



Faculteit Bedrijf en Organisatie

Het bepalen van een optimale opstelling voor de registratie van een verplaatsing van locatie binnen een gebouw

Cedric Delaruelle

Scriptie voorgedragen tot het bekomen van de graad van
professionele bachelor in de toegepaste informatica

Promotor:
Johan Van Schoor
Co-promotor:
Pieter Suanet

Instelling: Aucxis

Academiejaar: 2021-2022

Tweede examenperiode

Faculteit Bedrijf en Organisatie

Het bepalen van een optimale opstelling voor de registratie van een verplaatsing van locatie binnen een gebouw

Cedric Delaruelle

Scriptie voorgedragen tot het bekomen van de graad van
professionele bachelor in de toegepaste informatica

Promotor:
Johan Van Schoor
Co-promotor:
Pieter Suanet

Instelling: Aucxis

Academiejaar: 2021-2022

Tweede examenperiode

Woord vooraf

Samenvatting

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus.

Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	17
1.1	Probleemstelling	17
1.2	Wie is Aucxis	17
1.3	Onderzoeks vraag	18
1.4	Onderzoeksdoelstelling	18
1.5	Opzet van deze bachelorproef	19
2	Literatuurstudie	21
2.1	Definities	21
2.2	Hardware	22
2.2.1	RFID	22
2.2.2	BLE	25
2.3	Software	27

3	Methodologie	29
3.1	RFID	30
3.2	BLE	30
4	Opstellingen	31
4.1	RFID	32
4.1.1	Statisch	32
4.1.2	Dynamisch	33
4.2	BLE	34
4.2.1	Statisch	34
4.2.2	Dynamisch	35
5	Testen	37
5.1	RFID	37
5.1.1	1 antenne aan deurlijst	38
5.1.2	2 antennes aan deurlijst	38
5.1.3	1 antenne tegenover deur	43
5.1.4	1 tag aan deurlijst	46
5.2	BLE	48
5.2.1	Vooronderzoek	48
5.2.2	1 gateway per locatie	53
5.2.3	Meerdere gateways per locatie	56
5.2.4	Gateways in rasteropstelling	58
5.2.5	1 beacon per locatie, midden van locatie	60
5.2.6	1 beacon per locatie, aan deur	60

5.2.7 Meerdere locatiebeacons per locatie	60
5.2.8 Beacons in rasteropstelling	60
5.2.9 Beacons op intervallen in de gang	61
6 Conclusie	63
A Onderzoeksvoorstel	65
B Bibliografie	67
Bibliografie	69

Lijst van figuren

Lijst van tabellen

Listings

1. Inleiding

1.1 Probleemstelling

Momenteel is Aucxis, het bedrijf waar ik mee samenwerk voor het schrijven van deze bachelorproef, bezig met het uitwerken van hun Polaris platform. Het voornaamste doel van dit platform is het kunnen volgen van voorwerpen binnen en buiten bedrijven. Dit aan de hand van verschillende technologieën, voornamelijk RFID en BLE binnen het bedrijf, en GPS daarbuiten. Het concept van dit platform is dat er logische locaties bestaan (zoals warenhuis 1 of keuken), waar de voorwerpen zich bevinden. Voor een goede werking van dit systeem is het dus duidelijk nodig dat uit de data bekomen uit de hardware kan afgeleid worden op welke logische locatie een voorwerp zich bevindt en wanneer het zich verplaatst tussen locaties. Dit is geen normaal softwareprobleem want logischerwijs zal de manier waarop de hardware staat opgesteld een grote invloed hebben op de nauwkeurigheid en correctheid van deze lokalisaties en verplaatsingen. Hierdoor is het dus van groot belang voor de correcte werking van dit platform dat een goede opstelling wordt gekozen en om dit te kunnen doen is er dus een onderzoek nodig naar wat deze optimale opstelling zou kunnen zijn. Dit is dus ook de reden dat dit onderzoek in het leven is geroepen.

1.2 Wie is Aucxis

Aucxis is een bedrijf gevestigd te Stekene, welke actief is sinds 1983. Bij oprichting was het een bedrijf dat zich toespitste op het ontwikkelen van eenderzijds de bewaring (Procescontrole), en anderzijds de veilinginfrastructuur (E-trade) voor groenten en fruit. Het werd hier vrij snel een toonaangevend bedrijf en werd wereldleider tegen 2000. Later, in 2007 richtten ze een 3e businessunit op, namelijk de RFID divisie, welke zich focust op

het onderzoek naar en ontwikkeling van RFID toepassingen. Vandaag is het nog steeds een toonaangevend bedrijf met in-house oplossingen voor allerhande toepassingen binnen deze sectoren en zijn ze nog steeds actief bezig aan de optimalisering en uitbreiding hiervan. Recentelijk zijn ze ook geïnteresseerd geworden in het uitbreiden van hun praktijken naar BLE toepassingen.

1.3 Onderzoeksvergadering

Zoals duidelijk is geworden in de probleemstelling is er nood aan een onderzoek voor het vinden van een zo optimaal mogelijke opstelling voor het bepalen van locaties waar een voorwerp zich bevindt, en de verplaatsing van een voorwerp tussen die locaties. Met oog op deze probleemstelling luidt de onderzoeksvergadering voor deze bachelorproef als volgt:

Welke hardwareopstelling, bestaande uit RFID of BLE componenten, is optimaal voor de plaats- en verplaatsingsbepaling van een voorwerp binnen een gebouw.

Deze vraag omvat goed de essentie van de situatie die dient onderzocht te worden, namelijk de beste opstelling voor het volgen van een voorwerp binnen een gebouw, en dit met RFID of BLE technologie. Binnen de probleemstelling werd echter ook aangegeven dat binnen de scope van Polaris ook gps lokalisatie voor voorwerpen buiten het bedrijf aanwezig was. Locatiebepaling met behulp van gps is echter al goed ingeburgerd, waardoor er voldoende bronnen zijn en dit ook duidelijk en precies is, waardoor het geen nut heeft dit ook te onderzoeken en dus wordt dit onderdeel buiten de scope van deze bachelorproef gehouden. Plaatsbepalingen binnen zijn echter niet zo optimaal voor gps aangezien de meeste gebouwen/kantoren beschikken over verdiepingen (waar er dus meerdere locaties dezelfde geografische coördinaat hebben), en gps ook een bepaalde onzekerheid heeft op de meting.

1.4 Onderzoeksdoelstelling

Het hoofddoel van deze bachelorproef is het vergelijken van een aantal opstellingen, met RFID of met BLE, met verschillende concepten waarom ze werken. Deze verschillende opstellingen met hun theoretische achtergrond volgen verder in dit verslag. Zoals de onderzoeksvergadering echter al doet vermoeden is het doel niet louter een vergelijkende studie, aangezien het ook de bedoeling is dat er een optimale opstelling uit de bus komt. In praktijk zal er nooit een opstelling zijn die de beste is, aangezien er altijd een afweging zal zijn tussen de beste bepaling, en de kostprijs van de opstelling. Ook zullen sommige opstellingen beter zijn in bepaalde situaties dan andere. Wel zal het mogelijk zijn om totaal onpraktische en onnauwkeurige opstellingen uit te branden. De conclusie zal dus eerder een afweging geven tussen de verschillende opstellingen, maar zal zeker geen louter vergelijkende aard hebben.

1.5 Opzet van deze bachelorproef

De rest van deze bachelorproef is als volgt opgebouwd:

In Hoofdstuk 2 wordt een overzicht gegeven van de theoretische achtergrond die nodig is voor het begrijpen van het onderzoek en de rest van deze bachelorproef. Het bevat informatie over de werking van de RFID en BLE technologieën, definities van veelvoorkomende begrippen en diverse andere nodige uitleg.

In Hoofdstuk 3 wordt de methodologie toegelicht en worden de gebruikte onderzoekstechnieken besproken om een antwoord te kunnen formuleren op de onderzoeks vragen.

In Hoofdstuk 4 worden de verschillende bestudeerde opstellingen opgesomd, samen met de theoretische achtergrond.

In Hoofdstuk 6, tenslotte, wordt de conclusie gegeven en een antwoord geformuleerd op de onderzoeks vragen. Daarbij wordt ook een aanzet gegeven voor toekomstig onderzoek binnen dit domein.

2. Literatuurstudie

Dit hoofdstuk zal een overzicht geven van de theoretische achtergrond van de hardware, protocollen, programma's en andere concepten die gebruikt zullen worden bij het gevoerde onderzoek voor het beantwoorden van bovengenoemde onderzoeksvergadering.

2.1 Definities

Deze sectie zal enkele belangrijke begrippen introduceren die belangrijk zullen zijn bij het verdere lezen van dit hoofdstuk en de rest van het document.

RSSI

De RSSI, of voluit Received Signal Strength Indicator, is een maat voor de signaalsterkte die een ontvanger ontvangt van bijhorende zender. Ze wordt typisch gebruikt als het over radio-/elektromagnetische golven gaat.(Admin, 2022) Ze wordt uitgedrukt in Dbm (Decibel per milliwatt).(Tseard, 2016) Het is een zeer kleine en logaritmische maat, de waarden in dit document zullen in de grootteorde -10 Dbm liggen.

IoT

IoT, of voluit Internet Of Things, is een systeem van samenwerkende devices die met elkaar verbonden zijn via het internet, en zo, zonder menselijke tussenkomst, taken uitvoeren. Elk device is geïdentificeerd door een unieke identifier, of UID. Een device in deze context is alles wat met het internet kan verbonden zijn.(Gillis, 2022)

MQTT

MQTT, of voluit Message Queuing Telemetry Transport, is een protocol voor het versturen van berichten gemaakt door IoT devices over het internet. Belangrijke voordelen van het protocol zijn dat het licht en efficiënt is, en gemakkelijk schaalbaar naar grote hoeveelheden devices.(MQTT, 2022)

FSPL

FSPL, of voluit Free Space Path Loss, is het theoretische verlies in signaalsterkte over een bepaalde afstand in open ruimte. Deze kan berekend worden, gegeven de afstand tussen de 2 antennes (d), de frequentie van de EM golf (f), en de gain op de zendende en ontvangende antenne (G_z en G_o respectievelijk). Ze wordt berekend via onderstaande formule:

$$FSPL = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right) - G_z - G_o$$

(Pasternack, 2020)

Trilateratie

Trilateratie is de berekening voor de bepaling van de coördinaten van een punt uit 2 geweten punten, en de afstanden van die punten tot het te berekenen punt. Hierbij blijft ook een zogenaamd 'dubbelzinnig punt' over, welk logisch moet worden uitgebrand. De formules voor berekening zijn als volgt:

$$x = \frac{d_1^2 - d_2^2 + (x_2 - x_1)}{2(x_2 - x_1)} + x_1$$

$$y = \sqrt{d_1^2 - x^2} \pm y_1$$

Met (x, y) de coördinaten van het onbekende punt, (x₁, y₁) en (x₂, y₂) de coördinaten van de geweten punten en d₁ en d₂ de bekende afstanden. („True-range multilateration”, 2022)

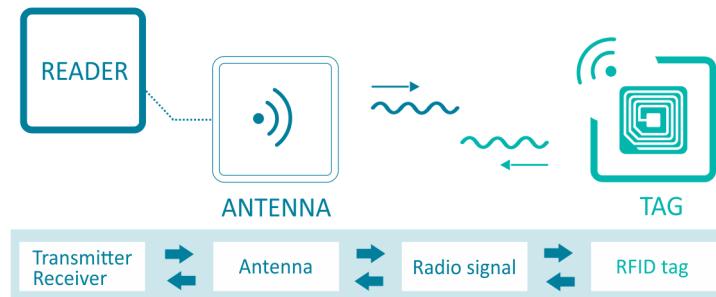
2.2 Hardware

Deze sectie zal de gebruikte hardwaretechnologieën toelichten, deze zijn RFID en BLE.

2.2.1 RFID

RFID, of voluit Radio Frequency IDentification, is een draadloos communicatie systeem welke gebruik maakt van elektromagnetische golven. Een typische RFID opstelling bestaat uit 3 delen, nl. een zender/ontvanger combinatie of transceiver, een antenne, en een transponder of RFID-tag.(Auxcis, 2022) In essentie werkt dit als volgt: de transmitter laat de antenne een elektromagnetisch veld opwekken. Alle RFID-tags die zich in dit veld

bevind zullen dit registreren en zij zullen ook een veld opwekken, welke op zijn beurt dan terug zal opgevangen worden door de antenne, waarna dit zal doorgegeven worden aan de receiver.. In essentie zal de transmitter dus een signaal uitsuren, waarop alle RFID-tags



binnen bereik zullen antwoorden, waarna dit antwoord terug zal belanden bij de receiver. De combinatie van de transceiver en de antenne wordt vaak een RFID lezer of reader genoemd, aangezien deze onderdelen steeds samen moeten werken en hardwarematig op 1 locatie zullen staan.(Amster, 2021) Deze transceiver is echter meestal niet gelimiteerd tot slechts 1 aangesloten antenne, afhankelijk van de gebruikte hardware kan deze ook 2 of 4 antennes aankoppelen. De data die de transceiver ontvangt van de RFID-tags kan vervolgens via diverse kanalen verzonden worden naar een computer of server die deze dan verder kan afhandelen.

Alhoewel alle onderdelen in de opstelling in vele verschillende geuren en kleuren beschikbaar zijn, verschilt de functionaliteit bij de antenne en transceiver niet zozeer. De antennes kunnen verschillen in oppervlakte en vorm. Dit heeft invloed op de zone waaruit RFID-tags antwoorden zullen sturen. Een vlakke antenne stuurt voor zich uit, dus verwacht antwoorden van uit die richting, terwijl een staafvormige rondom zich straalt maar niet naar zijn uiteinden. De vorm van antenne beïnvloed ook de polarisatie van het EM veld, welke ook een invloed heeft op de RSSI. De keuze keuze tussen deze verschillende mogelijkheden is dus duidelijk afhankelijk van het toepassingsgebied. Ook de zendstekte kan variëren, maar deze is instelbaar (binnen grenzen bepaald door de transmitter). Echter blijft het hier qua verschillen voornamelijk bij. De RFID-tag daarentegen heeft veel meer fundamentele verschillen en types, welke ook een uitgebreide uitleg nodig hebben wil de lezer het komende onderzoek kunnen volgen.

De RFID-tag

Een RFID-tag, in zijn eenvoudigste vorm, bestaat uit 2 delen, nl. een IC of computerchip, en een antenne. Deze vorm wordt een passieve RFID-tag genoemd. Sommige tags beschikken ook over een interne batterij, deze actieve RFID-tags worden echter niet gebruikt tijdens dit onderzoek, en worden dus verder buiten beschouwing gelaten.(atlasrfidstore, 2022b)

De IC in de antenne is het brein van de chip. Natuurlijk heeft hij, door zijn kleine gestalte, niet veel functionaliteit. De chip bevat 4 memory banks (slots voor data), van variabele lengte (verschillende producenten produceren chips met verschillende groottes per dataslot). Deze slots zijn als volgt: de EPC (Electronic Product Code), welke een code bevat die geplaatst is door de producent maar veranderbaar is door de gebruiker. De TID

(Tag Identifier), welke een uniek, read-only tagnummer bevat. De User memory, waar de gebruiker data kan opslaan, en de Reserved Memory bank, welke beveiligingsdata bevat voor het veranderen van de user memory.(Smiley, 2017) Deze laatste 2 zullen ongebruikt blijven bij dit onderzoek aangezien de data in de chip niet belangrijk is, maar vooral de locatie en de identificatie van de chip.

