Member im Cluster befinden, müssen so weniger senden und haben somit eine längere Batterielaufzeit, als der Leader. Somit ist es vernachlässigbar, ob dieses Modul direkte Sonneneinstrahlung hat. Die Batterie hat genügend Energie für die Kommunikation, dass ein Stapeln der Container kein Problem darstellt. In Kapitel 4.3 wird detaillierter auf die Batterielaufzeit eingegangen.

Ein weiterer Vorteil, das Modul auf das Dach des Containers zu setzen, ist die Unscheinbarkeit. Es fällt schlechter auf und ist somit vor Handlungen mit böser Absicht geschützt, z.B. Diebstahl.

## 4.3 Stromverbrauch und Akkulaufzeit der Sendeeinheit

### 4.3.1 Stromverbrauch im Dauerbetrieb

Modul	Stromverbrauch	Beschreibung
STM32L15XUC	5,92mA	
NEO6M	10mA	
MMA7660FC	47 $\mu$ A	
RYLR896 (SX1276)	1,5mA	Dieser Wert bezieht sich auf den IDLE Modus des SX1276 Chips
nRF24L01	13,5mA	
SDCard	100mA	Dieser Wert bezieht sich auf den Lese-/Schreibvorgang der SanDisc microSD Card[34]

Tabelle 4.1: Stromverbrauch Module im Dauerbetrieb

Realistisch betrachtet wird nur kurzzeitig auf der SD-Karte geschrieben oder gelesen. Aus diesem Grund lassen sich die Lese-/Schreibzugriffe zeitlich auf 1% reduzieren.

Auch die Sendezeit des RYLR896 ist beschränkt auf 0,1% [8].

Daraus ergibt sich folgende Rechnung:

$$\sum_{i=1}^n F_i * Bestandteile_i = I_{ges}$$

$$5,92mA + 10mA + 0,047mA$$

$$+ 0,001 * 1,5mA + 13,5mA + 0,01 * 100mA = 30,4685mA$$

Auf ein Jahr hochgerechnet ergibt sich

$$I_{ges} * t_{Tagstunden} = Q_{ges}$$

$$30,4685mA * 365 * 24h = 266,904Ah$$

### 4.3.2 Stromverbrauch im Standby Betrieb

Befinden sich alle Sensoren und der Microcontroller im Stand-by-Modus wird kaum Strom verbraucht. Folgende Berechnung gibt den Stromverbrauch im Stand-by-Modus wieder.

Modul	Stromverbrauch	Beschreibung
STM32L15XUC	$1,15\mu A$	
NEO6M	$0mA^8$	
MMA7660FC	$2\mu A$	
RYLR896 (SX1276)	$0,2\mu A$	Dieser Wert bezieht sich auf den Sleep Mode des SX1276 Chips [40]
nRF24L01	$26\mu A$	
SDCard	$0mA$	Es wird weder von der SD-Karte gelesen noch geschrieben

Tabelle 4.2: Stromverbrauch Module im Standby Betrieb

Zusammengerechnet ergibt sich ein Stromverbrauch von:

$$\sum_{i=1}^n F_i * Bestandteile_i = I_{ges}$$

$$1,15\mu A + 2\mu A + 0,2\mu A + 26\mu A = \underline{\underline{29,35\mu A}}$$

Rechnet man dies auf ein Jahr hoch sind das

$$t_{Tagstunden} * I_{ges} = Q_{ges}$$

$$365 * 24h * 0,02935mA = \underline{\underline{257,106mAh}}$$

### 4.3.3 Stromspeicher und Wiederaufladen

Als Batterien werden Li-Ionen Akkus vom Typ 18650 oder vergleichbar eingesetzt. Diese Akkus liefern eine Spannung von 3,7 V bei einem Entladestrom von max 30 A Dauerlast.

Würde man alle Sensoren unter Dauerlast mit diesen Akkus betreiben so bräuchte man:

$$266,904 \text{ Ah} / 3 \text{ A h} = 88,968$$
$$\underline{\underline{89 \text{ Akkus}}}$$

Im Stand-by-Modus liegt der jährliche Stromverbrauch lediglich bei 257,106 mAh. Ein Akku könnte somit alle Sensoren 11,67 Jahre betreiben.

Da man ein Sendemodul nicht mit 89 Akkus ausstatten kann muss also für eine Stromaufnahme, also ein Wiederaufladen der Akkus gesorgt werden.

Dies soll durch Solarstrom erreicht werden. Laut dem Wetteratlas schwanken die durchschnittlichen Sonnenstunden in der Nordsee pro Jahr zwischen 1450 und 1650. Die meisten Sonnenstunden sind zwischen Mai und Juli während im Winter teilweise keine Sonne zu sehen ist. [46] Es muss also sichergestellt werden, dass alle Sensoren unter dauerbelastung mehrere Tage laufen können. Als Vorgabe wird hier 30 Tage gesetzt.

Zusätzlich wird der Microcontroller so programmiert, dass er sich in der Zwischenzeit in den Stand-by-Modus schaltet, wenn nicht gerade die Position getrackt oder andere Werte über die Sensoren aufgenommen werden.

Nehmen wir an, der Microcontroller befindet sich 50 % des Tages im Stand-by-Modus und 50 % im Dauerbetrieb - daraus ergibt sich:

$$0,5 * I_{ges} * t_{Tagstunden} = Q_{ges}$$

$$0,5 * (0,02935 \text{ mA} + 30,4685 \text{ mA}) * 24 \text{ h} = \underline{\underline{365,9481 \text{ mAh}}}$$

Für einen Monat Stromversorgung bräuchte man demnach:

$$365,9481 \text{ mAh} * 30 \text{ Tage} = \underline{\underline{10.978,443 \text{ mAh}}}$$

$$Q_{Akku} = 3000 \text{ mAh}$$

$$\lceil Q_{ges} / Q_{Akku} \rceil = \underline{\underline{4}}$$

Angenommen es gäbe nach 30 Tagen im Winter einen Tag mit 8 Stunden Sonne. Die Solarzellen müssen also so gewählt werden, dass die Batterien in kürzester Zeit wieder



aufgeladen werden. Darauf basierend lässt sich bestimmen, wie lange das Modul der Sonne ausgesetzt sein muss, um die Batterien voll zu laden.

Um die Akkus in einer angemessenen Zeit, z. B. 8 Stunden zu laden, ist eine Spannung von 4,2 V und ein Ladestrom von 1.500 mA erforderlich [18].

Dies sind die Extrembedingungen, die man an das Modul stellen kann. Ausreichend wäre aber auch ein komplettes Wiederaufladen in zwei Tagen. In diesem Fall werden nur 750 mA als Ladestrom benötigt.

Das Solarmodul von Velleman bietet eine Spannung von 2 V bei einem Ladestrom von 200 mA. Um eine Spannung von 4 V zu erreichen, die benötigt wird um die Akkus wieder aufzuladen, werden zwei von diesen Modulen in einer parallelen Schaltung benötigt. Ein Modul hat eine Fläche von:

$$4,6cm * 7,2cm = 33,12cm^2$$

Das Wiederaufladen der vier Akkus würde somit

$$12000mAh/200mA = 60h$$

dauern.

## 5 Protokolleigenschaften

Dieses Protokoll wurde explizit für die dezentrale Kommunikation unter Containermodulen entwickelt. Es beschreibt, wie die Module untereinander in einem dezentralen hierarchischen Netz kommunizieren, um die Anforderungen für die Lösung zu erfüllen. Dabei wird konkret auf Paketgröße und Übertragungsdauer zwischen den einzelnen Modulen eingegangen. Im Folgenden wird jedes Module als "Node" bezeichnet, da nur noch von Netzen gesprochen wird. Neben den Übertragungen wird auch erklärt, wie Informationen auf den Nodes vorgehalten werden müssen, damit diese im späteren Verlauf korrekt weitergegeben werden können. Dieses Vorhalten wird in den Kapiteln 5.9 Node Information Table (NIT), 5.11 Node Event Table (NET), 5.8 Node Positioning Table (NPT), und 5.10 Node Time Table (NTT) beschrieben.

Dieses Protokoll setzt auf dem bestehenden Physical Layer von dem LoRa<sup>®</sup> Modul und des nRF2401+ auf.

### 5.1 Static Mode

Im Static Mode werden Nodes bezeichnet, deren Aufgabe es ist, eine Verbindung zwischen dem Netzwerk der Module und dem Internet herzustellen. Sie werden auch als Gateways bezeichnet. Diese Nodes können unterschiedliche Zustände besitzen. Diese Zustände geben Auskunft, ob der Node Informationen übertragen kann. Befindet der Node sich in einem Error-Zustand oder ist aktuell nicht mit dem Internet verbunden, so werden keine Nachrichten vom Netzwerk an ihn übertragen. **Zustände im static Mode** Die Zustände sind folgendermaßen definiert:

#### **SM\_RUNNING**

Der Node ist betriebsbereit und kann Nachrichten zu empfangen. Es besteht eine Verbindung zum Endpunkt im Internet.

### **SM\_NOT\_RUNNING**

Der Node ist nicht erreichbar oder hat einen internen Fehler. Dieser Zustand wird in der Routing Tabelle eingetragen und Nachrichten werden nicht an ihn gesendet.

### **SM\_BUSY**

Der Node ist aktuell beschäftigt und kann keine einkommenden Nachrichten verarbeiten. Es folgt eine kurze Wartepause des Senders, bis er erneut den Zustand abfragt.

### **SM\_NO\_CONNECTION**

Der Node hat keine Verbindung zum Endpunkt im Internet.

## **5.2 Dynamic Mode**

Der dynamic Mode beschreibt Nodes, welche als Quellen für Sensordaten dienen. Diese Nodes nehmen Positions- und Bewegungsdaten auf und geben diese an das Netz weiter. In diesen Clustern werden einzelne Nodes als Vertreter dieser ausgewählt. Diese werden Leader genannt.

**Zustände im dynamic Mode** Ein bewegender Node (dynamic Mode) kann unterschiedliche Rollen annehmen. Hierunter zählen:

### **DM\_IN\_CLUSTER**

Der Node ist Teil eines Clusters, aber kein Leader

### **DM\_STAND\_ALONE**

Der Node ist nicht Teil eines Clusters und dementsprechend auch kein Leader.

### **DM\_LEADER**

Der Node ist Leader eines Clusters.

### **DM\_EMERGENCY**

Der Node ist in einem Notfall-Zustand. In diesem Zustand kann der Node nicht in einem Cluster eintreten.

### **DM\_ERROR**

Der Node hat einen Fehler.

## 5.3 Netzwerke

Für eine bessere Unterteilung und Kommunikation werden einzelne Bereiche in unterschiedliche Domains (Netzwerke) unterteilt. Diese Netzwerke sind das Clusternetz und das Transportnetz.