Het 2e deel van de tag, de antenne, beslaat fysiek de grootste oppervlakte van de tag. De taak van dit onderdeel is de EM signalen, uitgezonden door de transmitter, op te vangen. Waarna dit signaal gemoduleerd wordt in functie van de opgeslagen data in de dataslots en ze daarna teruggezonden wordt. Aangezien deze tags niet over een interne batterij beschikken, kaatsen ze de energie van de transmitter terug (in een licht andere golflengte en ritme door het moduleren). Dit wordt backscattering genoemd. Door deze relatie is de signaalsterkte van de transmitter dus even verantwoordelijk voor de RSSI, als de afstand tussen de tag en de antenne. Daarom is dit ook een zeer belangrijke variabele in dit verdere onderzoek.(atlasrfidstore, 2022a)

RSSI beïnvloedende factoren

In de voorgaande paragrafen zijn al enkele factoren opgesomd die de RSSI beïnvloeden, echter zijn dit niet de enige. Zo hebben we de zogenaamde SOAP: Size, Orientation, Angle en Placement.

- Size: De grootte van een tag, of specifieker van de antenne, is zeer belangrijk voor de RSSI die de receiver terug ontvangt. Hoe groter het antenneoppervlak, hoe meer energie van de originele golf wordt opgenomen, en hoe sterker het teruggezonden signaal zal zijn.
- Orientation en Angle: Deze 2 hangen grotendeels samen. Over het algemeen zal de opgenomen energie door de antenne, en dus de RSSI van de terugzending, het hoogst zijn als het EM veld recht op de antenne staat. Hoe meer van deze staat afgeweken wordt hoe minder de RSSI dus zal zijn. Het verdraaien van de tag zal dus een grote invloed hebben op de RSSI.
- Placement: Waar de tag (op) geplaatst wordt heeft ook een grote invloed. Allereerst is er alles wat tussen de tag en de reader wordt geplaatst heeft een negatieve invloed op de RSSI, dit kan gaan van stof (bv. een RFID toegangskaart in een broekzak) welke een verwaarloosbare invloed heeft, tot een ijzeren plaat, welke zo'n grote invloed heeft dat er quasi geen signaal meer zal zijn. Dit is dus een belangrijke beschouwing naargelang de use case. Verder is het zo dat RFID-tags die op een metalen oppervlakte of een waterhoudende container (water heeft ook een grote invloed) worden geplaatst (ook al hangen ze richting de antenne) een speciale isolerende plaklaag moeten hebben om interferentie te voorkomen.

Buiten deze voorgaande factoren zijn er nog enkele factoren die minder te beïnvloeden zijn, zoals tussenliggende kabels en andere hardware (zoals een multiplexer) tussen de antenne en de receiver. Elk onderdeel waar het signaal door moet heeft een invloed op de RSSI, ook al is deze meestal verwaarloosbaar klein.(Armstrong, 2013)

De oplettende lezer heeft al opgemerkt dat deze factoren een grote invloed kunnen hebben

op de resultaten van dit onderzoek. Uiteraard zullen alle testen moeten gebeuren in een gecontroleerde omgeving, waar de invloed van deze factoren zo veel mogelijk zal worden geminimaliseerd. De specifieke uitwerking hieromtrent is vindbaar onder Hoofdstuk 3.

2.2.2 BLE

BLE, of voluit Bluetooth Low Energy, is een opvolger van de klassieke Bluetooth (meer specifiek is het versie 4.0). Het is zoals zijn voorganger dus ook een standaard voor korte afstand datatransfer. Waarin het echter verschilt is dat het minder energie verbruikt, vandaar het low energy gedeelte van de naam. Het bereikt dit door lagere transfer snelheden, en het feit dat het data verzend in korte packets, en tussen de zendingen in slaapstand gaat. Dit in tegenstelling tot klassieke Bluetooth, welke een blijvende connectie onderhoudt en dus nooit slaapt. Dit betekent dat BLE tot wel 100x minder energie kan verbruiken dan klassieke Bluetooth. (Nesbo, 2021)

In de context van dit onderzoek zal deze vorm van datatransfer gebruikt worden in een set-up die bestaat uit 2 delen (waarvan er van elk 1 of meerdere aanwezig zijn), nl. BLE beacons en IoT gateways.

De BLE beacon

BLE beacons zijn de devices die het feitelijke BLE signaal zullen versturen. Dit zijn actieve sensors, wat inhoud dat ze beschikken over een interne batterij en dat ze, ongeacht wie of wat er luistert, berichten versturen, en dit met een bepaald tijdsinterval. Deze intervallen zijn vrij kort en worden normaal uitgedrukt in ms.(Adarsh, 2022) De berichten die verstuurd worden bevatten het UID van de beacon, alsook mogelijk diverse andere informatie. De informatie die verzonden wordt hangt echter af van het protocol welke gebruikt wordt. Momenteel zijn de 3 voornaamste protocollen op de markt de volgende:

- IBeacon: Chronologisch het eerst uitgekomen BLE hardware en transferprotocol. Uitgebracht door Apple in 2013.
- AltBeacon: Een open-source tegenhanger voor het IBeacon platform van Apple, uitgebracht in 2014.
- Eddystone: Het antwoord van Google op de BLE protocol markt, uitgebracht in 2015. Dit is het protocol welke zal gebruikt worden tijdens dit onderzoek en zal verder in detail worden uiteengezet.

Hoewel deze protocols zijn uitgebracht door verschillende (rivaliserende) bedrijven, zijn ze allen beschikbaar voor zowel Android als IOS.(Smart, 2022)

Het aanbod beacons op de markt is vrij uitgebreid, en de meeste zijn ook samen bruikbaar in een systeem mits ze zijn ingesteld met hetzelfde protocol. Tegenwoordig beginnen sommige fabrikanten echter eigen protocollen uit te werken, welke in sommige situaties eventueel beter zouden werken maar deze laten we hier buiten beschouwing aangezien dit risico's brengt naar uitbreiding van systemen toe. In dit onderzoek kiezen we voor een standaard protocol.

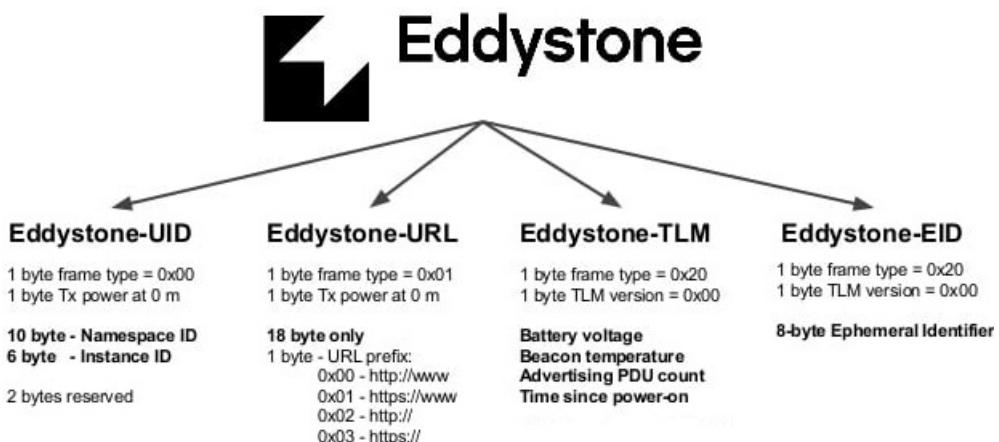
Aangezien deze beacons een batterij bevatten, is batterijduur ook een belangrijk aandachts-punt aangezien deze een rechtstreekse invloed heeft op de onderhoudskost van systemen die vertrouwen op deze beacons. Deze duur wordt voornamelijk beïnvloed door de zend-frequentie en de grootte van de gestuurde berichten, ook kan het een optie zijn een tag met een grotere batterij te gebruiken, maar deze zijn groter en duurder. Qua performance heeft dit geen invloed maar wel op de kostprijs.

Een IoT Gateway

Zoals de naam doet vermoeden is deze gateway niet specifiek voor BLE, maar is het een intelligente hub voor IoT toepassingen algemeen, het is een device dat IoT devices kan verbinden met het internet en is in een IoT systeem dus onmisbaar. Een BLE beacon is echter ook een IoT device dus dit is een perfecte toepassing voor zo'n Gateway.(MultiTech, 2022) Een Gateway kan ook filteren en enige datamanipulatie doen, dit is nodig aangezien niet enkel de BLE beacons een signaal verzenden, maar zowat elk modern draadloos device dit doet. Zonder filtering zijn door het bos de bomen niet meer zichtbaar. Parallel aan dit feit wilt dit ook zeggen dat de meeste hedendaagse devices, zoals smartphones, tablets en pc's gebruikt kunnen worden als gateway of om BLE signalen op te vangen, door middel van een programma zoals nRF Connect.(Semiconductor, 2022).

Het Eddystone protocol

Zoals eerder vermeld is Eddystone het protocol welke gebruikt zal worden voor deze testen, en wordt hier verder in detail besproken. Eddystone is een BLE protocol ontworpen door Google en wordt onderhouden sinds 2015. Het bestaat uit berichten met 3 verschillende frame types.



- **UID:** Dit frame (frametype x00) is het frame voor de broadcasting van het unieke beacon ID, of UID. Het bevat ook een veld genaamd 'Tx Power at 0m', dit is bedoeld om de RSSI waarde op 0m van de beacon mee te geven. Dit kan voor sommige toepassingen belangrijk zijn aangezien de standaard RSSI verschilt tussen verschillende beacon types, en er ook de mogelijkheid bestaat om een offset aan deze RSSI in te stellen.

- URL: Dit frame (frametype x10) is bedoeld voor de broadcasting van een URL. Bij de ontwikkeling was het de bedoeling om notificaties met advertenties te laten zien op smartphones bij het voorbij wandelen van een BLE beacon via een bestemmings-URL verzonden via dit frame. Dit is echter nooit commercieel aangeslagen en Google ondersteund deze functie niet meer sinds december 2018.(Estimote, 2018) Deze frames zijn echter niet geheel nutteloos aangezien de verzonden URL ingesteld kan worden en dus kan gebruikt worden om custom data door te sturen.
- TLM: TLM is kort voor Telemetry, dit frame (frametype x20) wordt gebruikt voor het verzenden van data over de beacon. Meer bepaald over de stand van de batterij, de temperatuur van de beacon, en het aantal verzonden berichten en verstreken tijd sinds het in gebruik nemen. Eddystone is het enige protocol dat dit doet en dit is een van de voordelen van dit protocol. Het frametype x20 wordt ook nog voor andere berichten gebruikt die niet in het oorspronkelijke protocol zaten, zoals EID (Ephemeral IDentifier), welke gebruikt wordt voor beveiliging en encryptie.

(Google, 2018)

2.3 Software

Deze sectie zal de voornaamste software die gebruikt zal worden tijdens het onderzoek toelichten.

ARTA

ARTA, of voluit Aucxis RFID Testing Application, is het custom testprogramma van Aucxis. Deze zal gebruikt worden voor het testen van de RFID opstellingen, en het visualiseren van de data.

RabbitMQ

RabbitMQ is een Open source message broker. Het is een programma welke berichten binnenkrijgt, deze in een lijst steekt, en deze doorstuurt naar een ontvanger. Hoe, naar waar en de transformaties op de berichten zijn instelbaar. In praktijk zal dit gebruikt worden bij de BLE opstellingen om de BLE berichten van die verkregen worden door de IoT gateway gebundeld door te sturen naar een bepaald adres op het web via het MQTT protocol, waar deze dan zichtbaar zijn voor onderzoek.(RabbitMQ, 2022)

MQTT Explorer

MQTT Explorer is een programma voor het accepteren en visualiseren van berichten verstuurd over MQTT, deze zal gebruikt worden om de berichten verstuurd door RabbitMQ op te vangen zodat ze zichtbaar zijn voor visualisatie.(Nordquist, 2019)

Hertz

Hertz is het custom middleware platform van Aucxis. Deze zorgt voor de verbinding tussen ofwel MQTT berichten bij BLE en de lezer bij RFID eenderzijds, en een API anderzijds. Deze zal gebruikt worden als de verkregen data geanalyseerd moet worden via een script of dergelijke en op een computer moet geraken.(*HERTZ EDGE RUNTIME USER GUIDE*, 2020)

3. Methodologie

Het hoofddoel, namelijk het bepalen van een optimale hardwareopstelling, zal in eerste instantie opgedeeld worden in enkele deelonderzoeken, 1 deelonderzoek per hardwareopstelling. Elk deelonderzoek zal verder onderverdeeld worden in een deelhypothese (Hoe de opstelling in theorie zou moeten presteren, opgebouwd uit veronderstellingen en theoretische waarheden aangehaald in Hoofdstuk 2), enkele experimenten, en een deelconclusie. Deze deelconclusie zal een vergelijking zijn tussen de hypothese en de eigenlijke uitkomst, een opsomming van de voor- en nadelen, een categorisatiescore (Hoeveel procent van de gemeten beacons kan juist geplaatst worden aan de hand van de data en het lokalisatieprincipe) en een uiteenzetting over de factoren die al dan niet aanwezig moeten zijn om het principe acceptabel te maken. Ten slotte zullen de deelconclusies vergeleken worden en zal er een algemene conclusie bepaald worden. De onderzochte opstellingen, 12 in totaal, zijn hoogstwaarschijnlijk niet alle mogelijke manieren waarop de onderzoeksopzet, namelijk het registreren van verplaatsingen, kan gebeuren. De bepaling van deze set zijn het resultaat van een overleg met Aucxis welke opstellingen het meest kans hebben om te werken, en het interessantst zijn voor hen om onderzocht te zien. Voor de oplijsting van deze opstellingen, samen met een korte theoretische achtergrond verwijst ik de lezer naar Hoofdstuk 4.

Voordat er experimenten kunnen gebeuren is het belangrijk een oplijsting te maken van enkele constanten doorheen het onderzoek. Voornamelijk op het vlak van de gebruikte hardware en de standaardinstellingen waarmee dit onderzoek zal gebeuren. Deze constanten zijn geldig gedurende het volledige onderzoek, tenzij anders aangegeven.

3.1 RFID

Voor de RFID opstellingen wordt gebruik gemaakt van KEONN Advantenna-p11 antennes, dit zijn vlakke, wide beam antennes. Ze stralen dus voor zich uit met een relatief wijd veld van 90° volgens zowel de x- als y-as (*Advantenna-p11™RFID UHF wide beam antenna*, g.d.). Deze zijn dus ideaal om te bepalen of er een tag voor de antenne passeert. Als tranceiver wordt een 4-port IMPINJ Speedway Revolution gebruikt, deze maakt het mogelijk om 4 antennes tegelijk aan te sluiten. De gebruikte tags zijn standaard RFID tags van 9 x 1.5cm, met 1 antenne in 1 richting. Verder zenden de antennes een EM veld uit met Tx = 20dB. De resultaten van de test worden opgevangen en gevisualiseerd met ARTA.

3.2 BLE

In de BLE opstellingen wordt gebruik gemaakt van MIKROTIK Knot IoT Gateways, welke hun data over de waargenomen BLE beacons elke 30s (Statische opstellingen) of 2s (Dynamische opstellingen) zullen doorsturen via een MQTT queue naar een custom tussenprogramma. Deze data bevat per beacon het gemiddelde van de ontvangen RSSI waarden uit deze periode, alsook het aantal ontvangen berichten en de maximaal ontvangen RSSI waarde. Deze ontvangen data zal door het tussenprogramma worden geëxporteerd naar een .xlsx bestand, waarna het kan geanalyseerd en gevisualiseerd worden. Als beacon worden er verschillende modellen MOKOSMART beacons gebruikt, welke zullen benoemd worden per experiment. Deze staan ingesteld op een Tx Power van -12dB.

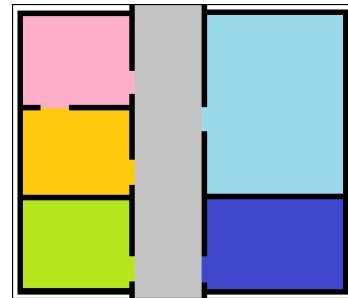
4. Opstellingen

In dit hoofdstuk zullen de 12 verschillende opstellingen die in het volgende hoofdstuk onderzocht worden opgeliist worden, samen met een ruwe schets van hoe deze opstelling eruit zal zien en een korte uitleg over hoe deze opstelling theoretisch zou moeten werken en de voor- en nadelen ervan. De verschillende opstellingen zullen onderverdeeld worden per categorie, allereerst op technologie, maar verder ook volgens het statische of het dynamische principe. Deze laatste onderverdeling houdt als volgt in:

- Statisch: In een statische opstelling wordt elk voorwerp gekenmerkt door 1 RFID Tag of BLE beacon, en de locatie waarop deze zich bevindt wordt gekenmerkt door een bepaald aantal readers (RFID-antennes of IoT Gateways), die de signalen van deze voorwerpen opvangen. Aan de hand van deze data wordt de locatie idealiter bekend.
- Dynamisch: Bij een dynamische opstelling worden zowel de voorwerpen als de locaties gedefinieerd door RFID tags of BLE beacons. Hierbij is het concept dat er met de readers (RFID-antennes of IoT Gateways) wordt rondgegaan in het gebouw. De info die hieruit vloeit zal verder geaggregeerd worden en daaruit zullen de locaties van de voorwerpen bepaald worden. Dit systeem is minder real-time dan een statische opstelling, maar het is kostendrukkend aangezien een reader veel meer kost dan een tag of beacon, dus als hun aantal geminimaliseerd kan worden is dit voordelig. In theorie kunnen deze readers overal rondgaan, welke voor een RFID opstelling ook zo zal zijn. Echter is er, in samenspraak met Aucxis en het in beschouwing nemen van hun noden, beslist dat de IoT Gateways voor de BLE scenario's enkel in de gang tussen de locaties zullen rondgaan.

De Illustratie

Elk van volgende opstellingen zal gebruik maken van een bijhorende figuur, gebaseerd op degene bijgevoegd hier. Dit is een schematische weergave van een systeem dat opgebouwd is volgens de te onderzoeken opstelling, ze heeft als doel hulp te bieden bij het begrijpen van hoe de opstelling en de definiëring van locaties eruit ziet, maar is niet noodzakelijk de testopstelling tijdens het onderzoek. Ook is hier elke logische locatie een kamer, maar dit is in praktijk niet noodzakelijk het geval (Een magazijn kan bv. opgedeeld zijn in meerdere zones zonder muren). Op volgende voorbeeldfiguur is de opbouw van de voorbeeldschets te zien, ze bestaat uit 5 locaties (weergegeven in kleur), en een gang (weergegeven in grijs). De gang is geen locatie, en is de plek waar doorgelopen zal worden met de readers bij een dynamische BLE opstelling.

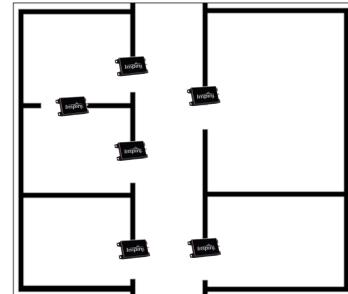


4.1 De RFID opstellingen

4.1.1 Statisch

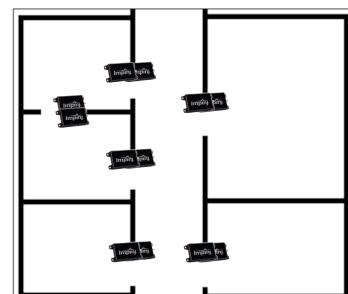
1 antenne aan deurlijst

Deze opstelling is de eenvoudigste en is 1 van de opstellingen die momenteel wordt gebruikt door Aucxis, ze is voornamelijk opgenomen in dit onderzoek als referentie. Het concept bij deze opstelling is dat aan elke deurlijst 1 RFID antenne hangt. Als er een tag voorbij de antenne gaat registreert deze dit is er dus een beweging geregistreerd. Of deze in of uit de locatie is kan niet uit deze data alleen afgeleid worden, dit kan enkel in combinatie met de informatie wat zijn locatie was voor de verplaatsing.



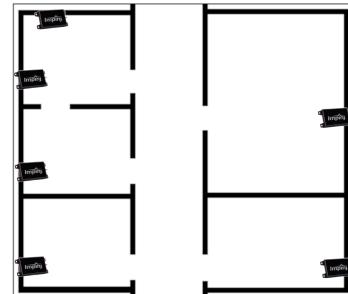
2 antennes aan deurlijst

Ook dit is 1 van de opstellingen die momenteel wordt gebruikt door Aucxis en is dus ook voornamelijk een referentiepunt. Het principe is hetzelfde als bij de vorige opstelling, echter is het voordeel hier dat de richting van de verplaatsing wel bekend is, dit aan de hand van het tijdsverschil tussen de detecties van de tag. In dit opzicht is het dus beter dan de vorige opstelling, maar is uiteraard duurder door de hogere aantallen benodigde antennes en de extra benodigde poorten in de tranceivers.



1 antenne tegenover deur

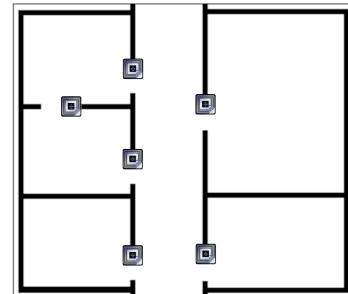
Bij deze opstelling wordt een RFID antenne tegenover de deur geplaatst, het idee hierachter is het feit dat, aangezien de RSSI afhankelijk is van de afstand tussen de antenne en de tag, het in theorie zichtbaar is aan de verandering in RSSI in welke richting de tag gaat. Ook geeft de antenne een doppler waarde mee, welke in theorie ook veranderd naargelang de richting. Als dit in praktijk blijkt te werken wilt dit zeggen dat er richtingsdetectie mogelijk is met 1 antenne, waardoor het sowieso al beter is dan de vorige 2 opstellingen. De verwachting is wel dat de kamer niet te breed mag zijn, zodat de antenne van de gemonteerde antenne tot de deur niet te groot is.



4.1.2 Dynamisch

1 tag aan deurlijst

Hier hangt er een RFID-tag aan de deurlijst (analoog aan de antenne bij de eerste statische opstelling). Als de antenne passeert aan de deur weet het aggregatieprogramma in theorie dat alle tags tussen nu en het passeren van deze of een andere locatie RFID-tag tot deze locatie behoren. Hier is ook een opsplitsing in de RFID-tags nodig, nl. of het een locatie of een asset tag is.



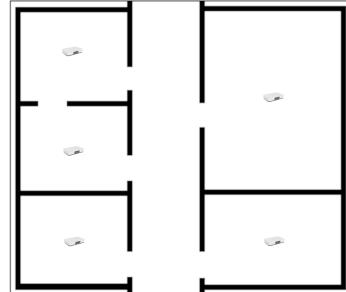
In theorie is het ook mogelijk de 2 andere statische scenario's een dynamische variant te geven, echter valt hun voordeel van richtingbepalend zijn weg hierbij aangezien de detectie richting niet meer zo nuttig is bij een dynamische opstelling, aangezien er door de aard van dit type opstelling sowieso meer dan 1 scanevent zal gebruikt worden voor de locatiebepaling. Deze worden dus buiten beschouwing gelaten.

4.2 De BLE opstellingen

4.2.1 Statisch

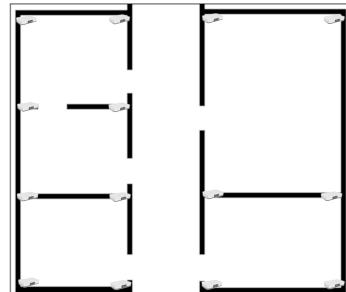
1 gateway per locatie

Deze opstelling is de eenvoudigste en meest intuïtieve van de BLE opstellingen. Elke locatie komt overeen met 1 IoT Gateway, die gepositioneerd wordt ongeveer in het middelpunt van de locatie. Het idee hierachter is dat de Gateway waar de beacon zich het dichtste bij bevindt, en dus de beste RSSI heeft, de locatie is waar het voorwerp zich bevindt. Echter is de verwachting dat dit niet volledig zal kloppen, en dat er hier zeker onnauwkeurigheden zullen ontstaan, specifiek als de locaties niet evenredig verdeeld zijn over het gebouw.



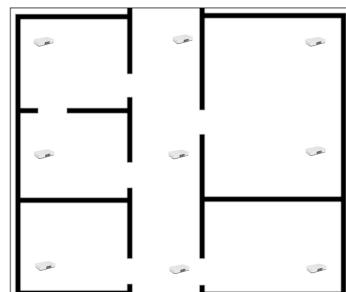
Meerdere gateways per locatie

In deze opstelling wordt een locatie gedefinieerd door meer dan 1 gateway, nl. een gateway per hoek van de locatie, zodat de locatie wordt omringd door een kader van gateways. Het idee hierbij is dat er aan de data kan afgeleid worden of de beacon zich al dan niet in het vak tussen de gateways bevindt. Echter zal de kost voor de opstelling vrij snel de hoogte in vliegen als er veel locaties zijn. Wel kunnen gedeelde hoeken van locaties door een gedeelde beacon worden bezet, wat ook zo zal zijn in de testopstellingen.



Gateways in rasteropstelling

Deze opstelling bestaat uit een raster welke volledig het gebouw omvat. Als de locaties van deze gateways bekend zijn kan via trilateratie en de gemeten RSSI waardes berekend worden waar de voorwerpen zich bevinden, wat dan gelinkt kan worden aan een locatie. De verwachting is dat hieraan de locatie vrij specifiek kan worden bepaald, maar nadelig is wel dat de locaties volledig gespecificeerd en bijgehouden moeten worden, daardoor kan er niet enkel op data van de gateways worden afgegaan om de locatie te bepalen aangezien in de opstelling de gateways en de locaties nijs met elkaar te maken hebben. Deze opstelling lijkt wel meer en eenvoudiger opschaalbaar naar grotere gebouwen of gebouwen met veel dicht bij elkaar liggende locaties.

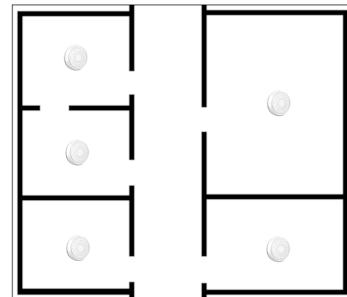


4.2.2 Dynamisch

Bij elk van volgende opstellingen zal een onderscheid gemaakt worden in de BLE beacons, nl. de locatie- en de asset-beacons.

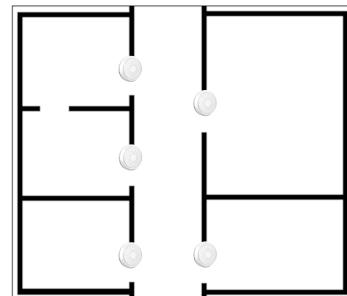
1 beacon per locatie, midden van locatie

In deze opstelling bevinden de locatiebeacons zich in het midden van de locatie die ze vertegenwoordigen, met als achterliggend idee dat de assetbeacons die vanop verschillende meettijdstippen in de gang en gelijkaardige RSSI waarde hebben aan de locatiebeacon, deze hierbij in de buurt zullen liggen en zich dus in zijn locatie zullen bevinden.



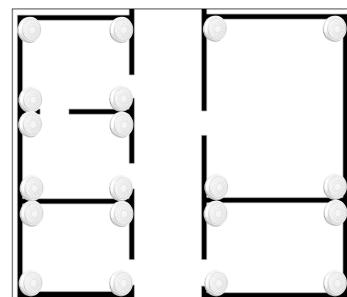
1 beacon per locatie, aan deur

Deze opstelling is qua concept gelijkaardig aan de vorige, het verschil is dat bij deze opstelling de locatiebeacons zich bevinden aan de deur van de locatie/tussen de locatie en de gang. De hypothese is dat hierdoor de mobiele gateway in de gang deze beacon beter kan detecteren, en zijn locatie in de gang beter kan bepalen waardoor kan verondersteld worden dat de assetbeacons die goed worden ontvangen als hij in de buurt is van een locatiebeacon ook op die locatie liggen. Ook is er hier geen beacon aanwezig op de overgang tussen 2 locaties die niet via de gang verloopt, aangezien de mobiele gateway hier niet komt.



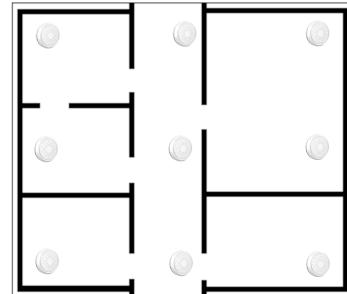
Meerdere locatiebeacons per locatie

Dit is de dynamische tegenhanger van het 2e statische scenario, echter wordt in dit geval de locatie omringen door locatiebeacons. Hier is het principe dat, als een assetbeacon vanuit verschillende locaties in dezelfde range van RSSI valt als de locatiebeacons van een bepaalde locatie, hij zich waarschijnlijk ook op die locatie zal bevinden.



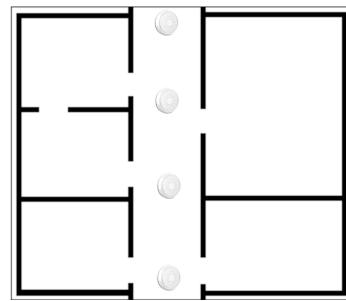
Beacons in rasteropstelling

Dit is de dynamische tegenhanger van het 3e statische scenario, nl. een raster van locatiebeacons. In theorie kunnen hierbij de locaties van de assetbeacons bepaald worden door dubbele trilateratie, nl. de locatie van de mobiele gateway kan bepaald worden op 3 meetpunten a.d.h.v. de geweten locatie van de locatiebeacons, en uit deze 3 locaties kan dan nog eens via trilateratie de locatie van de assetbeacons worden bepaald. Het vermoeden bestaat echter dat dit onnauwkeurig kan zijn, verder wordt er ook verondersteld dat het asset niet beweegt tussen deze gebruikte meetpunten maar dit is bij uitbreiding voor elke dynamische opstelling zo.



beacons op intervallen in de gang

Bij deze opstelling worden er geen beacons in de locaties geplaatst, maar in de gang. Deze locatiebeacons bevinden zich op constante intervallen van elkaar. In theorie weet de mobiele gateway hieraan waar hij zich bevindt in de gang, als er geweten is op welke 'afstand' in de gang welke locatie zich bevindt kan er bepaald worden welke assetbeacons zich op welke locatie bevinden.



5. Testen

In dit hoofdstuk zullen de uitgevoerde experimenten en testen uiteengezet en besproken worden, volgens de richtlijnen aangehaald in Hoofdstuk 3. Ze zullen gesorteerd staan volgens opstelling en gerangschikt in dezelfde volgorde als in Hoofdstuk 4.