### 5.3.1 Clusternetz

Das Clusternetz beschreibt den Zusammenschluss von Nodes zu einem Cluster. Clusternetze sind die Gruppierung von Nodes auf einem Schiff oder im Hafen von Sendeeinheiten. Jedes Clusternetz bestimmt einen Leader nach gewissen Kriterien. Diese Kriterien werden im Kapitel 5.15 genauer betrachtet. Der Leader des Clusternetzes vertritt das Cluster nach außen zu anderen Clustern. Clusternetze bilden sich unter bestimmten Kriterien. Darunter zählen gleiche Bewegungsrichtungen<sup>1</sup>. Die Knotenpunkte dieses Netzes stellen die Nodes dar.

### 5.3.2 Transportnetz

Das Transportnetz beschreibt das Netz, das sich aus den Clustern bildet. Dieses Netz ist dynamischer als das Clusternetz und seine Knotenpunkte sind die Cluster selbst, bzw. die Leader jedes Clusters.

Die Leader nehmen die Rolle des Gateways ein und übertragen die Informationen des Clusters an andere Cluster.

## 5.4 Aufbau des Kopfdatenbereichs (Paket Header)

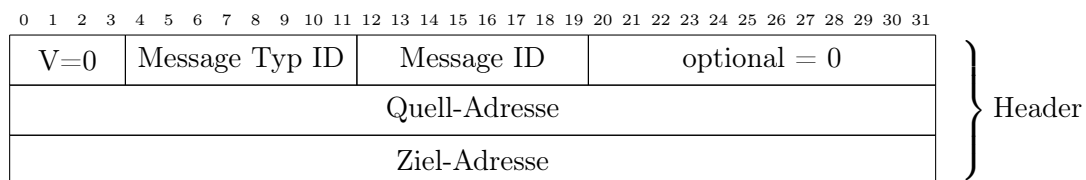


Abbildung 5.1: Paket Header

---

<sup>1</sup>Ein Schiff mit Container fährt in eine Richtung jeder Container stellt ein Node dar, dann sind alle Container auf diesem Schiff in einem Cluster, da sie die selbe Bewegungsrichtung haben

### **Versionsnummer (V)**

Ist 4 Bit groß und bietet so eine Möglichkeit, die Header upzudaten und neue Versionen zu veröffentlichen.

### **Message Typ ID**

Dieses Feld ist 8 Bit groß und definiert die Art der Nachricht. Durch diesen Typ ist ebenfalls festgelegt, ob optionale Informationen an den Header angehängt worden sind.

### **Message ID**

Dieses Feld ist 8 Bit groß und definiert eine fortlaufende Nummer, die es dem Empfänger ermöglicht, fragmentierte Pakete wieder passend zusammensetzen. Gestartet wird jedes Mal bei einer neuen Kommunikation zweier Partner bei 0 und kann bis maximal 255 hochgezählt werden.

### **optional**

Dieses Feld ist 12 Bit groß und stellt Platz für die einzelnen Nachrichten zur Verfügung, welche zusätzliche Informationen übertragen müssen. Zusätzliche Informationen können z. B. die Anzahl der zu übertragenen Nodes sein, die in der Routing Tabelle stehen. Standardmäßig wird dieses Feld mit 0 gefüllt

### **Quell-Adresse**

Ein 32 Bit großes Feld für die Adresse des Nodes, der die Pakete verschickt.

### **Ziel-Adresse**

Enthält die Zieladresse im gleichen Format wie die Quell-Adresse.

## **5.5 Größe der Sendepakete (MTU)**

Als MTU<sup>2</sup> wird die maximale Größe eines Internetpaketes bezeichnet. [30]

Die festgesetzte MTU definiert den Payload des Physical Layers. Wie bereits unter Kapitel 4.1.3 bietet der RYLR896 einen Bereich für den Payload an. In dem Kontext des Protokolls wird der Payload des Physical Layers als MTU bezeichnet, da hier die maximale Paketgröße die Größe des Payloads ist.

---

<sup>2</sup>Maximum Transmission Unit

### 5.5.1 LoRa

Festsetzung der MTU auf 51 Byte. Grund ist die Airtime (Transmission Time bei den einzelnen Setups)

Für Nachrichten mit einer hohen Reichweite wird der SP<sup>3</sup> auf 7 gesetzt. Die Bandbreite der Frequenz wird auf 250 kHz festgesetzt. Mit diesen Einstellungen ist nur eine maximale Paketgröße von 51 Byte möglich. Zur Übertragung werden 2,276 s benötigt. [38] [41]

In jedem Land gibt es Regulatorien wie oft auf einer bestimmten Frequenz gesendet werden darf. Diese Regulatorien müssen durch dieses Protokoll eingehalten werden.

### 5.5.2 2,4 GHz ISM Band

Beim Übertragen von Paketen auf dem 2,4 GHz Band wird die MTU auf 1500 Byte festgelegt. Dieser Wert stammt aus dem RFC1122 [30] und ist der Standardwert für das Übertragen von Paketen auf dem Ethernet-Protokoll.

## 5.6 Eindeutigkeit der Senderadresse

2016 wurden 130 Millionen Container über das Meer geschifft. [47] Wenn man davon ausgeht, dass jeder Container nur einmal versendet worden ist kann man als Maximalwert 130 Millionen nehmen. So reicht eine Adresse von 32 Bit Länge. Bei 32 Bit gibt es einen Maximalwert von 4.294.967.295.

## 5.7 Routing-Tabelle

Es gibt zwei unterschiedliche Arten von Routing-Tabellen. Die Cluster Routing-Tabelle und die Inter-Cluster Routing-Tabelle. Da es nicht relevant ist zu wissen, welche Nodes sich gerade in welchem Cluster befinden, ist es ausreichend, wenn lediglich der Leader in der Tabelle aufgenommen wird. Diese gebildete Tabelle zwischen den Clustern bildet das Transportnetz der Informationen zu den static Nodes. Das Clusternetz besteht aus den Nodes, die zusammen ein Cluster bilden und ihre Sensordaten im Cluster verteilen.

---

<sup>3</sup>Spreading Factor

Im Gegensatz zu dem Transportnetz bleibt das Clusternetz über eine lange Zeit persistent, zumindest in der Zeit, in der sich die Container zusammen an einem Ort befinden, z. B. auf dem Schiff oder im Hafen.

Adresse	Über	Hops	State	Timestamp
A	A	0	DM_LEADER	0
B	A	0	DM_LEADER	0
C	B	1	DM_LEADER	0
D	C	2	SM_AVAILABLE	0

### **Adresse**

Eindeutige Adresse des Nodes

### **Über**

Eindeutige Adresse des Nodes mit dem der Node verbunden ist.

### **Hops**

Anzahl der Nodes die die Nachricht weiterleiten müssen, bis sie beim Ziel - Node ist

### **State**

Zustand des Nodes. Da Nodes als Static-Mode oder Dynamic-Mode angesprochen werden können, steht in dieser Spalte der Zustand dieses Nodes, vom Static-Mode oder Dynamic-Mode.

### **Timestamp**

Dieser definiert, wann die Informationen in die Tabelle eingetragen worden sind. Nach einer gewissen Zeit wird jede Route überprüft, ob diese weiterhin existiert.

### **5.7.1 Aufbau der Routing-Tabelle**

Die Routing-Tabelle wird zyklisch aufgebaut. Im ersten Schritt werden alle Nodes in direkter Reichweite hinzugefügt. Diese Nodes in direkter Reichweite haben alle einen Hop von 0. Sie können erreicht werden, ohne einen Zwischennode. Der Node, der die Routing-Tabelle aufbaut, schreibt sich selbst an die erste Stelle. In diesem Beispiel wurde ein direkter Node erreicht (B). Der Node B hat selber zwei Nodes erreicht, A und C. A übernimmt die Routing-Tabelle und trägt alle Nodes ein, die bei sich in der Tabelle nicht enthalten sind. Besteht ein Node in der Tabelle von B der über weniger Hops erreichbar ist, wird die Hop Zahl auf die kleine Zahl aktualisiert.

### 5.7.2 Nächstes Gateway / static Node

Durch den State in der Routing-Tabelle ist erkennbar, welcher Node ein statischer Node ist und ob dieser die Nachrichten ins Internet übergeben kann.

### 5.7.3 Message Types zur Kommunikation in Routing-Tabelle

#### **RTA\_IC**

Routing Table Add Inter-Cluster ist ein Nachrichten-Typ zum Hinzufügen von einem Node zu einer Routing-Tabelle, welche sich auf das Transportnetz bezieht.

#### **RTA\_C**

Routing Table Add Intra-Cluster ist ein Nachrichten-Typ zum Hinzufügen von einem Node zu einer Routing-Tabelle, welche sich auf das Clusternetz bezieht.

#### **RTR\_IC**

Routing Table Remove Inter-Cluster ist ein Nachrichten-Typ zum Löschen eines Nodes aus der Routing-Tabelle, welche sich auf das Transportnetz bezieht.

#### **RTR\_C**

Routing Table Remove Intra-Cluster ist ein Nachrichten-Typ zum Löschen eines Nodes aus der Routing-Tabelle, welche sich auf das Clusternetz bezieht.

### 5.7.4 Update der Routen

Bindet sich ein Node in einem bestehenden Cluster ein so wird die Routing-Tabelle über alle Nodes aktualisiert. Dies geschieht über eine RTA\_C Nachricht. Diese Nachricht beinhaltet die Adresse des neuen Nodes und die Anzahl der Hops. Da bereits eine bestehende Routing-Tabellenstruktur besteht wird diese Nachricht gezieht an die einzelnen Teilnehmer gesendet, die direkt erreichbar sind ( Hops = 0 ).

Ist erkennbar, dass durch das Entfernen eines Nodes der Leader eines Clusters nicht mehr erreichbar ist, wird die Leaderwahl in dem neuen Bereich erneut ausgeführt, um ein neues Cluster zu bilden. Dies geschieht auch, wenn beide neugebildeten Cluster den selben Bewegungsvektor haben.



### 5.7.5 Aktualisierung der Routen

Damit die Routing-Tabelle immer auf dem aktuellsten Stand ist wird zyklisch abgefragt, ob alle Nodes in dieser Tabelle erreichbar sind. Es wird ein *PING* zu dem Node geschickt und dann auf ein *PONG* gewartet. Das Timeout wird auf 20 Sekunden festgesetzt. Kommt keine Antwort, wird dieser Node und alle anderen Nodes, die über diesen Node erreichbar waren, aus der Routing-Tabelle gelöscht und eine Update-Nachricht an alle übrigen Nodes gesendet. Wird jedoch ein *PONG* empfangen, so wird der Timestamp in der Routing-Tabelle auf *NOW* upgedated.

### 5.7.6 Austausch der Routen

#### a) Optionale Parameter im Header

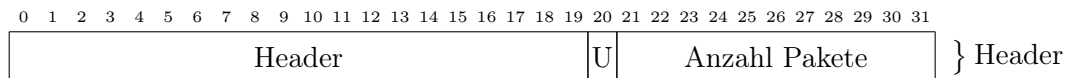


Abbildung 5.2: Header

Als optionaler Parameter im Header wird die Anzahl der Pakete gesendet, die übertragen werden sollen. Das **U** Flag gibt an, ob ein Paket eine unvollständige Anzahl von Nodes enthält. Die Anzahl der Nodes in einem Paket wird durch die MTU bestimmt. Hierfür sind  $2^{11}$  Bits reserviert worden. Bei  $2^{11}$  sind also 2.048 Pakete in einer Sequenz übertragbar.

#### b) Payload

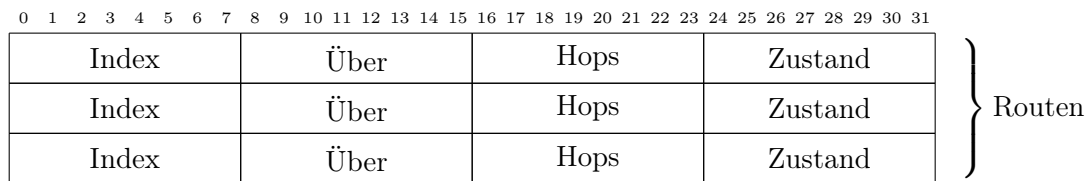


Abbildung 5.3: Payload Routing-Tabelle Inter-Cluster

#### Index

Beschreibt den Index in der vorher übertragenen Liste von Adressen.

**Über**

Beschreibt den Index in der vorher übertragenen Liste von Adressen über welchen Node der in der ersten Spalte genannte Node erreichbar ist.

**Hops**

Beschreibt die Anzahl an Nodes die zwischen Quell-Adresse und Ziel-Adresse liegen. Beispiel: Ein Node hat den Abstand 0 zu sich selbst. Hops = 0. Ein Node zu einem anderen Node, der direkt erreichbar ist hat ebenfalls den Abstand Hops = 0. Ein Node der wiederum nur indirekt über einen anderen Node erreichbar ist, hat den Abstand Hops = 1

**Zustand**

Zustand des Nodes entweder im Dynamic-Mode oder Static-Mode.

Die Inter-Cluster Routing-Tabelle enthält alle Informationen über die Cluster. Vertreter dieser Cluster (Leader) werden mit ihrer Adresse und Zustand in diese Tabelle aufgenommen. Damit die Informationen auf Grund der geringen MTU performant übertragen werden können, werden vorab alle in der Routing-Tabelle eingetragenen Nodes als Liste mit Index übertragen. Dieser Index wird dann beim Übertragen der Routing-Tabelle, sowie später bei der Übertragung der anderen Informationen verwendet.

Wie in der Abbildung 5.3 Payload Routing-Tabelle Inter-Cluster erkennbar ist, nimmt ein Eintrag der Routing-Tabelle vier Byte ein. Die größte Zahl für den Index ist  $2^8 = 256$ . Die komplette Inter-Cluster Routing-Tabelle kann demnach 256 Einträge aufnehmen.

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31																																
Address 1																																} Adressen
Address 2																																
Index 1																Über 1																} Routen
Hops 1								State 1								Index 2																
Über 2																Hops 2								State 2								

Abbildung 5.4: Payload Routing-Tabelle Intra-Cluster

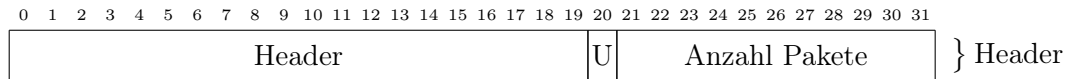
Die Intra-Cluster Routing-Tabelle hält alle Nodes fest, die sich im Cluster befinden. Die Kommunikation innerhalb eines Clusters läuft über 2,4 GHz. Bei 2,4 GHz können Daten schneller und dadurch mehrere Einträge übertragen werden. Aus diesem Grund ist die Indexbreite bei den Paketen 16 Bit groß. Bei  $2^{16}$  können bis zu 65.535 Einträge

gespeichert werden. Innerhalb eines Clusters kann die Routing-Tabelle direkt geschickt werden. Es bedarf kein Dictionary mit allen Adressen.

## 5.8 Node Positioning Table (NPT)

In der NPT werden sämtliche Positionsdaten der Nodes gespeichert. Diese Tabelle beinhaltet nicht nur die aktuelle Position, sondern auch die Positionen aus der Vergangenheit. Diese Informationen werden solange vorgehalten, bis sie aktiv gelöscht werden.

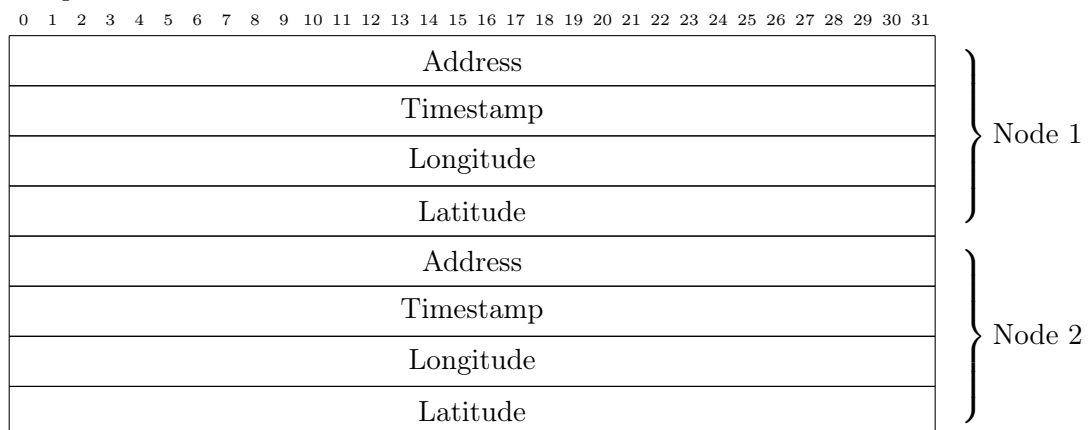
### 5.8.1 Optionale Parameter im Header



Als optionaler Parameter im Header wird die Anzahl der Pakete gesendet, die übertragen werden sollen. Das **U** Flag gibt an, ob ein Paket eine unvollständige Anzahl von Nodes enthält. Die Anzahl der Nodes in einem Paket wird durch die MTU bestimmt. Hierfür sind  $2^{11}$  Bits reserviert worden. Bei  $2^{11}$  sind also 2.048 Pakete in einer Sequenz übertragbar.

### 5.8.2 Payload zum Austausch des NPT

**a) Intra Cluster (NPT\_C)** Payload für den Austausch von Positionsdaten innerhalb eines Clusters. Dieser Fall tritt nur in einem sich nicht bewegendem Cluster ein, zum Beispiel in einem Hafen.



Die MTU bei der Intra Cluster Kommunikation wurde auf 1500 Byte festgelegt worden. Die maximale Anzahl der Nodes in einem Paket berechnet sich wie folgt:

$$Header_C = 12Byte$$

$$NodePosition = 16Byte$$

$$MTU_C = 1500Byte$$

$$AnzahlNodes/Paket = MTU_C - Header_C - x * NodePosition$$

$$AnzahlNodes/Paket = 93$$

Bei einer maximalen Paketanzahl von  $2^{11} = 2.048$  und einer maximalen Anzahl Node-Informationen pro Paket von 93 sind pro Sequenz maximal  $93 * 2.048 = 190.464$  Node-Informationen übertragbar.

**b) Inter Cluster (NPT\_IC)** Payload für den Austausch von Positionsdaten zwischen zwei Clustern. Da es hier unwichtig ist, wo genau sich ein Container befindet, können alle Container, die sich im Cluster befinden, mit den gleichen Positionsdaten gesendet werden.

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31		
Timestamp		} Zeit
Longitude		} Position
Latitude		
Address		} Node 1
Address		} Node 2
Address		} Node 3
Address		} Node 4

Die MTU bei der Inter Cluster Kommunikation wurde auf 51 Byte festgelegt. Die maximale Anzahl der Nodes in einem Paket berechnet sich wie folgt:

$$Header_{IC} = 12Byte$$

$$PositionsdatenHeader = 12Byte$$

$$NodeAddress = 4Byte$$

$$MTU_{IC} = 51\text{Byte}$$

$$\text{AnzahlNodes/Paket} = MTU_{IC} - \text{Header}_{IC} - \text{PositionsdatenHeader} - x * \text{NodeAddress}$$

$$\text{AnzahlNodes/Paket} = 6$$

Bei einer maximalen Paketanzahl von  $2^{11} = 2.048$  und einer maximalen Anzahl Node-Informationen pro Paket von 6 sind pro Sequenz maximal  $6 * 2.048 = 12.288$  Node-Informationen übertragbar. Eine Sequenz ist die komplette Übertragung aller Informationen in einem Kontext.

## 5.9 Node Information Table (NIT)

In der NIT werden alle Informationen über den Node festgehalten. Diese Informationen beinhalten:

Adresse	UN-Nummer	Besitzerk.	PGI	Seriennummer	Size & Type Code
A	3005	CSQ	U	305438	20GP
B	8000	CSQ	U	305437	20GP

Tabelle 5.1: Node Information Table

### Adresse

Die eindeutige Adresse des Containers

### UN-Nummer

Die UN-Nummer stellt die Gefahrenstufe der transportierten Ladung dar. Aktuell sind etwa 3500 Gefahrgüter gelistet.

### Besitzerkennung

Die Besitzerkennung gibt an, wem der Container gehört.

### Produkt Gruppen Identifier

U - für alle Frachtcontainer

J - für abnehmbare Ausrüstung für Frachtcontainer

Z - für Anhänger und Fahrgestell

### Seriennummer

Die Seriennummer gibt die eindeutige ID des Containers vom Besitzer an.

### Size & Type Code

Dieser Code besteht aus vier Zeichen. Das erste Zeichen beschreibt die Länge beschreibt, das Zweite Zeichen die Höhe und die letzten beiden Zeichen den Typen des Containers [36].

#### 5.9.1 Basis Containerinformationen

Die ID des Containers entspricht der offiziellen BIC-Nummer des Seecontainers. Diese BIC-Nummer ist unter der ISO 6346 definiert. [16] Die Adresse ist die eindeutige ID des Nodes und verbindet die Daten miteinander.

Die BIC des Containers wird nach ISO 6346 folgendermaßen zusammengesetzt:

Bezeichnung	Anzahl Zeichen
Besitzerkennzeichnung	3
Produkt Gruppen Identifier (PGI)	1
Seriennummer	6
Checksum	1
Size & Type Code ist die Information über Größe und Type des Containers	4

Tabelle 5.2: Containerinformationen nach ISO 6346

Da die Adresse des Nodes eindeutig ist wird sie für die Tabellen als Unique Identifier (ID) genutzt. Die NIT wird nur dann aktualisiert, wenn ein Node einem Cluster beitrifft oder austritt. Tritt ein Node selber aus einem Cluster aus, wird die komplette Tabelle gelöscht. Eine Ausnahme bildet hier der Emergency State, der diese Informationen vorhalten muss. In diesem Fall werden aber nur die Informationen von Nodes gespeichert, die selbst im Emergency State sind.