5.1 RFID

Voor elk van volgende testen bestaat data over zowel de RSSI als het relatieve faseverschil. Het verloop van het relatieve faseverschil is gelijkaardig aan de RSSI, aangezien beide afhankelijk zijn van de afstand tussen de antenne en de tag. Alhoewel de grafieken van het relatieve faseverschil veelal een mooier verloop hebben, is er gekozen de conclusies van volgende testen te nemen op basis van de RSSI grafieken, dit aangezien de relatieve fase een berekende waarde is, berekend uit het absolute faseverschil. Deze berekening is echter niet in alle gevallen volledig correct, waardoor er onvoorziene fenomenen zouden kunnen optreden in algoritmes gebaseerd op deze data. Echter is het in theorie mogelijk dezelfde conclusies te bekomen gebaseerd op (correcte) absolute fasedata. Verder is er bij alle statische testen data over de in en de uit richting van de locatie, hiervan zal slechts 1 worden getoond aangezien beide richtingen dezelfde info verschaffen, dit uiteraard tenzij beide tonen een meerwaarde geeft. Alle volgende grafieken zijn gegenereerd door ARTA, waarin het helaas niet mogelijk is om een asbenaming te doen. In alle RSSI grafieken vertegenwoordigt de x-as te tijd (in seconden) en de y-as de RSSI waarde (in dBm).

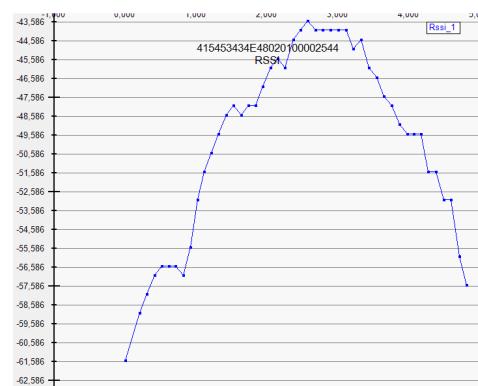
5.1.1 1 antenne aan deurlijst

Deelhypothese

Deze opstelling kan het voorbijkomen van een getagd asset waarnemen.

Test: PoC

Deze eerste en enige test voor deze opstelling is een Proof of concept test. Hier zal worden nagegaan of en hoe een voorbijkomende tag zal geregistreerd worden. Voor de opstelling is 1 antenne gebruikt die vlak aan een deurkader is gehangen, en de tag zal op een afstand van 30 cm voorbij komen door het deurgat, dit in een horizontale positie in een evenwijdig vlak aan de antenne.



In bijhorende grafiek is zichtbaar dat een voorbijkomende tag wordt geregistreerd door de reader met een piek in de RSSI waarde.

Deelconclusie

Uit deze test is duidelijk dat een voorbijkomende tag, bij uitbreiding een getagd asset die de locatie binnentreedt, correct geregistreerd zal worden door het systeem. De hypothese is dus bevestigd. Buiten deze simpele registratietest is er ook nood aan het testen van de invloed van tag oriëntatie en afstand tegenover de antenne. Deze fenomenen worden echter ook onderzocht in de volgende opstelling en zijn hier dus niet apart onderzocht. De beschouwingen en conclusies van test 1 en 2 in de opstelling met 2 antennes zijn dus ook toepasselijk op deze opstelling, uiteraard vereenvoudigd naar 1 antenne.

5.1.2 2 antennes aan deurlijst

Deelhypothese

Deze opstelling kan het voorbijkomen en de richting van een getagd asset waarnemen, genomen dat de afstand tussen de tag en de antenne voldoende klein is.

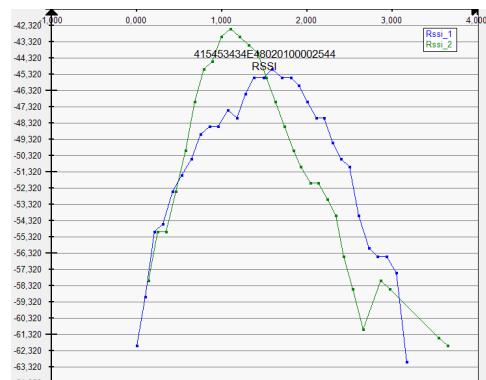
Test 1: Oriëntatie van de tag

In deze eerste test wordt de invloed van de oriëntatie van de tag tegenover de antennes bepaald, aangezien deze oriëntatie in theorie een invloed heeft op de gemeten RSSI waarde.

De opstelling voor deze test is als volgt: 2 antennes zijn in een deuropening geplaatst, naast elkaar. Bij het binnengaan wordt eerst antenne 1, en daarna antenne 2 gepasseerd. Er worden 4 oriëntaties onderzocht, nl. horizontaal (a) en verticaal (b) in een evenwijdig vlak aan de antennes, en horizontaal (c) en verticaal (d) loodrecht op het vlak van de antennes. Voor elk van deze deeltesten geldt dat de afstand tussen de tag en de antenne 30cm is. Bij elk scenario is zowel de richting in als uit getest, echter zullen deze resultaten enkel beide worden getoond als er een meerwaarde is. In theorie zouden a en b ruwweg dezelfde resultaten moeten geven, terwijl c en d een lagere RSSI zouden moeten geven. Echter zou het in elk geval detecteerbaar moeten zijn.

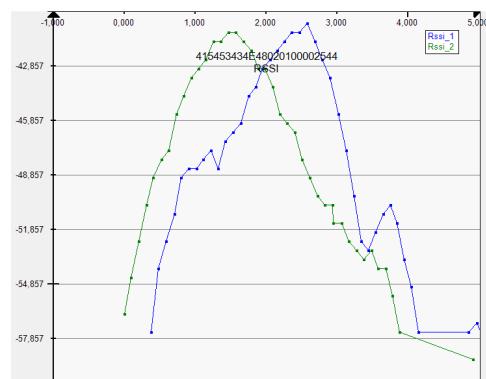
a) Horizontaal in antennevlak

Uit bijhorende grafiek, die de tag toont die uit de locatie ging, is duidelijk een opeenvolging van pieken te zien. Dit met volgorde 2 (groen) -> 1 (blauw), wat inderdaad uit de locatie gaan is. Deze detectie is dus geslaagd. De piekhoogte is niet gelijk, ondanks dat de antennes hetzelfde type zijn. Dit is kalibreerbaar maar zoals zichtbaar is dit niet nodig voor een toepassing als deze.



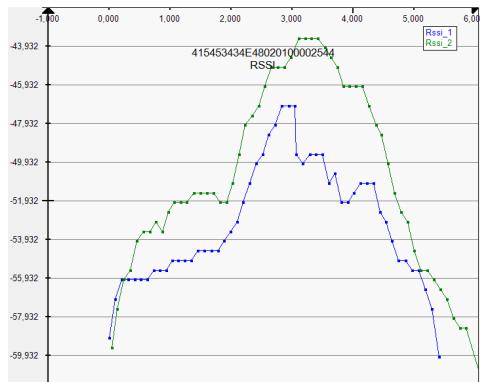
b) Verticaal in antennevlak

In deze grafiek is vrij gelijkaardig aan de vorige, wat theoretisch ook zou moeten. Er zijn duidelijk 2 pieken zichtbaar, in de juiste volgorde volgend de tag die uit de locatie gaat. Ook is de RSSI gelijkaardig (rond de -40 à -45 dBm).



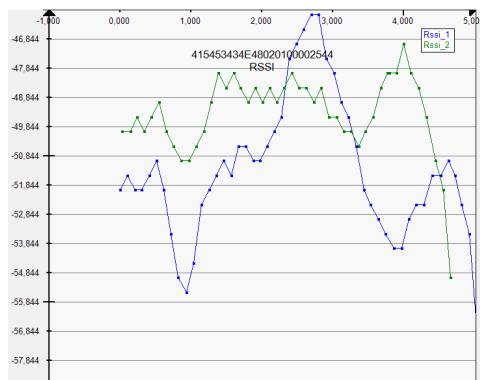
c) Horizontaal loodrecht op antennevlak

In deze grafiek is een beweging van de tag naar in de locatie weergegeven, hoewel de toppen duidelijk zichtbaar zijn, en in de correcte richting staan, is de top minder duidelijk afgelijnd en meer uitgerokken. Ditzelfde fenomeen is ook zichtbaar in de uit-richting. Ook liggen de toppen iets lager dan de toppen in de vorige 2 deeltests.



d) Verticaal loodrecht op antennevlak

In deze grafiek is ook een beweging van de tag naar in de locatie weergegeven, en is het fenomeen van meer uitgerokken toppen nog beter zichtbaar. De uit richting vertoont wederom hetzelfde patroon. Deze deeltest ligt dus in lijn met de vorige, maar nog opvallender.



Testconclusie

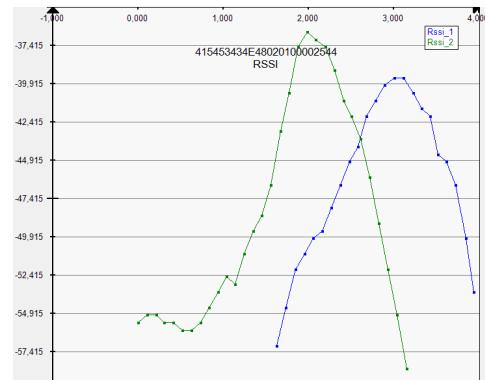
Zoals verwacht is de detectie van de tag en de richting ervan goed zichtbaar en in elk geval correct gemeten. Ook is de meetkwaliteit minder als de tags niet in het vlak van de antenne liggen, daarom lijkt het aanbevolen dit zo veel mogelijk te vermijden.

Test 2: Afstand tussen tag en antennes

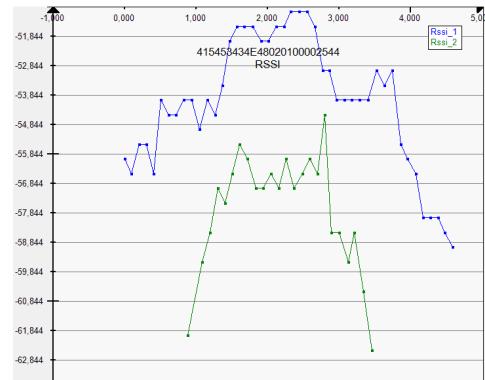
In deze test wordt de invloed van de afstand tussen de tag en de antennes gemeten, in theorie zou de RSSI van de piek lager moeten zijn als de tag verder van de antenne voorbij komt, en door de conische vorm van het meetveld van de vlakke antenne zouden de pieken meer moeten overlappen. De testopstelling is idem aan Test 1, de oriëntatie van de tag is constant gehouden op horizontaal in hetzelfde vlak als de antennes, en de richting is uit de locatie. De gemeten afstanden zijn 5cm afstand (zeer dicht) en 100cm afstand (zeer ver). Dit kan vergeleken worden met de resultaten van Test 1a, aangezien dit dezelfde opstelling betreft, op 30 cm afstand.

a) 5cm

Op deze grafiek is het verwachte resultaat te zien, 2 duidelijke pieken die licht verder uit elkaar liggen, en een hogere RSSI waarde hebben.

**b) 100cm**

Deze grafiek is interessanter dan de vorige, het vermoeden dat de piek minder duidelijk ging zijn en ging overlappen is bevestigd. Uit deze meting kan niet meer afgeleid worden in welke richting de tag voorbij de antennes komt. Ook ligt de RSSI waarde beduidend lager.

**Testconclusie**

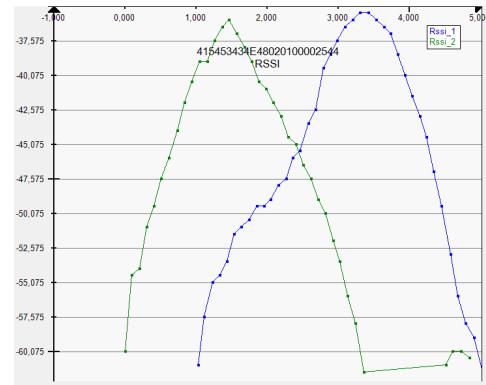
Zoals werd vermoed is er een bepaalde restrictie op de afstand waarmee de tag de antennes kan voorbijkomen om een goede richtingsdetectie te hebben.

Test 3: Afstand tussen de 2 antennes

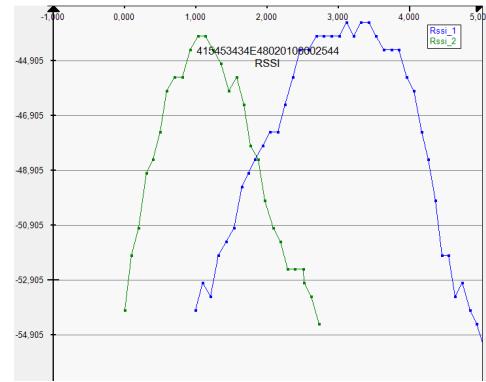
Aangezien de reden van de overlappende pieken in vorige test het feit is dat het conische bereik van de 2 antennes elkaar te veel overlapt, is het logisch dat dit effect zal verminderen als deze 2 antennes verder van elkaar geplaatst worden, dit zal getest worden in deze 3e test. De opstelling is identiek aan de test 2, het enige verschil is dat de 2 antennes 20cm uit elkaar gezet zijn.

a) 5cm

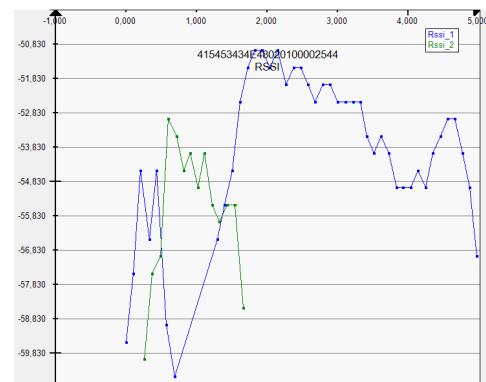
Dit testresultaat toont wederom 2 mooie pieken, deze keer iets verder uit elkaar liggend door de afstand tussen de antennes, en dit met een lage RSSI waarde.

**b) 30cm**

Hier zien we ongeveer hetzelfde als op de vorige grafiek, enkel licht meer uitgerokken en met een lagere RSSI waarde.

**b) 100cm**

Dit resultaat is het voornaamste van deze test, we zien, zoals bij test 2, dat de pieken weer hard zijn uitgerokken, maar door de extra afstand tussen de antennes is de volgorde wel weer zichtbaar.

**Testconclusie**

Het blijkt inderdaad correct dat het verder uit elkaar plaatsen van de antennes een positief effect heeft op het uit elkaar trekken van de pieken in de RSSI curve, wat nodig is naarmate de tag verder van de antenne voorbij komt.

Deelconclusie

Deze opstelling slaagt er inderdaad in om een voorbijkomende tag en zijn richting te registreren, mits de afstand beperkt is, de hypothese is dus correct. Er kan echter wel aan toegevoegd worden dat, als de afstand niet meer voldoende klein is, dat de afstand tussen de antennes kan vergroot worden. Dit is in een reële situatie echter niet praktisch aangezien een deur meestal een beperkte breedte heeft. Voor een standaard deur zal dit geen probleem zijn aangezien de maximale afstand in een deur ook beperkt is, maar voor bv. een poortdoorgang kan dit wel problemen opleveren. In een gang met een quasi onbeperkte beschikbare breedte is dit wel mogelijk.