## 5.9.2 Codierung Containerinformationen

Für eine bessere Datenübertragung und geringeren Speicherplatz, der benötigt wird, wird die UN-Nummer der BIC-Code und der Size & Type Code kodiert.

### Besitzerkennung

Bei 26 Buchstaben mit 3 aufeinander folgender Zeichen ergibt sich eine Kombinationsmöglichkeit von  $26^3$ . Um diese Zahl binär abzubilden, werden  $\log_2(26^3) = 14.1013$  Bits benötigt. Aufgerundet sind das 15 Bits.

### Produktgruppen-Identifizier

Der Produktgruppen-Identifizier hat nur drei Möglichkeiten; U, Z und J. Auf Bits übertragen sind das 2 Bit.

BIC und Produkt Gruppen Identifizier benötigen zusammen 17 Bits. Kombiniert man alle entstehenden Möglichkeiten, also  $26^3 * 3$ , so passt diese Zahl in eine 16 Bit große Zahl.

$$\log_2(26^3 * 3) = 15.6863 \text{ (16Bit)}$$

$$\log_2(26^3) + \log_2(3) = 14.1013 \text{ (15Bit)} + 1.585 \text{ (2Bit)} = 17\text{Bit}$$

### Seriennummer

Die Seriennummer hat eine maximale Nummer von 999.999. Auf eine Zweierpotenz übertragen passt die Nummer in 20 Bit.

### UN-Nummer

Binär lässt sich diese Nummer mit  $2^6$  Bits darstellen.

### Size & Type Code

Das erste Zeichen

### 5.9.3 Message Types

Bezeichnung	Beschreibung
NIT_IC	Node Information Table Inter-Cluster Update
NIT_C	Node Information Table Intra Cluster Update

Tabelle 5.3: Containerinformationen nach ISO 6346

### 5.9.4 Optionale Parameter im Header

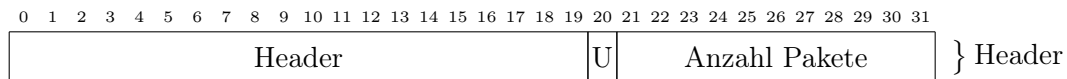


Abbildung 5.5: Optionale Parameter NIT Header

Als optionaler Parameter im Header wird die Anzahl der Pakete gesendet, die übertragen werden sollen. Das **U** Flag gibt an, ob ein Paket eine unvollständige Anzahl von Nodes enthält. Die Anzahl der Nodes in einem Paket wird durch die MTU bestimmt. Hierfür sind  $2^{11}$  Bits reserviert worden. Bei  $2^{11}$  sind also 2.048 Pakete in einer Sequenz übertragbar.

### 5.9.5 Paketaufbau

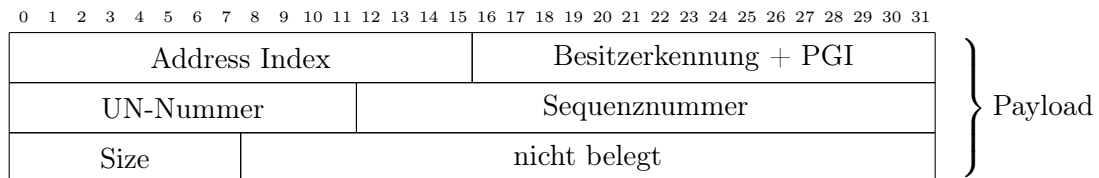


Abbildung 5.6: NIT Payload Inter-Cluster

*PGI: Product Group Identifier*

Das "nicht belegt" Feld wird nicht übertragen. Daraus ergeben sich dann pro Node 9 Bytes die übertragen werden. Der Address Index bezieht sich auf das Dictionary, welches bei der Kommunikation zwischen zwei Clustern am Anfang ausgetauscht wird. So müssen weniger Daten übertragen werden.



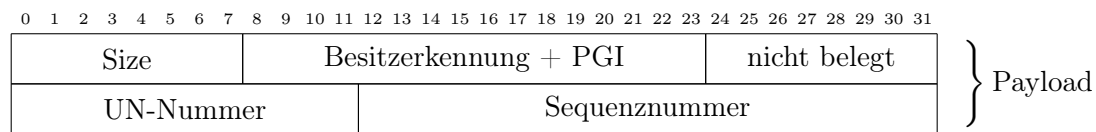


Abbildung 5.7: NIT Payload Intra Cluster

*PGI: Product Group Identifier*

Dieser Payload dient der einzelnen Übertragung von einem Node zu einem anderen, in dem er seine eigenen Informationen austauscht. Hier ist eine Adresse nicht notwendig, da diese bereits im Header mitgesendet wird.

## 5.10 Node Time Table (NTT)

Die Node Time Table beinhaltet eine Liste mit Informationen über den letzten aktualisierten Zustand eines Nodes und seine Adresse. Dieser letzte aktualisierte Zustand ist ein Timestamp, der beschreibt, wann die Informationen des Nodes das letzte Mal erfolgreich an ein Gateway übertragen worden sind. Die Adresse ist die eindeutige Adresse des Nodes.

Adresse	Timestamp
A	20110912130940
B	20110912130940

Abbildung 5.8: Node Time Table

### Optionale Parameter im Header

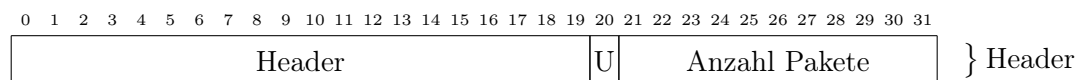


Abbildung 5.9: Optionaler Header Node Time Table

Als optionaler Parameter im Header wird die Anzahl der Pakete gesendet, die übertragen werden sollen. Das U Flag gibt an, ob ein Paket eine unvollständige Anzahl von Nodes enthält. Die Anzahl der Nodes in einem Paket wird durch die MTU bestimmt. Hierfür sind  $2^{11}$  Bits reserviert worden. Bei  $2^{11}$  sind also 2.048 Pakete in einer Sequenz übertragbar.

## 5.11 Node Event Table (NET)

Der Node Event Table registrierte alle Events, die bei einem Node auftreten können. Hierzu zählen:

- maximale Schiefele erreicht (Fallen erkannt)
- weitere Events
- *Cluster beigetreten*
- *Cluster ausgetreten*
- *interner Fehler (Fehlercode)*

Bei den Events wird zwischen offiziellen und inoffiziellen Events unterschieden. Bei einem Austausch zwischen zwei Nodes oder Clustern werden lediglich die offiziellen Events ausgetauscht. Die inoffiziellen (hier kursiv dargestellt) dienen den Debug Zwecken und werden nur direkt an einen Node im Static Mode übertragen.

Address	Event	Timestamp
A	EMERGENCY	0
B	CLUSTER_IN	0
C	CLUSTER_OUT	1
D	CLUSTER_IN	2

Tabelle 5.4: Node Event Table

### Address

Gibt an auf welche Adresse sich das Event und der Timestamp beziehen.

### Events

*EMERGENCY*: Node ist in den Emergency Zustand gewechselt

*CLUSTER\_IN*: Node ist einem Cluster beigetreten

*CLUSTER\_OUT*: Node ist aus einem Cluster ausgetreten.

### Timestamp

Gibt an, zu welcher Uhrzeit dieses Event aufgetreten ist.

### 5.11.1 Message Types

#### Inter-Cluster Event Update (ICEU)

Dieser Nachrichtentyp beschreibt ein Update, welches zwischen zwei Clustern ausgetauscht wird. In dieser Nachricht werden alle Events zu einem Node gesendet, die seit dem letzten Update aufgetreten sind.

#### Cluster Event Update (CEU)

Diese Nachricht ist ähnlich aufgebaut wie die **ICEU** Nachricht – mit dem kleinen Unterschied, dass die Information über den Absender direkt die ID des Nodes ist und nicht der Index der übertragenen Routing-Tabelle. Im Gegensatz zu der **ICEU** kann diese Nachricht direkt versendet werden und muss nicht dem Inter-Cluster-Protokoll folgen.

### 5.11.2 Optionale Parameter im Header

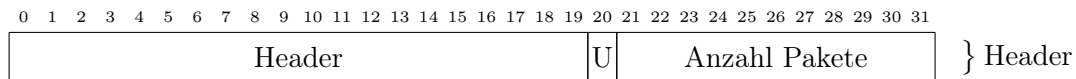


Abbildung 5.10: Optionale Parameter NET Header

Als optionaler Parameter im Header wird die Anzahl der Pakete gesendet, die übertragen werden sollen. Das **U** Flag gibt an, ob ein Paket eine unvollständige Anzahl von Nodes enthält. Die Anzahl der Nodes in einem Paket wird durch die MTU bestimmt. Hierfür sind  $2^{11}$  Bits reserviert worden. Bei  $2^{11}$  sind also 2.048 Pakete in einer Sequenz übertragbar.

### 5.11.3 Paketaufbau



Abbildung 5.11: NET Payload Inter-Cluster



Abbildung 5.12: NET Payload Intra Cluster

Dieser Payload ist für eine einzelne Übertragung von einem Node zu einem Anderen. Hier ist eine Adresse nicht notwendig, da diese bereits im Header mitgesendet wird.

## 5.12 Inter Cluster Protocol

Das Inter Cluster Protocol beschreibt den Ablauf, in welcher Reihenfolge ein Update zwischen zwei Clustern erfolgt.

1. LOOKUP Nachricht
2. Cluster Identitäten austauschen
3. Informationsteilnehmer austauschen
4. NTT Tabellen austauschen
5. NPT Tabellen austauschen
6. NET Tabellen austauschen
7. NIT Tabellen austauschen

**1. LOOKUP Nachricht** Der optionale Parameter ist eine 5 Bit lange Sequenznummer, die für eine Antwort benötigt wird. Befindet sich ein anderes Cluster in der Nähe und empfängt diese Nachricht, muss es mit dieser Sequenznummer antworten. Die LOOKUP Nachricht besteht nur aus dem Header, der insgesamt 3 Byte groß ist.

### 2. Cluster Identitäten austauschen

Die Antwort auf ein LOOKUP ist eine Identitätsnachricht. Diese besteht aus dem Message-Typ *HI* der Adresse des Senders einer Sequenznummer (5 Bit) und einer Startsequenz, die festlegt, wer anfängt. Als optionale Parameter wird die 5 Bit große Sequenznummer gesetzt, die in der LOOKUP Nachricht geschickt worden ist.

Erfolgt nach dem LOOKUP eine Antwort, so wird diese Antwort bestätigt. Der Antwort der LOOKUP Nachricht, die vom antworteten Cluster erfolgt, wird eine zufällige zweistellige Nummer (0-7) mitgeschickt. Die Antwort auf die Bestätigung enthält ebenfalls eine Nummer (0-7). Diese Nummer bestimmt, welcher dieser beiden Parteien anfängt zu

senden. Durch diese Nummer kann sichergestellt werden, dass eine Gleichberechtigung zwischen den Clustern existiert. Sind die beiden Nummern zufällig identisch, so fängt der auf den *LOOKUP* geantwortete Node an. Erfolgt nach einem Timeout von 20 Sekunden keine Nachricht, wird das Protokoll abgebrochen und der Prozess muss mit dem *LOOKUP* neu gestartet werden. Dieser Timeout gilt für alle Schritte im Protokoll.

### 3. Informationsteilnehmer austauschen

Aus diesem Grund wird als zweiter Schritt eine Tabelle ausgetauscht, die alle Teilnehmer des Clusters enthält. Diese Tabelle dient als Dictionary und beim Austausch der Informationstabellen braucht lediglich der Index des Dictionaries angegeben werden.

### 4. NTT Tabellen austauschen

Als nächstes werden die Zeitpunkte der Nodes ausgetauscht, wann als letztes alle Informationen an das Internet übertragen worden sind. Sollten sich Informationsteilnehmer doppeln, weil sie bereits Informationen ausgetauscht haben, kann so festgestellt werden welche Informationen fehlen. Die fehlenden Informationen werden dann von beiden Clustern übertragen. Sollte sich herausstellen, dass beide den selben Zeitstempel besitzen, werden keine Informationen über diesen Node übertragen.

### 5. NPT Tabellen austauschen

Steht fest, welche Informationen fehlen, werden die Positionsdaten ausgetauscht. Im Kapitel 5.8 wird beschrieben, wie die Daten ausgetauscht werden.

### 6. NET Tabellen austauschen

Nun werden die registrierten Events ausgetauscht, die zeitlich aufgetreten sind.

### 7. NIT Tabellen austauschen

Zum Schluss werden die Informationen über die Container ausgetauscht. Dieser Austausch dient für den Notfall, wenn ein Container verloren gegangen ist und dieser wiedergefunden werden muss.

## 5.13 Routing

### 5.13.1 Clusternetz und Transportnetz

Das Routing wird als hierarchisches Routing zwischen dem Clusternetz und dem Transportnetz eingerichtet. Innerhalb dieser Netze werden die Pakete nicht definiert von einer Quelle zu einem Ziel geleitet. Im Transportnetz ist das Ziel eines jeden Paketes zum nächsten Static Mode Node zu gelangen. Im Clusternetz gibt es zum einen die Richtung vom Leader an alle Nodes oder ein Node sendet ein Paket direkt zum Leader. Das Weiterleiten von definierten Paketen wird ebenfalls nicht vom Protokoll unterstützt, da jedes Mal, wenn Pakete übertragen worden sind, diese entpackt und beim Weitersenden wieder neu mit anderen Informationen verpackt werden.

### 5.13.2 Adressieren eines Ziel Nodes

Eine genaue Adressierung eines einzelnen Nodes wird nicht unterstützt. Durch die Nachrichtentypen wird definiert, ob eine Nachricht eine Node – Leader Nachricht ist (d. h. eine Nachricht die vom Node zum Leader geleitet wird) oder eine Leader- Node Nachricht (d. h. eine Nachricht vom Leader an alle Nodes). Durch die Routing-Tabelle wird bestimmt, über welche Nodes die Nachricht gesendet wird. Eine Nachricht wird immer nur an direkte Nodes weitergeleitet und verworfen, falls diese Nachricht schon erhalten wurde. Dies passiert lediglich im Clusternetz, da im Transportnetz keine einzelnen Nodes existieren.

## 5.14 Finden eines Clusters

Beim Suchen und Finden eines Clusters unterteilt man den Prozess in zwei Kategorien. Die eine Kategorie beschreibt ein Cluster, das ein anderes Cluster sucht ("Cluster Cluster LOOKUP"), während die zweite Kategorie den Fall beschreibt, dass ein einzelner Node ein Cluster sucht ("Node Cluster LOOKUP"). Der „Cluster Cluster LOOKUP“ findet im Transportnetz statt, während der „Node Cluster LOOKUP“ im Clusternetz stattfindet.

### 5.14.1 Cluster-Cluster LOOKUP

Cluster-Cluster-Kommunikationen werden über die LoRa<sup>®</sup> durchgeführt. Wie unter Kapitel 4.1.3 beschrieben ist, besitzt das RYLR896 mehrere Einstellungsmöglichkeiten, wie kommuniziert werden kann. Der LOOKUP startet mit der Suche startet mit der Einstellung der schnellsten Übertragung und skaliert dann runter auf die Langsamste, die aber die höchste Reichweite hat.

Die Nodes, die am nächsten liegen, werden auf den Impuls mit dem Spreading Faktor 7 (SP7) und einer Bandbreite von 250 kHz reagieren. Kommt nach 20 Sekunden keine Antwort, steigt der Spreading Faktor bis auf 12 (SP12) an. Je größer der Spreading Faktor ist, desto länger dauert die Übertragung.

### 5.14.2 Node - Cluster LOOKUP

Node-Cluster-Kommunikation werden auf dem 2,4 GHz ISM Band durchgeführt. Bedingung ist, dass jeder Node in einem Cluster über 2,4 GHz kommunizieren kann. Dies ermöglicht eine höhere Datenaustauschrate und somit eine schnellere Kommunikation. Die Modulation ist so gewählt, dass 250 kbit/s übertragen werden können.

## 5.15 Cluster Bildung

Bei der Clusterbildung gibt es zwei Arten, die unterschieden werden müssen. Die Bewegende und die Stehende. Bei der bewegenden Clusterbildung befinden sich alle Teilnehmer des zu bildenden Clusters in Bewegung. Für die Erkennung eines Clusters wird zuerst ein LOOKUP gesendet, um Clusterbildung anzufragen.

Die Nachricht LOOKUP\_CLUSTER erwartet eine Antwort aller Teilnehmer mit der aktuellen Position und dem Bewegungsvektor, den jeder einzelne Teilnehmer besitzt. Dieser Vektor bestimmt, ob eine Bildung des Clusters möglich ist. Diese Vektoren der beiden Nodes müssen unter Berücksichtigung einer gewissen Toleranz die gleiche Richtung aufweisen. Angenommen die Nodes besitzen unterschiedliche Bewegungsvektoren, also bewegen sich voneinander weg, so würden sich die Nodes nach kurzer Zeit nicht mehr erreichen können.

Um eine Reduzierung der Nachrichten zu ermöglichen, wird ein hierarchisches Peer-to-Peer Model eingesetzt. Diese Hierarchie wird durch einen Leader realisiert, welcher bei der Bildung des dynamischen Clusters gewählt wird. Der Leader übernimmt die Kommunikation zwischen den Clustern und zu den statischen Sendeeinheiten.

Für die Wahl des Leaders gelten folgende Kriterien:

### 5.15.1 Sonneneinstrahlung

Die Sonneneinstrahlung ist eines der wichtigsten Kriterien für die Wahl der Leader. Hat die Sendeeinheit direkte Sonneneinstrahlung bedeutet dies, dass über ihr kein weiterer Container steht. Dadurch erhöht sich die Reichweite des Senders, da nichts abgeschirmt wird. Es bedeutet aber auch, dass viel häufiger gesendet werden kann, da der Stromverbrauch durch das Senden direkt mit der gewonnenen Energie aus den Solarzellen gedeckt werden kann. Der Wert für die Berechnung ergibt sich hier mit **1** oder **0**, ob der Schwellenwert von 4,2V zum Laden der Batterie erreicht wird oder nicht. Damit eine Cluster-Bildung auch in der Nacht stattfinden kann, wird eine Uhr eingebaut. Wäre die Uhrzeit nicht bekannt, würde der Wert für die Sonneneinstrahlung verfälscht werden. Aus diesem Grund wird zu der Zeit der Sonneneinstrahlungsfaktor nicht berücksichtigt.

### 5.15.2 Zustand der Batterie

Da das Senden viel Energie benötigt ist der Zustand der Batterie ein weiteres wichtiges Kriterium. Die Energieberechnung wird im Kapitel 4.3 näher betrachtet. Ist die Batterie des Leaders in einem kritischen Bereich kann die Sendeeinheit ausfallen und die Informationsübertragung des kompletten Clusters bricht zusammen. Der Wert für die Berechnung ergibt sich aus der Prozentzahl des Ladezustandes **0 - 1<sup>4</sup>**.

### 5.15.3 Anzahl der Leaderships

Das Protokoll arbeitet mit einem fairen Verteilungsalgorithmus. Damit eine möglichst gute Verteilung erreicht wird (in Bezug auf die Abnutzung), wird die Anzahl der Leaderships in die Leadership-Wahl mit einbezogen. So kann sichergestellt werden, dass bei

---

<sup>4</sup>0,1 entsprechen 10%



zwei Modulen unter den gleichen Bedingungen nicht immer das gleiche Modul der Leader des Clusters ist.

### 5.15.4 Wie viele Sendeeinheiten sind direkt erreichbar?

Da der Leader eines Clusters die Aufgabe der Datenverwaltung und Erreichbarkeit hat wird eine hohe Erreichbarkeit innerhalb des Clusters vorausgesetzt - angenommen das Cluster existiert als eine Liste. Jedes Modul hat genau zwei erreichbare Partner, außer zwei Module, die jeweils nur einen Partner haben. In diesem Fall würde die Kommunikation zwischen dem Ersten und dem Letzten relativ lange dauern. Hätte nun in diesem Beispiel der Leader nur einen direkten Partner (Empfänger), so müssten die anderen Module in der Liste die komplette Kommunikation aufrechterhalten und die Nachrichten weiterleiten. Das würde dazu führen, dass ein hoher Stromverbrauch vorherrschen würde ohne eine Möglichkeit der Aufladung der Akkus.

### 5.15.5 Berechnung des Leadershipindex

$L_i = \text{Leadershipindex}$

$S = \text{Sonneneinstrahlung}$

$Z_b = \text{Zustand der Batterie}$

$A_L = \text{Anzahl der Leaderships}$

$E_D = \text{Direkte Sendeeinheiten}$

#### Faktoren<sup>5</sup>

$\alpha = 100$

$\beta = 5$

$\gamma = 0.1$

$$L_i = \alpha * S + \beta * Z_b + A_L + \gamma * E_D$$

---

<sup>5</sup>Diese Werten wurde als Annahme genommen und unterliegen keiner Berechnung

### 5.15.6 Berechnung gemeinsamer Bewegungsvektor in Bewegung

$v_E = \text{Eigenvektor}$

$v_P = \text{Partnervektor}$

$$v_E = \begin{bmatrix} lat_0 - lat_1 \\ long_0 - long_1 \end{bmatrix}, v_P = \begin{bmatrix} lat_0 - lat_1 \\ long_0 - long_1 \end{bmatrix}$$

$$|v_E - v_P| \leq 1$$

*Bestimmung Differenz der Bewegung*

Die Länge der Differenz der beiden Bewegungsvektoren gibt an, wie weit sich die beiden auseinander- oder zusammenbewegen. Je mehr Länge gegen Null tendiert, desto ähnlicher sind die Bewegungsvektoren und desto eher kann davon ausgegangen werden, dass die Nodes sich auf dem selben Transportmittel befinden und in die gleiche Richtung fahren.