5.1.3 1 antenne tegenover deur

Deelhypothese

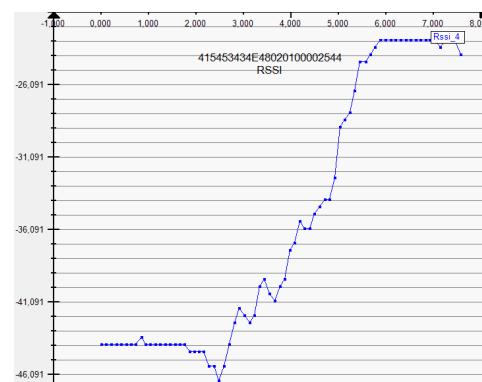
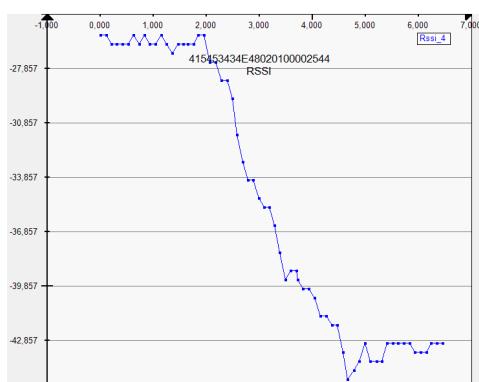
Deze opstelling kan het voorbijkomen en de richting van een getagged asset waarnemen, genomen dat de afstand tussen de antenne en de deur voldoende klein is zodat de antenne de tag kan registreren.

Test 1: PoC

Deze eerste test bestaat uit een proof of concept, hierin wordt getest of het op zijn minst mogelijk is om de richting van de bewegende tag te bepalen uit de gemeten data. In deze test wordt een antenne geplaatst tegen een muur, met daarvoor een kar met een tag op (horizontaal in het vlak van de antenne). Deze kar zal voor deze test achteruit en vooruit gerold worden.

Resultaat

Onderstaande grafieken tonen de verandering in RSSI van beide testen, met het rollen van de kar weg van de antenne links, en naar de antenne toe rechts. In deze grafieken is deze richting zeer mooi zichtbaar, de RSSI verlaagt als de kar wegrolt, en verhoogt als deze naar de antenne toe rolt.



Testconclusie

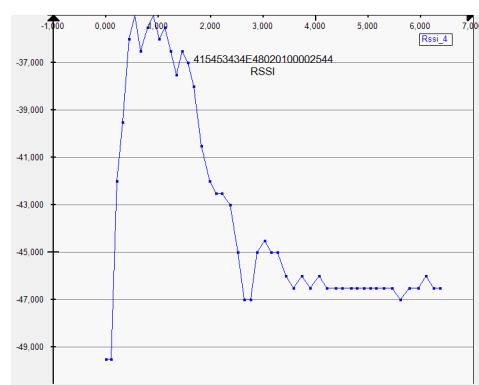
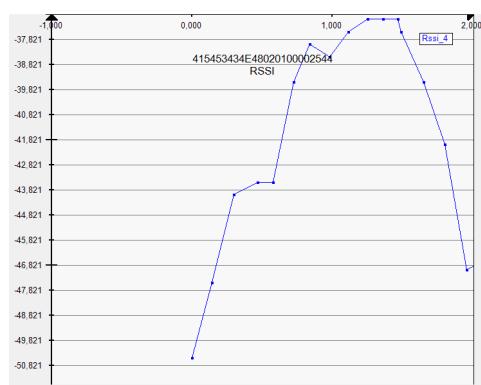
Uit deze resultaten is zeer mooi te zien dat de richting van de verplaatsing op de lijn voor een antenne duidelijk zichtbaar is.

Test 2: Variabele afstand tot deur

In deze test wordt de opstelling realistischer gemaakt, de antenne wordt op respectievelijk 100 en 200 cm afstand van de deur geplaatst, en er wordt met de kar met bevestigde RFID tag van test 1 door de deur gereden, zowel in als uit de kamer, direct de hoek om.

a) 100cm

Hieronder is het binnengaan (links) en het verlaten (rechts) van de locatie te zien, zoals duidelijk te zien is in de grafiek zeer veel minder duidelijk dan in de ideale situatie van test 1. Vermoedelijk is de 'staart' die niet in de meting past (rechts aanhangsel bij inwaarts en links bij uitwaarts) het gevolg van het feit dat de kar op dat moment 90° gedraaid in de kamer aanwezig is, resp. na en voor de draaibeweging door de deur. Op dit moment bevindt de tag zich in het leesveld van de antenne, maar niet meer in hetzelfde vlak. Deze onderlinge oriëntatie zorgt voor een slechte RSSI waarde, zoals aangegeven tijdens test 1 van de vorige opstelling. Voor de duidelijkheid van de 'uit' meting is dit niet zo zeer een probleem, maar wel voor de 'in' meting.



b) 200cm

Hieronder is wederom het binnengaan (links) en het verlaten (rechts) van de locatie te zien. In dit geval is de onduidelijkheid zichtbaar in vorige deeltest nog extremer zichtbaar. Alhoewel het in theorie de richting nog steeds eenduidig zichtbaar is, is het nog minder duidelijk, en deze onduidelijkheid vergroot naarmate de tussenliggende afstand groter wordt. Ook de RSSI waarde ligt logischerwijs lager.



Testconclusie

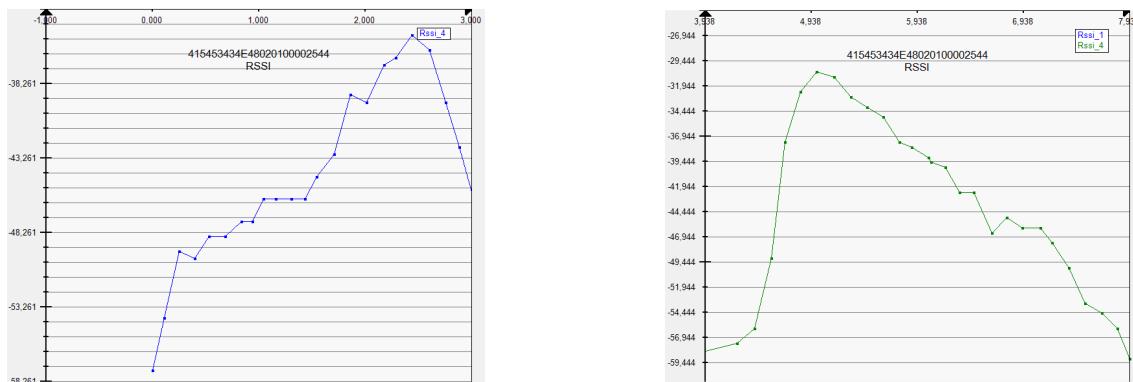
Deze testen tonen aan dat de meting in een realistisch scenario veel minder optimaal is als in het optimaal scenario van test 1 aangezien de meetpunten rond het dichter/verder komen voor onduidelijkheden zorgen die niet eenduidig uit de data te halen zijn.

Test 3: Langere meetafstand

Aangezien een simpele draai rond het deurgat te slechte data oplevert om eenduidig de richting te bepalen, kan het een idee zijn om de kar langer op de lijn van de antenne te laten rijden om zo het relatieve aantal van meetpunten voor de richtingsdetectie op te krikken tegenover de meetpunten bij het in- en uit stappen van het meetbereik van de antenne. Dit wordt in volgende test bekeken, hierbij is de opstelling idem aan test 2b, maar zal de kar tot tegen de antenne rijden alvorens af te slaan.

Resultaat

Onderstaande grafieken tonen wederom de verandering in RSSI van beide richtingen, met het rollen van de kar naar de antenne links, en weg van de antenne rechts. Alhoewel de 'staarten' uit test 2 nog steeds zichtbaar zijn, overheersen ze de grafiek niet meer en dus is deze grafiek veel eenduidiger en kan uit de richting van de scheefheid de richting van verplaatsing worden afgeleid.



Testconclusie

Het vermoeden dat de resultaten beter zijn als er verder op de lijn voor de antenne wordt gewandeld lijkt te zijn bevestigd met deze test.

Deelconclusie

In ideale omstandigheden blijkt dit concept zeer goed te werken, echter zijn er enkele neveneffecten van een realistische draai door een deur die moeten gecompenseerd worden met een langere lengte op de lijn voor de antenne te lopen. De vooropgestelde hypothese is dus niet correct en moet aangevuld worden met deze nieuwe informatie. In praktijk wilt dit zeggen dat dit niet werkt voor een normale deuropening en vorige opstelling dus gebruikt zal moeten worden. Echter kan het wel een oplossing zijn voor een (korte) gang of dergelijke waar de assets sowieso door moeten om een berging of magazijn te bereiken, want vanaf er enige afstand wordt gedaan werkt dit wel zeer goed.

5.1.4 1 tag aan deurlijst

Deelhypothese

Deze opstelling is in staat om verspreide, getagde assets te detecteren en eenduidig een locatie toe te wijzen.

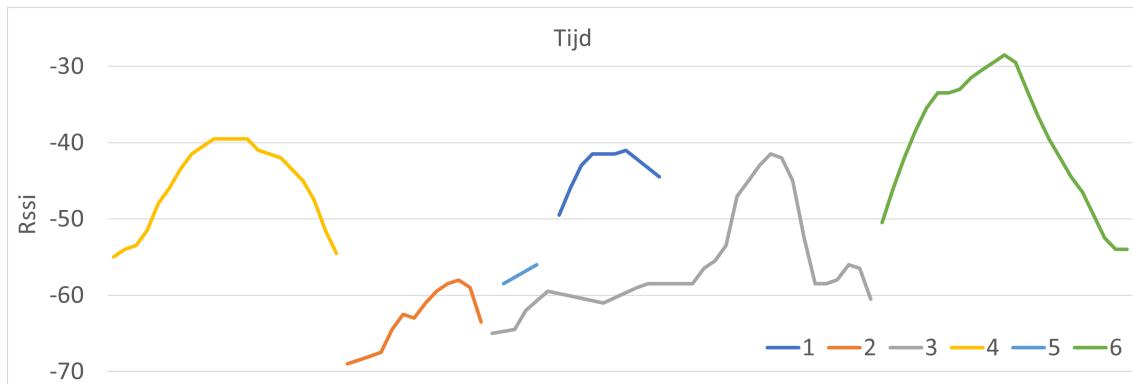
Test 1: Ideale situatie

De opstelling voor deze test is als volgt: Een rijdende kar is voorzien van een RFID-reader, of meer bepaald een vlakke antenne, welke opzij (rechts) is gericht. Verder is er een een locatie, bestaande uit 1 ommuurde ruimte, deze is voorzien van 1 locatie tag (Tagcode 4) aan het deurframe, langs de rechterkant (zodat de antenne op de kar de tag kan lezen bij het binnengaan). Vervolgens bevinden zich verspreid over deze ruimte 4 assets (Tagcode 1, 2, 3 en 5), getagd met een asset tag. Als laatste is er aan de deurlijst aan de linker kant ook een locatie tag (Tagcode 6) aangebracht, voor een andere locatie dan deze. In en opstelling in productie zou deze aan de deur van een nieuwe locatie hangen, maar in deze opstelling is zijn functie louter om aan te geven wanneer de locatie wordt verlaten. Alle tags (zowel locatie als asset) bevinden zich op dezelfde hoogte als de antenne op de kar. De test is geslaagd als alle asset tags gemeten worden tussen het meten van eerst de locatie tag van de locatie zelf eenderzijds en, en de tag van de andere locatie anderzijds.

Resultaat

De resultaten van deze test zijn ondergebracht in volgende grafiek. Met leesbaarheid in gedachten zijn de tijdsspannes tussen de registraties van de tags weggelaten uit de grafiek, in praktijk liggen deze verder uit elkaar in de tijd maar de volgorde is hier voornamelijk van belang. We kunnen zeer duidelijk zien dat deze test geslaagd is, we registreren eerst tag 4, welke duidelijk maakt dat we ons vanaf hier binnen de locatie bevinden. Elke asset

tag die tussen dit moment, en het moment dat een andere locatie tag wordt gedetecteerd, ligt in deze locatie. De 2e locatie tag is de laatste die we detecteren dus er is correct bepaald dat alle assets zich in deze locatie bevinden. Wel zien we een groot verschil in aantal meetpunten, tag 5 wordt zo maar 2x gedetecteerd, in vergelijking tot de meer dan 50 meetpunten voor tag 3. Dit is echter niet geheel verrassend, aangezien het asset met tag 5 veel dieper in de kamer lag dan asset 3.



Testconclusie

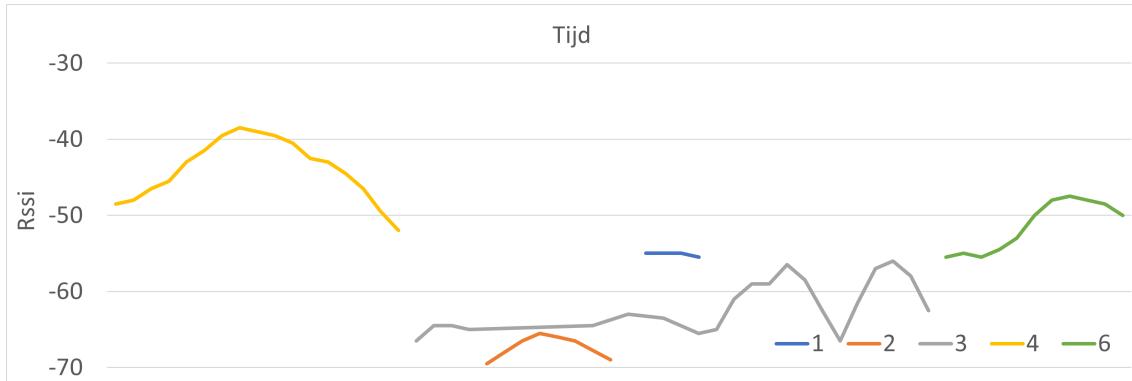
Het doel van de test, namelijk het detecteren van alle assets en ze correct plaatsen in de locatie is geslaagd. Het feit dat er een groot verschil bestaat in het aantal meet- of detectiepunten wekt wel het vermoeden dat het voornaamste probleem met dit scenario zal liggen in het detecteren van alle aanwezige assets, en niet zo zeer in het bekomen van een correcte lokalisatie.

Test 2: Realistische situatie

In tegenstelling tot vorige situatie is het natuurlijk geen gegeven dat alle asset tags zich ook op ruwweg dezelfde hoogte als de antenne zullen bevinden aangezien assets zelf zich in theorie overal in de kamer kunnen bevinden, inclusief op tafels of kasten. Deze test zal dus dezelfde opstelling nemen als de vorige test, maar de assets zullen zich ook op verschillende hoogtes bevinden.

Resultaat

Dit resultaat toont de vrees van vorige test aan, de detectie is helaas veel slechter als de tags niet op het niveau van de antenne liggen. De volgorde is nog steeds correct, dus qua lokalisatie is er geen probleem. Echter is bij elke asset tag het aantal meet- of detectiepunten afgenomen en is de RSSI gezakt. Tag 5 is zelfs volledig verdwenen uit de data en is dus niet gedetecteerd.



Testconclusie

Als de asset tags niet meer op hetzelfde niveau liggen als de antenne, is hun detectie dus veel minder. Dit hoeft echter niet zo'n zeer probleem te zijn aangezien 1 meetpunt in theorie voldoende is om te weten dat het asset aanwezig is, een tag die niet aanwezig is op de locatie zal uiteraard ook niet 1x antwoorden. Wel is het wegvalLEN van tags een probleem, want dan kan bijhorend asset niet gelokaliseerd worden, en deze kans wordt groter als de detectie verslecht.

Deelconclusie

Qua lokalisatie blijkt dit concept perfect te werken, echter is dit logisch gezien ook niet verrassend. Het voornaamste probleem is het kunnen detecteren van alle aanwezige tags, wat met een RFID opstelling niet vanzelfsprekend is. Uiteraard is het mogelijk om met een andere hardwareopstelling, bv. antennes op verschillende hoogtes, of een staafantenne met een ander bereikveld dan een vlakke antenne, mogelijk om betere detectie te bekomen. Echter evolueert dit op deze manier in een RFID detectieprobleem en komt daarmee buiten de scope, nl. lokalisatie, van dit onderzoek te liggen. Verder is er binnen Aucxis voldoende ervaring op dit veld dat verder onderzoek nutteloos zou zijn.

5.2 BLE

5.2.1 Vooronderzoek

Voordat overgegaan kan worden naar het onderzoeken van de opstellingen die gebruik maken van BLE, is het nodig enkele testen te doen om het gedrag van BLE vast te stellen, en om enkele veronderstellingen te testen.

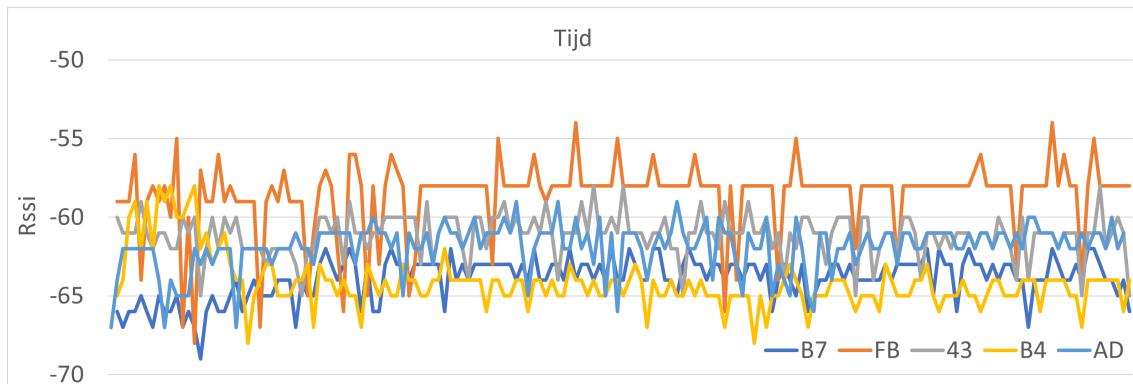
Test 1: Variatietest

Aangezien de lokalisatieopstellingen verder in dit hoofdstuk gebruik zullen maken van RSSI waarden om de locatie van de beacons, en dus ook de bijhorende assets, te bepalen, is het belangrijk dat deze waarden constant zijn in de tijd als alle andere variabelen constant

zijn. Voor deze test worden de gateway en de beacon op een afstand van 150cm uit elkaar gelegd, in hetzelfde vlak. Vervolgens wordt over lange tijd de RSSI waardes gemeten. Dit experiment wordt uitgevoerd bij 3 en bij 30 beaconberichten per gatewaybericht, dit om te bekijken of dit een effect heeft. Want logischerwijs zal ook deze verhouding een invloed hebben, nl. hoe meer berichten de gateway heeft ontvangen, hoe meer de eventuele extreme waarden zullen uitgemiddeld worden en hoe stabieer de waarden uitgestuurd door de gateway zullen worden. Beide experimenten zijn uitgevoerd met 5 verschillende beacons van het type MokoSmart H5, en 2 beacons van het type MokoSmart M2. Ze zijn allen aangeduid a.d.h.v. de laatste 2 karakters van hun MAC adres.

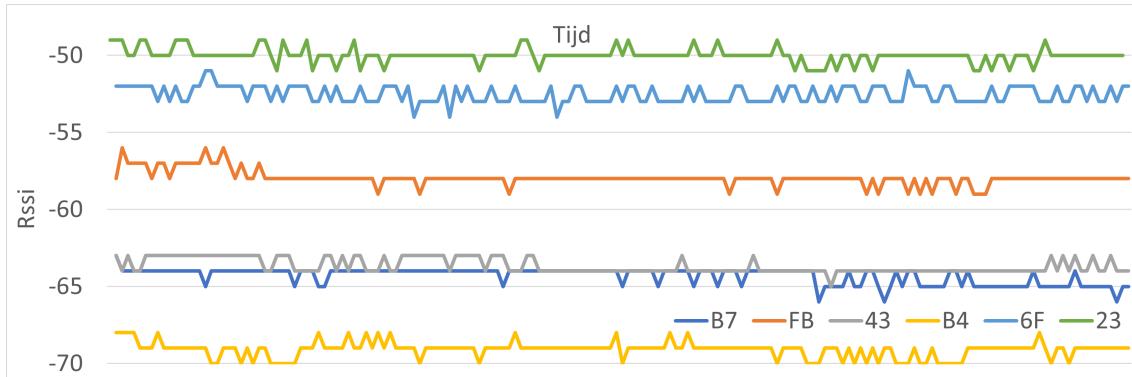
a) 3 beaconberichten per gatewaybericht

Uit dit testresultaat is duidelijk af te lijden dat een uitmiddeling van 3 berichten een zeer grote variatie veroorzaakt in de RSSI waarden, met bij bv. beacon FB een verschil tussen de uitersten van 14 dBm. Aangezien de FSPL formule duidelijk maakt dat in theorie een verschil van 6 dBm een verdubbeling van de afstand betekent, komt deze onzekerheid neer op een afstandsverschil van ongeveer factor 4, het spreekt voor zich dat dit nefast is voor elke poging tot lokalisatie.



b) 30 beaconberichten per gatewaybericht

Uit deze test is zichtbaar dat een uitmiddeling over 30 berichten veel minder variatie geeft, met over het algemeen een variatie van plus en min 1 van de gemiddelde waarde. Dit lijkt meer acceptabel. Ook is er in dit experiment 1 H5 beacon (code AD) vervangen door 2 beacons van het type H2. Dit om een vermoeden te onderzoeken dat, alhoewel alle beacons dezelfde instellingen hebben, hun zendsterkte toch varieert. Dit is hier ook bevestigd, deze 2 (6F en 23) hebben een hogere gemiddelde RSSI waarde dan de 4 overgebleven H5 beacons, welke onderling ook vrij veel van elkaar verschillen.



Testconclusie

Uit deze eerste test zijn 2 dingen duidelijk geworden, allereerst dat er een goed aantal beaconberichten nodig is voor uitmiddeling per gatewaybericht, anders zijn er grote variaties in de RSSI waarden. Aan het versnellen van de beacons is echter ook een groot nadeel verbonden, namelijk het verminderen van de batterijduur. Deze factor is rechtstreeks verbonden aan kostprijs, voor de nieuwe batterij, en de werkuren om deze te vervangen. Ook zal het afhangen van de use-case hoe belangrijk deze is. Alternatief kan ook de gateway trager uitsturen, wat een negatief effect zal hebben op de lokalisatiesnelheid. Dit zal een afweging zijn gebaseerd op de situatie maar is zeker niet onbelangrijk. Tijdens het verdere verloop van dit onderzoek zal een (arbitraire) waarde van 30 beaconberichten per gatewaybericht worden aangehouden, aangezien dit een mooie middenweg lijkt, maar dit kan duidelijk verhoogd/verlaagd worden met de voor- en nadelen vandien.

Als 2e is er ook duidelijk geworden dat er een verschil zit tussen de zendsterkte van BLE beacons met dezelfde instellingen. Dit zowel voor beacons van hetzelfde type, als van andere types. Hieruit volgt dus dat, als er een omzetting van RSSI waarde naar een afstand moet worden gemaakt, deze waarde op een of andere manier zal moeten worden genormaliseerd. Een mogelijkheid hiervoor is het veld 'RSSI at 0m', aanwezig in een UID bericht. Een andere optie is de beacons kalibreren dat ze even sterk zenden. Ongeacht hoe hier rond wordt gewerkt, blijft het een aandachtspunt.

Test 2: Afstandstest

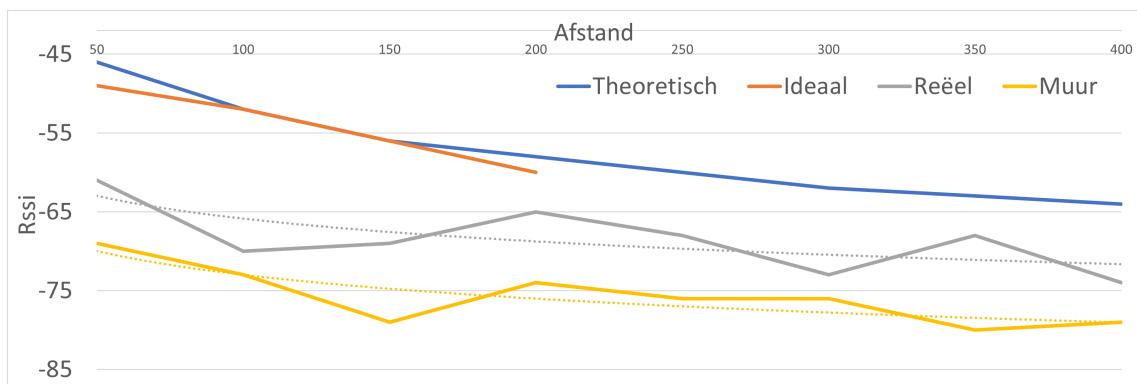
De volgende veronderstelling die zal worden getest, is het verloop van de RSSI waardes, in functie van afstand tussen de beacons en de gateway. In theorie zou deze moeten verlopen volgens de FSPL formule (ongeveer exponentieel, met een neerwaarts traject van 6dBm per verdubbeling van de afstand). Deze test heeft als doel na te gaan of dit in praktijk ook zo is. In dit experiment zal een gateway worden opgesteld, met een beacon die steeds verder van deze gateway zal verwijderd worden in intervallen van 50cm. Dit experiment zal 3x worden herhaald, 1x in een ideale omgeving, nl. een anechoïsche kamer¹, 1x in een open reële omgeving, nl. een bemeubelde huiskamer, en ditzelfde nogmaals, maar met 1 muur

¹Een anechoïsche kamer is een kamer waarvan de muren bedekt zijn met speciaal gevormd mousse, meestal puntvormig. Dit is bedoeld om radio- en geluidsgolven zo goed mogelijk te absorberen en zo een kamer te creëren met zo weinig mogelijk reflecties.

tussen, om zo het verwachte negatieve effect van obstakels te controleren. De meting in ideaal geval zal minder meetpunten bevatten dan de reële, omwille van de gelimiteerde grootte van de anechoïsche kamer.

Resultaat

Er is duidelijk zichtbaar dat theorie en realiteit veel van elkaar verschillen. De (beperkte) meetpunten van de ideale meting komen zeer goed in de buurt van de theorie, maar vanaf er wordt overgestapt naar een open reële ruimte zijn de resultaten zeer anders. Met als voornaamste bevindingen dat de waarden veel lager liggen dan in theorie, en dat het niet elke waarde dalend is. Wel is aan de bijgetekende logaritmische trendlijn te zien dat de reële waarden wel een dalend verloop kennen. Verder zien we dat ook de meting met muur een grillig, maar neerwaarts verloop vertoont, op een lager niveau dan zonder muur.



De reële testen zijn uitgevoerd met 5 verschillende MokoSmart H5 beacons, echter aangezien allen een gelijkaardig verloop vertoonden, worden de andere 4 niet extra bijgevoegd.

Testconclusie

Aangezien het voornaamste verschil tussen de ideale en realistische situatie het bestaan van reflecties is, is met deze test dus duidelijk geworden dat deze een zeer grote impact kunnen hebben op de resultaten en de RSSI waarden. Voornamelijk in de vorm van een schommeling, welke vervelend is als er een conversie moet worden gemaakt tussen RSSI en afstand, en verder ook in een algehele RSSI vermindering tegenover de theorie. De testen voor de effectieve scenario's zullen allen plaatsvinden in reële omgevingen, aangezien implementaties van systemen gebaseerd op deze scenario's ook in reële ruimtes zullen werken, en puur theoretische of ideale situaties dus geen nut hebben om te vergelijken.

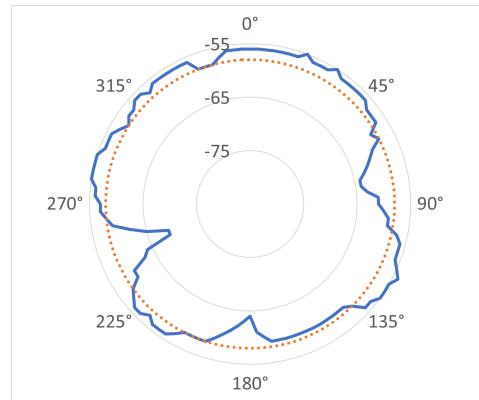
Test 3: Rotatietest

Deze derde en laatste test in dit vooronderzoek zal de veronderstelling testen dat de meting van de gateway richtingsonafhankelijk is, nl. of er een verschil is in RSSI als de enige variabele de locatie van de beacon rond de gateway is. Voor deze test is een gateway opgesteld op een draaiplatform in een anechoïsche kamer, met een MokoSmart H5 beacon op 150cm afstand. Tijdens te test zal de gateway rond zijn as draaien. Dit gebeurt 2x, eens

met de beacon op dezelfde hoogte als de gateway, en eens met de beacon 50cm hoger.

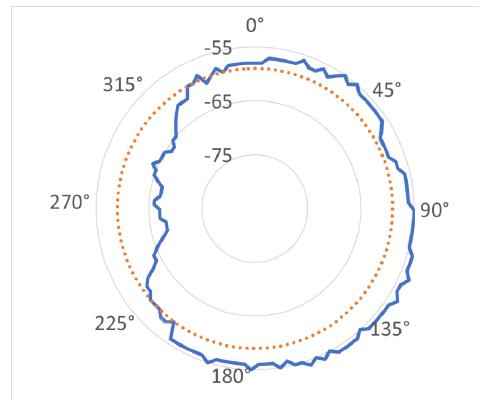
a) Beacon en gateway op zelfde hoogte

Uit dit resultaat is zeker duidelijk dat er een zekere richtingsafhankelijk is, met een grote blindspot rond 260° van -68 dBm , een verschil met het gemiddelde van 10 dBm , met 2 kleinere op 80° en 180° met een verschil van 5 dBm . Alhoewel niet drastisch, het overgrote deel van is vrij constant, is dit toch noemenswaardig. De meest voor de hand liggende verklaring hiervoor is het feit dat de ingebouwde (staaf) antenne loopt op de lijn van 90° en 270° , dus de 2 voornaamste dippen wijzen ongeveer naar de uiteinden van deze antenne, en een blindspot hier is karakteristiek voor een staafantenne.



b) Beacon 50cm boven gateway

Hier is zichtbaar dat de harde blindspots uit de vorige test verdwenen zijn, wat het vermoeden dat dit met de antennerichting te maken heeft lijkt te bevestigen. Wel is er nog een duidelijk dal in het kwartaal tussen 225° en 315° .



Testconclusie

Uit deze test is duidelijk geworden dat een gateway niet 100% richtingsonafhankelijk is. Over de grote lijn zal dit vermoedelijk geen problemen geven, echter kunnen de plotse daten in meetgevoeligheid onverwachte waarden opleveren als een beacon toevallig net in die richting ligt. Tijdens de volgende testen zullen alle gateways in dezelfde richting worden geplaatst om het effect van deze verlopen te standaardiseren.

Deelconclusie

Uit dit vooronderzoek is duidelijk geworden dat niet elke theoretische veronderstelling ook geldig is in een reële praktijk. Het is belangrijk dit eerst vastgesteld te hebben, aangezien het waarschijnlijk mogelijk zal zijn om sommige anders onverklaarbare fenomenen in komende scenario tests te verklaren. Ook zijn er in de testconclusies maatregelen/standaarden

vastgelegd om deze effecten zo veel mogelijk te standaardiseren.