## 5.16 Redundanz von Daten

### 5.16.1 Senden von Daten im Cluster

Erfolgt eine Aufnahme von Sensordaten, werden diese im eigenen Filesystem abgespeichert. Nach der Sicherung der Daten werden diese Daten mit jedem Node im Cluster geteilt.

Die Sensordaten werden als zusammenhängende Nachricht gesendet und von den Nodes abgespeichert und mit anderen Nodes geteilt. Diese Nachrichten werden mit folgendem Nachrichten-Typ gesendet: **NUSD** ( **N**ode **U**ppdate **S**ensor **D**ata )

Als Sensordaten werden alle Daten bezeichnet, die nicht der Identifikation des Nodes im Cluster dienen. Demnach sind Sensordaten:

- Bewegungsdaten
- Events (Schieflage, Erschütterung, etc.)

Die Update Nachricht ist wie folgt aufgebaut:

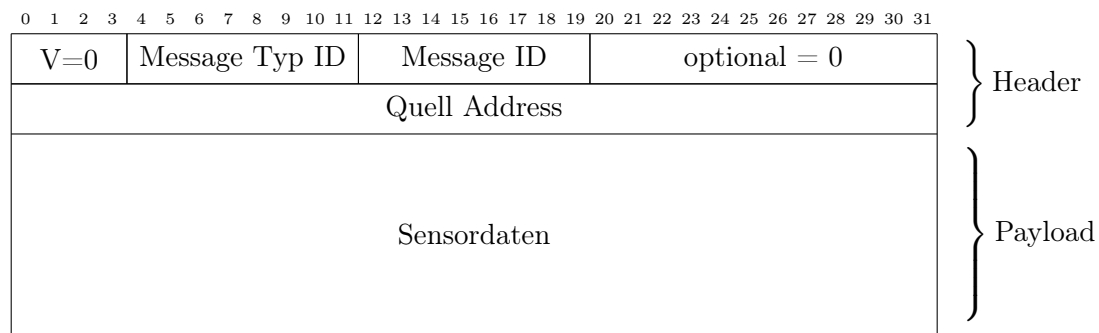


Abbildung 5.13: Paket Intra Cluster Sensorupdate

### Versionsnummer (V)

Die Versionsnummer gibt die Version des Paketes an mit der gesendet wird.

In diesem Fall wird keine Zieladresse benötigt, da alle Sensordaten an den Leader gesendet werden. Im Kapitel 5.13 ist dies konkret beschrieben.

### 5.16.2 Vorhalten von Informationen im Cluster

Das Vorhalten der Informationen ist ein wichtiger Bestandteil der Redundanz des Protokolls. Durch die Speicherung können Sicherheit und Exaktheit der Daten gewährleistet werden. Wenn im Cluster ein Node die Nachrichten absichtlich beschädigen oder verändern würde, hätten alle anderen Nodes noch die korrekten Informationen.

### 5.16.3 Quittierung von Nachrichten durch Statisches Modul

Überträgt ein Leader eines Clusters die Informationen eines Nodes im Cluster an einen statischen Node, so gilt diese Information als quittiert. Da ein Node n-Nachrichten von anderen Nodes gespeichert hat (Sensordaten oder Positionsdaten), so müssen diese alle quittiert werden.

### 5.16.4 Verifizierung der Informationen

Die Verifizierung der Informationen erfolgt durch das Senden der Informationen an einen statischen Node. Erfolgt das Übertragen der Daten von dem Node, auf den sich die Daten

beziehen, werden die gesendeten Nachrichten als *verifiziert* gekennzeichnet. Die Kennzeichnung erfolgt nicht innerhalb des Clusters, sondern lediglich durch den statischen Node und dem dynamischen Node.

### 5.16.5 Löschen von Nachrichten von einem fremden Node

Wurde eine Nachricht von einem fremden Node quittiert, so ist sie übertragen worden und kann gelöscht werden. Die Übertragung der Daten innerhalb eines Clusters zu einem statischen Node wird von einem Leader übernommen. Nach der Quittierung wird eine Nachricht durch das Cluster an alle Nodes geschickt mit der Info, dass diese Nachricht quittiert worden ist. Nun können auch alle Nodes im Cluster diese Information des fremden Nodes löschen. Es wird der Timestamp der letzten Information des Nodes abgespeichert. So können Nachrichten aus fremden Clustern mit der Information abgewiesen werden, dass diese Informationen schon übertragen worden sind.

Geht man davon aus, dass die Größe eines Timestamps 8 Byte beträgt, etwa 130 Millionen Container existieren und jeder Container ein Modul besitzt, kommt man auf einen Speicherbedarf von:

$$sTimestamp = 8 \text{ Byte}$$

$$sSenderAddress = 4 \text{ Byte}$$

$$sAnzahlContainer = 130.000.000$$

$$(sTimestamp + sSenderAddress) * sAnzahlContainer = 4.16 \text{ GB}$$

Das wäre die maximal Größe der Datei, wenn alle Container mit einem Modul ausgestattet wären und jeder Container mit jedem Container einmal in einem Cluster gewesen ist oder eine Übertragung erhalten hätte. Aus dieser Größe der Tabelle lässt sich aber schließen, dass es nicht sinnvoll wäre die Informationen über den aktuellen Stand (zeitlich) im Speicher des Microcontrollers zu halten. Das wäre technisch auch nicht möglich.

### 5.16.6 Löschen von Nachrichten vom eigenen Node

Wurde eine Nachricht vom eigenen Node quittiert, ist diese gleichzeitig verifiziert. Ist eine Nachricht vom eigenen Node verifiziert, wird sie gelöscht. Sie wurde erfolgreich an das Internet übertragen und muss nicht mehr auf dem Node vorgehalten werden. Auch diese

Information wird an das Cluster weitergegeben, so dass die Informationen über diesen Node gelöscht werden können.

## 5.17 Austreten aus Cluster

Ein Node tritt aus dem Cluster aus, wenn die Stabilität nicht mehr gegeben ist. Es gelten die umgekehrten Bedingungen für die Erstellung oder das Eintreten in ein Cluster. Die Bedingungen zum Erstellen oder Eintreten in ein Cluster sind in Kapitel 5.15 beschrieben.

Sind die Bedingungen nicht mehr gegeben, schickt der Node eine Nachricht an sein Cluster **NLC (Node Leave Cluster)** und wird so aus den Tabellen von allen Teilnehmern vom Cluster gelöscht.

## 5.18 Cluster Auflösung

Ein Cluster wird aufgelöst wenn die Anzahl der Teilnehmer unter zwei fällt.

## 5.19 Notfall - Erkennung und Handeln bei Havarie

Der Fall eines Containers wird durch das Gyroscope bemerkt. Erreicht die Messung einen kritischen Bereich schaltet der Container in den Emergency-Modus. In diesem Modus existiert keine Gruppierung in einem Cluster, auch wenn dieses physisch noch vorherrscht.

Schaltet die Sendeeinheit in den Emergency-Modus so sendet diese als erstes eine Notfallnachricht an das Cluster, bevor es dieses verlässt. Diese Nachricht wird mit erhöhter Priorität an einen nächstgelegenen Empfänger weitergeleitet. Die Sendeeinheit bestimmt durch Abfragen, welche Container in erreichbarer Nähe sind und speichert diese Informationen. Des Weiteren sendet sie zyklisch ein Notfallsignal bestehend aus der aktuellen Position und dem Gefährlichkeitsgrad der Ladung. So können im Fall eines Fundes direkte Maßnahmen getroffen werden.

## 5.20 Einschränkungen des Protokolls

Da sich die einzelnen Cluster bewegen, verändert sich die Routing-Tabelle des Transportnetzes jederzeit. Dadurch werden viele Schreiboperationen auf den Textfiles ausgeführt und dies kostet Energie ( siehe Kapitel 4.3 ). Jede Änderung an der Routing-Tabelle erzeugt eine Update-Nachricht für das Transportnetz. Ein Vorteil ist die langsame Geschwindigkeit von Schiffen. Zwar ändern sich die Routen, jedoch nur sehr langsam.

Ein weiteres Problem ist die Ansammlung aller Daten von den Nodes, die über die Zeit zusammenkommen. Angenommen ein Schiff fährt an zehn Schiffen vorbei und jedes Schiff hat ein Cluster mit zehn Teilnehmern, hat dieses Schiff 121 Daten aller Nodes. Wenn man alleine die Adressen dieser Nodes in einem Array übertragen möchte und jedes Paket nur 51 Byte ( siehe Kapitel 5.5 ) groß sein darf, dann ergibt sich:

$$121 \text{ Nodes} * 4 \text{ Byte} = 484 \text{ Bytes}$$

$$484 \text{ Bytes} / 51 \text{ Byte} = 10 \text{ Pakete}$$

Im schlimmsten Fall - Fall – bei einem Spreading Faktor von 12, einer Bandbreite von 125 MHz und einer Code Rate von 4 – beträgt die Übertragungszeit von einem Paket etwa 2,3 Sekunden [21]. Für den Austausch aller 10 Pakete sind also  $10 * 2793,5 \text{ ms} =$  **27.935 ms** notwendig. In dieser Berechnung ist der Header jeder einzelnen Nachricht nicht berücksichtigt. Dieser würde mit zusätzlichen 4 Byte pro Nachricht dazugerechnet werden.

# 6 Anwendung des Moduls

## 6.1 Praktischer Test Unterwasserkommunikation

Im Falle einer Havarie, bei der ein Container unter Wasser gesunken ist, muss sichergestellt werden, dass dieser auch unter Wasser erreichbar ist.

### 6.1.1 Versuchsaufbau

Als Mikrocontroller wird ein Arduino Nano genommen und mit einem Funkmodul RYLR896 LoRa 868 MHz verbunden. Die Sendeleistung wird auf 15dBm eingestellt mit einem Spreading Faktor von SF12. Die Bandbreite der Übertragung wird auf 125 kHz mit einer Sendefrequenz von 915 MHz festgelegt. Das Funkmodul wird via Serial an den Arduino Nano angeschlossen und sendet zyklisch alle 3 Sekunden 8 Byte. Die 8 Byte beinhalten die aktuelle Laufzeit des Arduinos in einem zeitlichen Format von "%H:%M%S". Eine 2500 mAh Powerbank mit einem Output von 5V und 1A betrieben versorgt den Arduino mit Strom. Im Folgenden wird der Aufbau als „Sendeeinheit“ beschrieben. Die Sendeeinheit wird in einer wasserdichten Box in das Isoliermedium gelassen.

Der Empfänger ist ein Baugleicher RYLR896 mit denselben Einstellungen. Dieser wird mit einem Serial Adapter (USB) an einen Computer angeschlossen und ausgelesen. Die Ergebnisse werden in einer Liste erfasst. Gemessen werden die o. g. 8 Byte als Datenpaket und die Signalstärke (dBi).

Als Isoliermedium dient ein 25 m langer Teich, in dem die Sendeeinheit ins Wasser gelassen wird bei einer Tiefe von 20 cm. Der Empfänger befindet sich direkt über dem Sender an der Wasseroberfläche.

### 6.1.2 Ablauf

Die Distanz zwischen der Sendeeinheit und dem Empfänger wird kontinuierlich erhöht bis die Verbindung abbricht - mit einer Ausgangsdistanz von 25 m. Gemessen wird die Empfangsleistung vor und nachdem die Sendeeinheit ins Wasser gelassen wird.

Der Empfänger misst kontinuierlich die Sendepakete und schreibt den Inhalt (Inhalt der Pakete, Paketgröße, Sendeleistung) in eine Datei.

Es wurde nicht gemessen, ab welcher Tiefe kein Empfang mehr möglich ist, sondern es sollte mit diesem Versuch untersucht werden, ob LoRa<sup>®</sup> als eine mögliche Lösung für Unterwasserkommunikation auf kurzen Distanzen geeignet ist, speziell im Havariefall.

### 6.1.3 Ergebnis / Schlussfolgerung

Sobald der Sender die Wasseroberfläche berührt und komplett mit Wasser umgeben ist, nimmt die Empfangsleistung exponentiell ab. Schon ab einer Tiefe von 20 cm können keine Pakete mehr vom Empfänger empfangen werden.

Daraus lässt sich schließen, dass LoRa<sup>®</sup> mit einem anderen Spread Faktor nicht für Unterwasserkommunikation geeignet ist und im Falle einer Havarie der Container so nicht wiedergefunden werden kann.

## 6.2 Praktischer Test Funk durch Metall mit LoRa

### 6.2.1 Versuchsaufbau

Als Mikrocontroller wird ein Arduino Nano genommen und mit einem Funkmodul RYLR896 LoRa 868 MHz verbunden. Die Sendeleistung wird auf 15 dBm eingestellt mit einem Spreading Faktor von SF12. Die Bandbreite der Übertragung wird auf 125 kHz mit einer Sendefrequenz von 915 MHz festgelegt. Das Funkmodul wird via Serial an den Arduino Nano angeschlossen und sendet zyklisch alle 3 Sekunden 8 Byte. Die 8 Byte beinhalten die aktuelle Laufzeit des Arduinos in einem zeitlichen Format von "%H:%M%S". Eine 2500 mAh Powerbank mit einem Output von 5V und 1A betrieben versorgt den Arduino mit Strom. Im weiteren wird der Aufbau als „Sendeeinheit“ beschrieben. Die Sendeeinheit wird in einer wasserdichten Box in das Isoliermedium gelassen.



Der Empfänger ist ein Baugleicher RYLR896 mit denselben Einstellungen. Dieser wird mit einem Serial Adapter (USB) an einen Computer angeschlossen und ausgelesen. Die Ergebnisse werden in einer Liste erfasst. Gemessen werden die o. g. 8 Byte, welche von der Sendeeinheit gesendet werden und die Signalstärke (dBi).

Als Isoliermedium werden 20 ft Seecontainer genommen. Die maximale Anzahl in diesem Versuch ist vier.

Die Erwartung ist eine Schwächung der Signalstärke, jedoch keine komplette Dämpfung, da die Containerwände aus dünnem Metall sind.

### 6.2.2 Ablauf

Die Sendeeinheit wurde in den ersten der vier nebeneinander gestellten Container verbracht und der Container verriegelt. Stetig wurde der Abstand zum Container vergrößert und der Empfänger hinter den vierten Container positioniert. Alle drei Sekunden wurde ein Messwert über Größe des Paketes und Empfangsstärke genommen.

### 6.2.3 Ergebnis / Schlussfolgerung

Die Messwerte zeigen, dass nach dem Schließen der Tür im ersten Container eine leichte Dämpfung auftritt, jedoch diese kaum merklich ist. Nachdem der Empfänger hinter dem vierten Container platziert wurde, wurden immer noch Pakete mit einer relativ guten Empfangsstärke empfangen (-105 dBi). Leider konnte nicht getestet werden, ab wann die Verbindung vollständig abreißt, beziehungsweise die Pakete nicht vollständig empfangen werden können, da nur vier Container vorhanden waren.

Mit LoRa<sup>®</sup> innerhalb des Netzes lassen sich so aber durch die Container im Hafen oder auf dem Schiff Informationen austauschen. Mit dieser Information ist die Mindestanzahl von Sendeeinheiten pro Schiff deutlich geringer für eine komplette Abdeckung auf dem Schiff.

# 7 Ergebnis

## 7.1 Einschränkungen und Lösungen

### 7.1.1 Technische Einschränkungen

Das Modul basiert auf dem Konzept des dezentralen Netzwerkes und funktioniert nur in Verbindung mit anderen Modulen. Ein dezentrales Netz basiert auf der Gleichheit seiner Teilnehmer und muss per Definition aus mindestens zwei Teilnehmern bestehen.

Die Sendeeinheit kann nur einen Standort erfassen, wenn sie auch eine direkte Verbindung zu den Satelliten hat, die die Position bestimmen. Gleichzeitig muss diese Einheit auch in der Lage sein diese Informationen an das Internet zu übertragen. Dies wiederum funktioniert nur über die static Nodes im System. Es müssen also genügend dynamic Nodes in Reichweite sein, um alle Informationen zum nächsten static Node übertragen zu können und das möglichst ohne Zeitversatz.

Damit dieses Problem nicht auftritt müssen genug Container mit einem Modul ausgestattet sein. Wird gleichzeitig sichergestellt, dass sich mindestens ein Modul am obersten Container befindet, kann eine stabile Verbindung zu anderen Containerschiffen aufgebaut werden.

Eine weitere Lösung wäre der Einsatz von Satelliten. Anstatt von jedem Modul den Standort einzeln zu übertragen, könnte man den Standort von allen Modulen mit einer einzigen Nachricht mitteilen. Die Kosten würden sich dann lediglich auf eine Nachricht belaufen und nicht pro Modul anfallen. Ein gemeinsam genutzter Vertrag aller Module beim Satellitenprovider ist Voraussetzung.

### 7.1.2 Einschränkung Sendeleistung

Ein weiteres Problem existiert in der Sendeleistung und Sendereichweite des Moduls. Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit, dass auf der kompletten Fahrt immer ein Schiff in Reichweite ist, das die Informationen der Module weiterleiten kann? Wie hoch kann maximal die Entfernung zu einem anderen Schiff sein und wo muss sich die Sendeeinheit dann befinden? Hier spielt die Position eine entscheidende Rolle. Kreuzen sich zwei Schiffe auf einer Entfernung von 15 km so müssen die Module sich auf der sich zugewandten Seite des Schiffes befinden, um eine optimale Übertragung zu gewährleisten. Andernfalls gilt das eigene Schiff mit den Containern als Isolierung und eine Übertragung findet nicht statt.

### 7.1.3 Lösung für Sendeleistung

Es gibt einen schiffsweiten Überträger, welcher die Kommunikation der Container auf dem Schiff regelt. Dieser muss nicht mit einem Satelliten verbunden sein und somit auch nicht mit dem Internet. Diese Sendeeinheit übernimmt die Kommunikation zwischen Schiffen, sofern das andere Schiff ebenfalls ein Modul besitzt. Andernfalls sendet diese Einheit zu einem anderen Container auf dem Schiff. Auch hier muss diese Einheit sich in Reichweite befinden.

## 7.2 Berechnung der Reichweite

Laut der Tests liegt die Reichweite des RYLR896 bei 15km [32]. Wie weit ist die Sichtweite auf dem offenen Meer unter Berücksichtigung der Erdkrümmung? Die Berechnungsgrundlage ist die Höhe der MSC Zoe. Im folgenden wird theoretisch berechnet wie weit man unter Berücksichtigung der Erdkrümmung sehen kann (Sichtweite).

$$R = 7,68$$

*Erdradius unter Berücksichtigung der atmosphärischen Refraktion*

Die terrestrische Refraktion ist die „Krümmung der Ausbreitungsrichtung des Lichtes von einem Sichtziel [...], weil die Luftdichte (infolge Temperaturabnahme) und damit

der Brechungsindex der Luft vom Boden nach oben hin abnehmen. Die terrestrische Refraktion bewirkt, daß bei normaler Luftschichtung der geodätische Horizont angehoben wird, und zwar bei einer Augenhöhe von 10 m um 1', wodurch die Sichtweite um 1 km vergrößert wird.“ (Refraktion [5])

$$sh = 73m$$

Höhe der MSC Zoe von der Wasseroberfläche (inklusive Containerreihen)

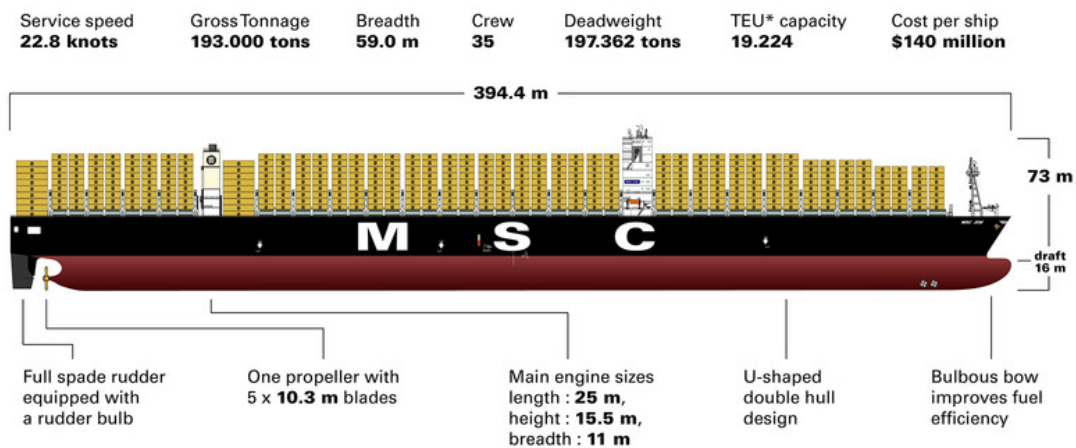


Abbildung 7.1: MSC Zoe Infografik - Foto: MSC

$$d = \sqrt{2R} * (\sqrt{sh} + \sqrt{sh})$$

$$d = 66,98km$$

Sichtweite

Die Berechnung der Sichtweite bis zum Horizont wurde mit dem Tool auf der Seite von RechnerOnline.de durchgeführt. [31]

### 7.3 Modul in der Praxis

In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie das Modul in der Praxis eingesetzt werden kann.

Das Modul besitzt auf der Rückseite einen QR Code mit dem man einen schnellen Zugriff erhält. Über eine App lässt sich dieser QR Code scannen und die Informationen abrufen. Nun wird das Modul auf der Oberseite des Containers angebracht. Nachdem das Modul auf den Container registriert wurde (UN-Nummer und ID) ist es einsatzbereit. Über ein Backend kann man nun Gefahrgüter und Fracht sowie einen Notfallkontakt eingeben, der informiert werden soll, sollte etwas mit dem Container passieren.