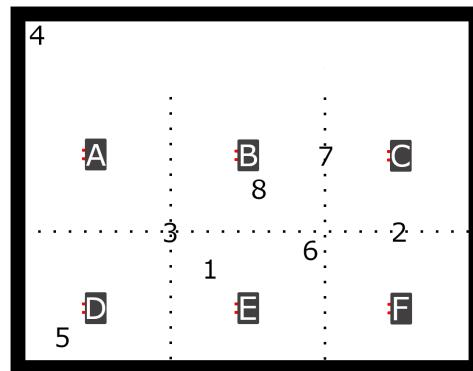
5.2.2 1 gateway per locatie

Deelhypothese

Deze opstelling zal een asset kunnen lokaliseren, genomen dat de gekozen locaties een gelijkaardige grootte hebben.

Test 1: 6 locaties in reële, open ruimte, gelijk verdeeld

De eerste test voor deze opstelling bestaat uit de eenvoudigste en best case opstelling. In een open ruimte zijn, in een raster, 6 gateways² geplaatst, op een afstand van 2m uit elkaar. Dan is de ruimte in 6 locaties verdeeld, volgens de afstand van de beacons. Een punt behoort dus tot de locatie van de dichtstbijzijnde gateway. In praktijk komt deze locatieafscheiding³ neer op een raster middendoor de gateways. Verder worden er verschillende MokoSmart H5 en M2 beacons verdeeld over de ruimte, en zal worden bekeken waar zij volgens de gemeten waarden zich bevinden, en zal dit worden vergeleken met hun echte positie.



Resultaat

De resultaten van deze test zijn zichtbaar in bijhorende tabel. De laagste waarden per beacon staan aangeduid in het groen, en het is meteen duidelijk dat deze toewijzing over het algemeen goed is verlopen. Ook grensgeval beacons zijn toegewezen aan 1 van hun aangrenzende locaties. Enkel bij beacon 6 en 8 is een verschil te vinden.

	1	2	3	4	5	6	7	8
A	-74	-77	-70	-72	-65	-69	-60	-79
B	-73	-80	-67	-75	-70	-70	-55	-71
C	-77	-70	-70	-79	-63	-67	-63	-73
D	-69	-71	-70	-81	-58	-67	-58	-74
E	-64	-71	-68	-75	-64	-63	-67	-72
F	-70	-65	-74	-80	-69	-60	-64	-69

We hebben een onderscheid in soorten beacons die even apart horen besproken te worden, in volgorde van moeilijkheid. Allereerst hebben we beacons die duidelijk in een locatie liggen, niet tussen 2 beacons. Tijdens deze test zijn dit beacon 4 en 5. Deze zijn beiden met een comfortabel RSSI verschil gecategoriseerd in de juiste locatie. Verder hebben we de beacons duidelijk in een locatie, maar tussen verschillende gateways. Dit zijn beacons 1 en 8. Hoewel beacon 1 met voorsprong correct is, is er iets vreemd gebeurd bij beacon 8, welke gecategoriseerd wordt bij gateway F, van een zelfs niet aangrenzende locatie. Dit is zeer vreemd aangezien deze zeer dicht bij gateway B lag, maar als we dit vergelijken

³Gateways worden aangeduid door een grijs blokje met een bijhorende letter. De illustratie is ook voorzien van 2 rode stippen op de gateway, deze illustreren de voorkant (0°) van de gateway.

²De grenzen van locaties worden in de illustraties aangegeven door een stippellijn.

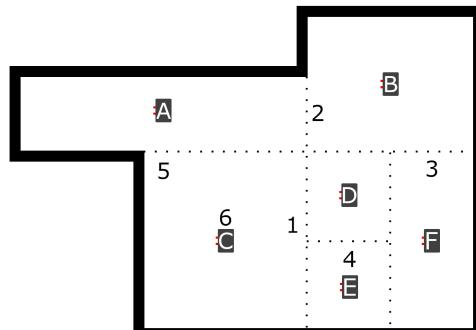
met het meetpatroon van de gateway zien we dat deze toevallig net in een blindspot lijkt te liggen, wat een mogelijke verklaring zou kunnen zijn. Verder zijn er de grensgeval beacons, waaronder beacon 2 en 7, welke op de grens tussen 2 locaties liggen. Zij zijn echter toegewezen aan 1 van deze 2, welke in orde is, aangezien het in dit scenario niet de bedoeling is om een exacte positie te bepalen, maar toewijzing aan een locatie te doen. En als laatste beacon 3 en 6 op een 4-punt. Beacon 3 is ook aangrenzend toegewezen dus ook in orde. Beacon 6, alhoewel fysiek net over de grens van locatie E liggend, is toegewezen aan aangrenzende locatie F. In theorie is dit dus een fout, maar geen grote. Ook is een zekere foutmarge bij de locatiegrenzen geen verrassing, gezien de onzekerheden in de RSSI waarden vastgesteld in het vooronderzoek.

Testconclusie

De eerste test heeft bewezen dat dit lokalisatiescenario mogelijkheden heeft, op zijn minst in een eenvoudige egale opstelling. Een toewijzingsscore van 6.5/8 is ook zeker acceptabel.

Test 2: 6 even grootte in reële, open ruimte, ongelijk verdeeld

Deze test verandert de locaties van gelijke grootte uit vorige test in locaties van variabele grootte en vorm. Verder is de ruimte, hoewel nog steeds open, niet meer convex. De locaties blijven dit wel. Hier is het dus niet zo dat elk punt zich ook bij zijn dichtstbijzijnde gateway bevindt qua locatie.



Resultaat

De resultaten van deze test zijn zichtbaar in bijgevoegde tabel. We zien dat van de 6 beacons er 3 goed en 3 slecht zijn toegewezen. Echter zijn de 3 slecht toegewezen beacons (1, 3 en 5) de beacons die dichter lagen bij de toegewezen locatie gateway dan bij de theoretisch correcte locatie gateway. De andere 3 beacons (2, 4 en 6) zijn wel correct toegewezen.

	1	2	3	4	5	6
A	-82	-77	-72	-79	-52	-63
B	-75	-65	-67	-68	-63	-64
C	-68	-71	-74	-72	-64	-47
D	-66	-66	-74	-70	-58	-63
E	-71	-73	-76	-61	-65	-63
F	-69	-71	-74	-69	-62	-60

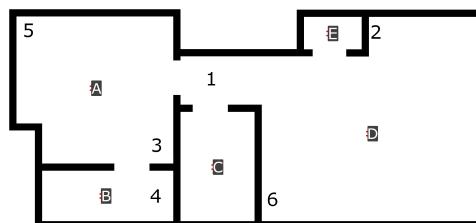
Testconclusie

Deze test bevestigt het vermoeden dat deze lokalisatie strategie het slechter zal doen bij locaties van verschillende groottes, door de basering op RSSI en afstand, en dit zeker in een open ruimte waar deze afstand de enige bepalende factor voor de RSSI is (uiteindelijk buiten de onzekerheden vastgesteld tijdens het BLE vooronderzoek). Een mogelijke remedie hiervoor is een RSSI filter te plaatsen op gateways voor kleinere locaties, zodat het gebied

dat ze (stelen) van aanpalende grotere ruimtes verminderd. Echter omdat het bereik nog steeds (theoretisch) een cirkel blijft zullen vreemde verschijnsels bij locatieovergangen onvermijdelijk blijven.

Test 3: 5 realistische locaties

Deze derde en laatste test vergroot het concept van vorige test en voegt muren toe zodat de opstelling realistischer wordt. Deze opstelling bestaat uit 5 locaties, ondergebracht in 5 ruimtes van verschillende groottes, gescheiden door muren. Hier is dus afstand niet meer de enige bepalende factor voor de RSSI, maar ook tussenliggende muren. Wat in theorie een groter verschil zou moeten geven, en het grootteverschil tussen locaties wat zou kunnen compenseren. Dit experiment zal ook 2x worden uitgevoerd, 1x met tussenliggende deuren gesloten, en 1x open, om ook het mogelijke effect van deuren vast te stellen.



a) Deuren gesloten

Uit de resultaten is af te leiden dat dit principe zeer goed werkt, met een perfecte lokalisatie. Dit is geen verrassing voor de duidelijke, safe beacons (4 en 5). Maar de andere 4 beacons liggen stuk voor stuk in een locatie maar dichter bij een andere gateway (weliswaar met een muur tussen). Met in het bijzonder beacon 2, welke op ong 50cm (+muur) ligt van gateway E, en op 250cm van gateway D, maar nog steeds correct bij locatie D wordt gecategoriseerd.

	1	2	3	4	5	6
A	-76	-	-63	-72	-59	-75
B	-	-	-69	-55	-84	-79
C	-76	-73	-74	-71	-	-73
D	-74	-63	-83	-84	-84	-60
E	-	-64	-83	-	-	-68

b) Deuren open

Deze resultaten tonen geen noemenswaardig verschil met de test met gesloten deuren. Alles blijft correct gecategoriseerd, maar ook de waarden verschillen niet veel. Dit is vooral verrassend bij beacon 1, welke met open deur rechtstreeks zichtbaar is voor gateway A, maar toch correct bij gateway D blijft ingedeeld.

	1	2	3	4	5	6
A	-76	-84	-65	-70	-59	-77
B	-80	-	-72	-55	-84	-81
C	-74	-72	-79	-72	-	-74
D	-73	-62	-83	-82	-	-59
E	-	-66	-82	-	-	-75

Testconclusie

Deze test toont mooi aan dat de extra isolatie van een muur een positieve invloed heeft op lokalisatie volgens dit principe, en dat een verschil in grote tussen aanpalende ruimtes niet noodzakelijk een groot probleem hoeft te zijn. Uiteraard zal ook het soort muur een invloed hebben op deze resultaten. In de testopstelling worden muren uit cellenbeton gebruikt, maar een dunnere muur uit bv. kalkplaat zal mogelijk een minder isolerend effect hebben. Ook is duidelijk dat een deur weinig impact heeft op de resultaten. Ook dit kan natuurlijk aan het materiaal liggen. Een houten deur zoals in de testopstelling is klaarblijkelijk verwaarloosbaar, maar bv. een nooddeur, speciaal als er metaal in zit, zal een grotere impact hebben.

Deelconclusie

Al bij al is dit een zeer acceptabel scenario, het merendeel van de lokalisaties was geslaagd, met uitzondering van fouten aan de locatieovergang in een open ruimte, maar dat is geen verrassing na de vaststellingen in het vooronderzoek. Ook bestaat er de mogelijkheid tot toevallige mislokalisaties door hardware effecten, maar dit ligt niet zozeer aan het scenario zelf. De hypothese is bevestigd.

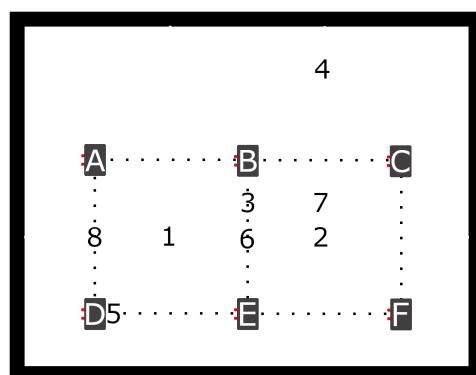
5.2.3 Meerdere gateways per locatie

Deelhypothese

Deze opstelling slaagt er in om met een BLE beacon getagde assets correct te lokaliseren.

Test 1: 2 rechthoekige locaties in reële, open ruimte

De testopstelling voor deze eerste test bestaat uit een raster van 6 gateways (analoog aan de opstelling bij het vorige scenario, test 1). De locatiedefinitie is in dit geval in de vakken tussen de gateways, om 2 even grote locaties te creëren. Het idee is dat zichtbaar is aan de meetwaarden in welk vak een beacon ligt, en dus zo een locatie toegewezen krijgt. Meer specifiek aan de laagste som van RSSI's van de gateways in de hoekpunten.



Resultaat

Bijhorende resultaten zijn verrassend goed, met voor elke van de 8 beacons een correcte lokalisatie. Enkele interessante rand gevallen zijn beacon 3 en 6, welke op de grens tussen de 2 locaties liggen. Bij beide zijn de cijfers duidelijk voor de rechtse locatie, nochtans zou men verwachten dat deze cijfers dichter bijeen zouden liggen. Verder is er ook beacon

4, welke op geen enkele locatie ligt en is ingedeeld bij de rechtse locatie. Deze indeling is uiteindelijk de correcte, aangezien dit de dichtstbijzijnde locatie betreft en er geen 'geen locatie' mogelijk is in dit experiment.

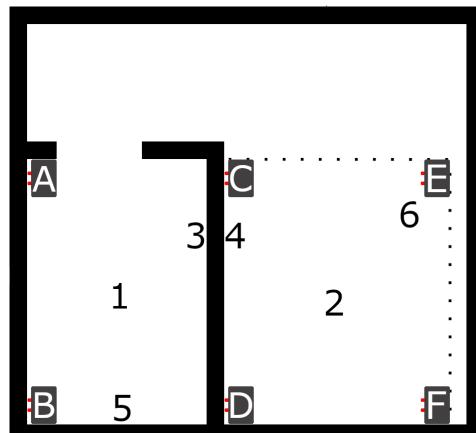
	1	2	3	4	5	6	7	8
A	-70	-72	-68	-78	-56	-65	-82	-63
B	-67	-67	-70	-70	-71	-64	-68	-70
C	-----	-70	-74	-69	-74	-64	-65	-67
D	-70	-76	-71	-74	-28	-64	-75	-59
E	-68	-68	-72	-72	-73	-60	-61	-72
F	-----	-74	-68	-67	-71	-59	-58	-67
	-275	-279	-290	-284	-268	-265	-296	-289
					-208	-247	-258	-252
						-299	-276	-241
							-246	

Testconclusie

Deze opstelling heeft in deze eerste test een perfecte lokalisatie gedaan, en is daarmee voorlopig zeer goed. Echter is er het detail van de 'geen locatie' beacons, maar dit is in elk scenario een ding. Hier is dit in theorie oplosbaar aangezien er een bepaalbare bovengrens in som van RSSI's wil de beacon nog tussen de gateways liggen. Deze is ook theoretisch berekenbaar gegeven de afstand tussen de gateways, de FSPL formule en enige meetkundige kennis, maar gezien het vastgestelde verschil tussen theorie en praktijk tijdens het vooronderzoek lijkt dit eerder een maximum dat moet worden gemeten/bepaald.

Test 2: 2 rechthoekige locaties gescheiden door muur

De opstelling voor deze test is analoog aan de vorige, het enige verschil is dat er een muur is verschenen tussen de 2 locaties. Dit zal in praktijk ook meer het geval zijn, nl. 2 aangrenzende lokalen. Het doel van deze test is om het effect van deze muur op de cijfers te bekijken.



Resultaat

In deze 2e test is dit scenario er ook weer in geslaagd elke beacon correct te lokaliseren. Hier is wel een extra stap bij de verwerking gekomen. Door het toevoegen van de muur wordt niet elke beacon door elke gateway meer opgevangen. Hierdoor verschijnen er rode platte streepjes in de tabel. Het spreekt voor zich dat dit ook meteen diskwalificerend werkt voor de locatie(s) waarvan deze gateway een hoekpunt is aangezien de beacon niet tussen deze gateways zal liggen als er 1 van deze gateways de beacon niet eens ziet.

	1	2	3	4	5	6
A	-68 -----	-73 -----	-67 -----	- -----	-75 -----	- -----
B	-59 -----	-73 -----	-69 -----	-77 -----	-67 -----	-78 -----
C	-68 -68	-64 -64	-72 -72	-52 -52	-78 -78	-75 -75
D	-62 -62	-46 -46	-76 -76	-77 -77	-72 -72	-67 -67
E	----- -67	----- -56	----- -73	----- -73	----- -	----- -61
F	----- -71	----- -55	----- -66	----- -78	----- -	----- -66
	-257	-268	-256	-221	-284	-287
					-280	-292
						-269

Testconclusie

Op het eerste zicht lijkt deze test volledig geslaagd, het toevoegen van een muur zorgt er niet voor dat dit scenario slechter presteert. Echter is er wel een belangrijk detail dat aangehaald moet worden. Als de cijfers beter onderzocht worden blijkt het volgende: bij elke beacon is de gateway die hem met de hoogste RSSI waarnemt een gateway die in dezelfde ruimte ligt als de beacon. Met andere woorden dezelfde uitkomst kan bekomen worden met 1 gateway per ruimte, en zo wordt de opstelling vereenvoudigd tot het vorige scenario, waarvoor minder gateways nodig zijn.

Deelconclusie

Dit scenario blijkt zeer effectief te zijn en heeft alle geteste beacons perfect gelokaliseerd. Echter blijkt wel dat deze opstelling geen voordelen heeft over de vorige (1 gateway / locatie) als een locatie 1 ommuurde ruimte is, maar wel meer hardware vereist. Hiervoor is het dus niet geschikt. Voor lokalisatie in een open ruimte echter, lijkt ze beter te werken, voor een hogere hardware kost. De deelhypothese is bevestigd.

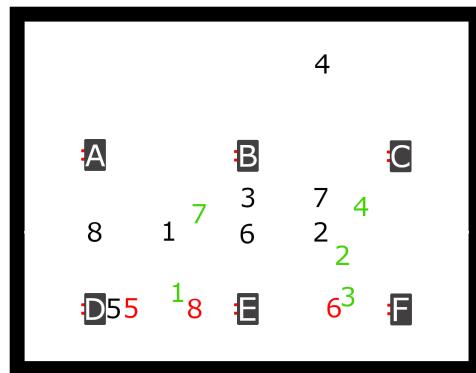
5.2.4 Gateways in rasteropstelling

Deelhypothese

Deze opstelling slaagt er in om met een BLE beacon getagde assets een positie te geven binnen het raster zodat het eenduidig met een locatie kan worden gelinkt.

Test 1: Raster in open, reële ruimte

De opstelling voor deze test is idem aan het vorige scenario, test 1. Aangezien bij die test ook beacons in een raster gemeten zijn, kon de data uit die test hier hergebruikt worden en worden verwerkt met trilateratie. Voordat trilateratie kan toegepast worden, moet er eerst een omzetting gebeuren tussen de RSSI waarde en de afstand. Dit kan door de FSPL formule te gebruiken (weliswaar omgekeerd). Aangezien bij de verwerking van de resultaten bleek dat dit niet geheel correct was is nog een offset in dBm toegevoegd, verschillend per soort beacon. Dit om het, bij het vooronderzoek vastgelegde fenomeen dat beacons, hoewel ze dezelfde instellingen hebben, niet allen een even sterk signaal sturen. Bij de verwerking is een waarde gebruikt van -16 dB voor de gebruikte H5 beacons, en -10 dB voor de M2 beacons. Deze waardes zijn experimenteel vastgelegd, en vloeien voort uit de data van de afstandstest bij het vooronderzoek, waar de offset van de trendlijn tegenover de theoretische curve is gebruikt.



De resultaten van de trilateratie worden geplot op bovenstaand grondplan. De zwarte cijfers zijn de effectieve locaties van de beacons, de gekleurde zijn de berekende locaties a.d.h.v. de resultaten en trilateratie, met de groene een geslaagde trilateratie, en een rode een mislukte. Een mislukte wilt zeggen dat trilateratie niet mogelijk is door te korte afstanden (bv. de afstand tussen beacon 6 en gateway E en F bedraagt resp. 0.87m en 0.62m, dus opgeteld 1.49m. Dit is onmogelijk aangezien de afstand tussen deze beacons 2m bedraagt). Bij een situatie zoals dit is de beacon geplaatst tussen de 2 gateways.

Resultaat

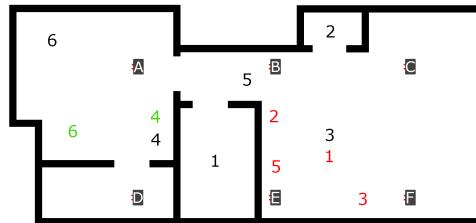
Om het resultaat te berekenen zijn de 2 gateways met de beste RSSI gebruikt. Meteen is zichtbaar dat het resultaat vrij catastrofaal is en dat de uitkomst van de trilateratie de beacons precies random plaatst. Beacon 5 komt in de buurt, maar deze lag fysiek aan gateway 5, waardoor zijn RSSI zeer hoog was (-28 dBm), hierdoor werd deze door de noodoplossing van het algoritme toch ietwat in de buurt geplaatst maar dit is een unicum. Verder is enkel beacon 2 relatief ok geplaatst.

Testconclusie

Het is duidelijk dat trilateratie op basis van RSSI zeer onnauwkeurig is. Dit ligt vooral aan het onnauwkeurig omzetten van RSSI waardes in afstanden door de grote onzekerheden op RSSI waardes. Deze eerste test belooft zeker niet veel goeds voor dit concept.

Test 2: Raster in verspreid over gebouw met muren

In deze 2e test is het raster vergroot, van 2m maar 3.5m tussen gateways. Ook is het raster verspreid over een gebouw, met muren tussen. De methodieken voor berekening en de kleurcodes voor het visualiseren van de resultaten zijn gelijk gebleven aan vorige test.



Resultaat

Na deze test zijn er slechts 2 beacons die met succes kunnen getrilatereerd worden zonder de noodoplossing te gebruiken (groen). Deze 2 beacons (4 en 6) zijn ook enkel opgemerkt door de 2 gateways waar ze tussen liggen. De 4 andere beacons zijn zeer slecht geplaatst in vergelijking met hun effectieve positie.

	1	2	3	4	5	6
A	-84	-79	-72	-73	-72	-71
B	-80	-61	-66	-	-61	-80
C	-77	-70	-61	-	-71	-
D	-81	-	-80	-74	-	-71
E	-73	-66	-61	-	-66	-
F	-	-70	-60	-	-74	-

Testconclusie

Deze grotere test heeft weer aangetoond wat na vorige test al duidelijk was, trilateratie op basis van RSSI is onnauwkeurig. En het toevoegen van muren, waardoor niet elke gateway meer elke beacon ziet, heeft de nauwkeurigheid enkel verslecht.

Deelconclusie

Na deze 2 tests kan duidelijk worden besloten dat dit scenario niet haalbaar is met de gebruikte BLE hardware. In het principe zit potentieel, maar enkel als er een goede, precieze conversie kan worden gemaakt tussen RSSI waarden en afstanden. De deelhypothese is hierbij dus ontkracht.

5.2.5 1 beacon per locatie, midden van locatie

5.2.6 1 beacon per locatie, aan deur

5.2.7 Meerdere locatiebeacons per locatie

5.2.8 Beacons in rasteropstelling

Deelconclusie

Na de zeer slechte testresultaten van de statische versie van dit scenario, en omdat dit scenario zich qua principe berust op dubbele trilateratie, waardoor de extreme onnauwkeurigheden bij enkele trilateratie enkel maar extremer zullen worden, is besloten dit scenario

in te delen in dezelfde categorie.

5.2.9 Beacons op intervallen in de gang

6. Conclusie

Curabitur nunc magna, posuere eget, venenatis eu, vehicula ac, velit. Aenean ornare, massa a accumsan pulvinar, quam lorem laoreet purus, eu sodales magna risus molestie lorem. Nunc erat velit, hendrerit quis, malesuada ut, aliquam vitae, wisi. Sed posuere. Suspendisse ipsum arcu, scelerisque nec, aliquam eu, molestie tincidunt, justo. Phasellus iaculis. Sed posuere lorem non ipsum. Pellentesque dapibus. Suspendisse quam libero, laoreet a, tincidunt eget, consequat at, est. Nullam ut lectus non enim consequat facilisis. Mauris leo. Quisque pede ligula, auctor vel, pellentesque vel, posuere id, turpis. Cras ipsum sem, cursus et, facilisis ut, tempus euismod, quam. Suspendisse tristique dolor eu orci. Mauris mattis. Aenean semper. Vivamus tortor magna, facilisis id, varius mattis, hendrerit in, justo. Integer purus.

Vivamus adipiscing. Curabitur imperdiet tempus turpis. Vivamus sapien dolor, congue venenatis, euismod eget, porta rhoncus, magna. Proin condimentum pretium enim. Fusce fringilla, libero et venenatis facilisis, eros enim cursus arcu, vitae facilisis odio augue vitae orci. Aliquam varius nibh ut odio. Sed condimentum condimentum nunc. Pellentesque eget massa. Pellentesque quis mauris. Donec ut ligula ac pede pulvinar lobortis. Pellentesque euismod. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent elit. Ut laoreet ornare est. Phasellus gravida vulputate nulla. Donec sit amet arcu ut sem tempor malesuada. Praesent hendrerit augue in urna. Proin enim ante, ornare vel, consequat ut, blandit in, justo. Donec felis elit, dignissim sed, sagittis ut, ullamcorper a, nulla. Aenean pharetra vulputate odio.

Quisque enim. Proin velit neque, tristique eu, eleifend eget, vestibulum nec, lacus. Vivamus odio. Duis odio urna, vehicula in, elementum aliquam, aliquet laoreet, tellus. Sed velit. Sed vel mi ac elit aliquet interdum. Etiam sapien neque, convallis et, aliquet vel, auctor non, arcu. Aliquam suscipit aliquam lectus. Proin tincidunt magna sed wisi. Integer blandit

lacus ut lorem. Sed luctus justo sed enim.

Morbi malesuada hendrerit dui. Nunc mauris leo, dapibus sit amet, vestibulum et, commodo id, est. Pellentesque purus. Pellentesque tristique, nunc ac pulvinar adipiscing, justo eros consequat lectus, sit amet posuere lectus neque vel augue. Cras consectetur libero ac eros. Ut eget massa. Fusce sit amet enim eleifend sem dictum auctor. In eget risus luctus wisi convallis pulvinar. Vivamus sapien risus, tempor in, viverra in, aliquet pellentesque, eros. Aliquam euismod libero a sem.

Nunc velit augue, scelerisque dignissim, lobortis et, aliquam in, risus. In eu eros. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Curabitur vulputate elit viverra augue. Mauris fringilla, tortor sit amet malesuada mollis, sapien mi dapibus odio, ac imperdiet ligula enim eget nisl. Quisque vitae pede a pede aliquet suscipit. Phasellus tellus pede, viverra vestibulum, gravida id, laoreet in, justo. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Integer commodo luctus lectus. Mauris justo. Duis varius eros. Sed quam. Cras lacus eros, rutrum eget, varius quis, convallis iaculis, velit. Mauris imperdiet, metus at tristique venenatis, purus neque pellentesque mauris, a ultrices elit lacus nec tortor. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent malesuada. Nam lacus lectus, auctor sit amet, malesuada vel, elementum eget, metus. Duis neque pede, facilisis eget, egestas elementum, nonummy id, neque.

A. Onderzoeksvoorstel

Het onderwerp van deze bachelorproef is gebaseerd op een onderzoeksvoorstel dat vooraf werd beoordeeld door de promotor. Dat voorstel is opgenomen in deze bijlage.

B. Bibliografie

Bibliografie

- Adarsh, M. (2022). Bluetooth Low Energy (BLE) Beacon Technology Made Simple: A Complete Guide to Bluetooth Beacons. *Beaconstac*. <https://blog.beaconstac.com/2018/08/ble-made-simple-a-complete-guide-to-ble-bluetooth-beacons/>
- Admin, E. (2022). What is RSSI and its acceptable signal strength? <https://helpcenter.engeniustech.com/hc/en-us/articles/234761008-What-is-RSSI-and-its-acceptable-signal-strength>
- Advantenna-p11™RFID UHF wide beam antenna.* (g.d.). Keonn. <https://keonn.com/wp-content/uploads/Keonn-Advantenna-p11-Data-sheet.pdf>
- Amster, S. (2021). RFID (radio frequency identification). *IoTAgenda*. <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/RFID-radio-frequency-identification>
- Armstrong, S. (2013). 6 Factors that Affect RFID Read Range. https://www.atlasrfidstore.com/rfid-insider/improve-rfid-read-range/?utm_campaign=Content&utm_content=read-range&utm_medium=Tag_Info_Guide_Link&utm_source=Tag_Info_Guide
- atlasrfidstore. (2022a). What are RFID Tags? | UHF Tags Explained. https://www.atlasrfidstore.com/what-are-uhf-rfid-tags/?utm_source=RFID-Beginners-Guide&utm_medium=eBook&utm_campaign=Content&utm_content=tag-guide#introduction
- atlasrfidstore. (2022b). What is RFID? | The Beginner's Guide to How RFID Systems Work. <https://www.atlasrfidstore.com/rfid-beginners-guide/>
- Auxcis. (2022). RFID technologie. <https://www.aucxis.com/nl/rfid/Wat%20is%20RFID?>
- Estimote. (2018). What is Eddystone and how can I use it with my beacons? *Estimote*. <https://community.estimote.com/hc/en-us/articles/206922207-What-is-Eddystone-and-how-can-I-use-it-with-my-beacons->
- Gillis, A. S. (2022). What is the internet of things (IoT)? *IoTAgenda*. <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/Internet-of-Things-IoT>

- Google. (2018). Eddystone. *Github*. <https://github.com/google/eddyStone/tree/master/eddyStone-eid>
- HERTZ EDGE RUNTIME USER GUIDE. (2020). Aucxis cvba.
- MQTT. (2022). MQTT: The Standard for IoT Messaging. <https://mqtt.org/>
- MultiTech. (2022). MultiTech. *MultiTech*. <https://www.multitech.com/landing-pages/what-is-an-iot-gateway>
- Nesbo, E. (2021). What Is BLE (Bluetooth Low Energy) and How Does It Work? *Make Us Of*. <https://www.makeuseof.com/what-is-ble-bluetooth-low-energy/>
- Nordquist, T. (2019). MQTT Explorer An all-round MQTT client that provides a structured topic overview. <http://mqtt-explorer.com/>
- Pasternack. (2020). Free Space Path Loss Calculator. <https://www.paternack.com/t-calculator-fspl.aspx>
- RabbitMQ. (2022). RabbitMQ is the most widely deployed open source message broker. <https://www.rabbitmq.com/>
- Semiconductor, N. (2022). nRF Connect for Desktop. <https://www.nordicsemi.com/Products/Development-tools/nRF-Connect-for-desktop>
- Smart, M. (2022). Eddystone Protocol and Specifications. *Moko Smart*. <https://www.mokosmart.com/eddystone-protocol-and-specifications/>
- Smiley, S. (2017). 17 Things You Might Not Know About Gen 2 RFID Tag Memory Banks. *RFID Insider*. https://www.atlasrfidstore.com/rfid-insider/17-things-might-not-know-gen-2-rfid-tag-memory-banks?utm_source=RFID-Beginners-Guide&utm_medium=eBook&utm_campaign=Content&utm_content=memory-banks
- True-range multilateration. (2022). *Wikipedia*. [https://en.wikipedia.org/wiki/True-range_multilateration#Two_Cartesian_dimensions,_two_measured_slant_ranges_\(trilateration\)](https://en.wikipedia.org/wiki/True-range_multilateration#Two_Cartesian_dimensions,_two_measured_slant_ranges_(trilateration))
- Tseard. (2016). dBm (Decibel-Milliwatts). <https://www.skillsuni.com/dbm-decibel-milliwatts-wat-is-dat-en-hoe-werkt-het/>