Das statische Modul im Hafen überträgt diese Informationen an das Modul, so dass dieses ebenfalls alle Informationen vorhalten kann.

Sollte das Modul den Container nicht verlassen, lassen sich zukünftig alle Informationen über Gefahrenstoffe und Inhalt sowie Notfallkontakt einfach über das Internet aktualisieren. Sobald das Modul in Reichweite von einem statischen Modul kommt, aktualisiert es seine Informationen automatisch.

Entfernt man das Modul vom Container, so kann man dieses über die App einfach vom Container abmelden und der Prozess startet von vorne.

### 7.4 Schlusswort

Die Havarie wäre mit diesem System frühzeitig erkannt worden. Auch die Container wären schnell wiedergefunden worden, auch wenn das Unterwasserfunken nicht möglich ist.

Ich habe mich lange mit diesem Sachverhalt beschäftigt. Durch Akkumulation von Informationen über Logistik und Containerverschiffung, komme ich zu dem Schluss, dass eine Entwicklung einer Technik zur Behebung dieser Problematik machbar ist.

Die Havarie der MSC Zoe und das Überbordgehen der Container wäre zwar nicht verhindert worden, jedoch aber die monatelange Suche nach den versunkenen oder schwimmenden Containern.

Diese Arbeit zeigt, dass das neue Verfahren bereits mit bestehenden Komponenten umsetzbar ist.

Dieses Verfahren bietet Potenzial für einen neuen Wirtschaftszweig "SSmart Container", weil es nicht nur im Falle einer Havarie hilfreich ist, sondern ermöglicht in Echtzeit Informationen über den Container zu erhalten.

Nach dem ernüchternden Ergebnis des Unterwassertests, muss eine technische Komponente entwickelt werden, die es ermöglicht den Container auch unter Wasser aufzufinden. Ein vielversprechender Weg wurde bereits von mir entwickelt, würde aber den Rahmen dieser Bachelorarbeit sprengen.

Ein Einsatz dieses Verfahren dient nicht nur dem Schutz der Meere, sondern birgt auch großes wirtschaftliches Potenzial.

Statt teurer Satellitentracker lässt sich kostengünstig und sicher der exakte Standort von Containern bestimmen.

# Literaturverzeichnis

- [1] Günther Bengel. *Grundkurs Verteilte Systeme/Grundlagen und Praxis des Client-Server und Distributed Computing/4. Auflage*. Springer Vieweg, 2014.
- [2] Alan Hevner Samir Chatterjee. *Design Research in Information Systems: Theory and Practice (Integrated Series in Information Systems (22), Band 22)*. Springer Verlag, 2010.

## Verzeichnis der Webadressen

- [3] Der container | eine geniale idee. <http://www.hamburg-container.com/container.html>. Eingesehen am 29.11.2020.
- [4] Fracht über Bord: Wie konnten die Container der "MSC Zoe" ins Wasser fallen. <https://segelreporter.com/panorama/fracht-ueber-bord-wie-konnten-die-container-der-msc-zoe-ins-wasser-fallen/>. Eingesehen am 14.03.2020.
- [5] Refraktion. <https://www.spektrum.de>. Eingesehen am 24.01.2020.
- [6] Containerversicherung. [https://www.transport-makler.de/Containerversicherung\\_-293.aspx](https://www.transport-makler.de/Containerversicherung_-293.aspx). Eingesehen am 02.03.2020.
- [7] Container Identification. <https://transportgeography.org>. Eingesehen am 01.01.2020.
- [8] Spread factor VS payload size on LoRa. <https://mylorawan.blogspot.com/2016/05/spread-factor-vs-payload-size-on-lora.html>. Eingesehen am 07.02.2020.
- [9] Havarie „msc zoe“ - bergungsarbeiten abgeschlossen. <https://www.gefahrgut.de/themen/seeverkehr-imdg-code/havarie-msc-zoe-bergungsarbeiten-abgeschlossen>. Eingesehen am 29.11.2020.
- [10] Mehr als 200 verlorene Container in der Nordsee geortet. <https://www.spiegel.de/panorama/msc-zoe-havarie-in-der-nordsee-grossteil-der-container-geortet-a-1246761.html>. Eingesehen am 04.04.2020.
- [11] Große (gemeinschaftliche) Haverei. <https://www.tis-gdv.de/tis/bedingungen/havariegroesse/inhalt-htm>. Eingesehen am 11.03.2020.
- [12] Havariekommando. <https://www.havariekommando.de/DE/wir-ueber-uns/wir-ueber-uns-node.html>. Eingesehen am 02.03.2020.
- [13] Smart Container. [https://www.havariekommando.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2019/20190\\_MSC\\_ZOE\\_X.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.havariekommando.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2019/20190_MSC_ZOE_X.pdf?__blob=publicationFile&v=4). Eingesehen am 14.03.2020.



- [14] Frachtschiff verliert Container im Rhein. [https://rp-online.de/panorama/deutschland/frachtschiff-verliert-container-im-rhein\\_aid-8632481](https://rp-online.de/panorama/deutschland/frachtschiff-verliert-container-im-rhein_aid-8632481). Eingesehen am 04.04.2020.
- [15] Interrupt. <https://whatis.techtarget.com/definition/interrupt>. Eingesehen am 14.03.2020.
- [16] ISO6346. <https://www.csiu.co/>. Eingesehen am 24.01.2020.
- [17] Bremerhaven-antwerpen. <https://www.dreamlines.de/kreuzfahrt/bremerhavenantwerpen-304689>. Eingesehen am 05.03.2020.
- [18] Us18650vtc6. <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/en/001499574DS02/datenblatt-1499574-sony-us18650vtc6-spezial-akku-18650-hochstromfaehig-flat-top-li-ion-37-v-3000-mah.pdf>. Eingesehen am 05.03.2020.
- [19] Lobar LoRa GPS Tracker. <https://www.lobaro.com/portfolio/lorawan-gps-tracker/>. Eingesehen am 03.03.2020.
- [20] LoRaWAN Coverage. <https://lora-alliance.org/lorawan-coverage>. Eingesehen am 03.03.2020.
- [21] LoRa Data rate Calculator | LoRa Bit rate Calculator. <https://www.rfwireless-world.com/calculators/LoRa-Data-Rate-Calculator.html>. Eingesehen am 16.03.2020.
- [22] Ground breaking world record! LoRaWAN packet received at 702 km (436 miles) distance. <https://www.thethingsnetwork.org>. Eingesehen am 05.02.2020.
- [23] Marinetraffic live map. <https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centerx:5.1/centery:52.8/zoom:9>. Eingesehen am 05.03.2020.
- [24] 3-Axis Orientation/Motion Detection Sensor. <https://static6.arrow.com/aropdfconversion/5ef1ada60dfd90c33e0dce494d09dacd08f6c973/1552406374076>. Eingesehen am 05.03.2020.
- [25] MSC übernimmt Kosten. <https://www.haz.de/Nachrichten/Panorama/Uebersicht/Nordsee-Havarie-MSC-uebernimmt-alle-Kosten>. Eingesehen am 14.03.2020.
- [26] RFC791. <https://tools.ietf.org/>. Eingesehen am 23.01.2020.

- [27] NEO 6M u-blox 6 GPS Modules. [https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6\\_DataSheet\\_\(GPS.G6-HW-09005\).pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_(GPS.G6-HW-09005).pdf). Eingesehen am 07.02.2020.
- [28] nRF24L01. <https://www.sparkfun.com>. Eingesehen am 29.01.2020.
- [29] Chartervertrag. <http://hwb-eup2009.mpipriv.de/index.php/Chartervertrag>. Eingesehen am 25.11.2020.
- [30] Rfc1122. <https://tools.ietf.org/html/rfc1122>. Eingesehen am 14.03.2020.
- [31] Sichtweite berechnen: Entfernung bis zum Horizont. <https://rechneronline.de>. Eingesehen am 24.01.2020.
- [32] RYLR896. <http://reyax.com/>. Eingesehen am 24.01.2020.
- [33] Starcom Tetis Hybrid. <https://www.satphonestore.com/starcom-tetis-hybrid-3g-satellite-gps-container-tracking-system.html>. Eingesehen am 24.01.2020.
- [34] Sandisc microSD. <https://www.alliedelec.com/m/d/04db416b291011446889dbd6129e2644.pdf>. Eingesehen am 05.03.2020.
- [35] Semtech What is LoRa<sup>®</sup>. <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>. Eingesehen am 03.03.2020.
- [36] Common ISO Container Size and Type Codes. [https://transportgeography.org?page\\_id=2707](https://transportgeography.org?page_id=2707). Eingesehen am 16.03.2020.
- [37] Smart Container. [https://www.havariekommando.de/SharedDocs/Downloads/DE/Infotexte\\_-\\_Containerverlust\\_MSC\\_ZOE/Info\\_SMART\\_Container.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.havariekommando.de/SharedDocs/Downloads/DE/Infotexte_-_Containerverlust_MSC_ZOE/Info_SMART_Container.pdf?__blob=publicationFile&v=1). Eingesehen am 14.03.2020.
- [38] Study of LoRa. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>. Eingesehen am 23.01.2020.
- [39] Seitensichtsonar. <https://db0nus869y26v.cloudfront.net>. Eingesehen am 18.01.2020.
- [40] SX1276/77/78/79 - 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver. <https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R0000001OKs/Bs97dmPXeatnbdoJNVMIIGxDcgqi7g2o>. Eingesehen am 05.03.2020.
- [41] The Things Network Airtime Calculator. <https://www.thethingsnetwork.org/>. Eingesehen am 24.01.2020.

- [42] Velleman SOL4N Polykristallines Solarmodul 2V.  
<https://www.conrad.de/de/p/velleman-sol4n-polykristallines-solarmodul-2-v-1713839.html>. Eingesehen am 05.03.2020.
- [43] Vodafone netzabdeckung deutschland. <https://www.vodafone.de/hilfe/netzabdeckung.html>.  
Eingesehen am 05.03.2020.
- [44] Vodafone netzabdeckung niederlande. <https://www.vodafone.nl/support/internet-en-dekking/dekkingskaart.shtml>. Eingesehen am 05.03.2020.
- [45] 443 vodafone infodok (seite 5). <https://www.vodafone.de/infobox/443.pdf>. Eingesehen am 05.03.2020.
- [46] Klima und wetter an der nordsee. <https://www.wetteratlas.de/klima/europa/deutschland/nordsee.php>. Eingesehen am 05.03.2020.
- [47] Wie viele Container fallen im Jahr von Schiffen ins Meer? <https://www.zukunft-mobilitaet.net/>. Eingesehen am 18.01.2020.

# A Anhang

## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

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

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

## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: \_\_\_\_\_

Vorname: \_\_\_\_\_

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

### **Notfall-Seecontainer-Positionssystem in einem dezentralen Netzwerk**

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

\_\_\_\_\_

Ort	Datum	Unterschrift im Original
-----	-------	--------------------------