

Hoe asset tracking op een bouwwerf kan geoptimaliseerd worden met behulp van Bluetooth Low Energy.

Een vergelijkende studie en Proof of Concept.

Stef Boerjan.

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

Promotor: Mevr. L. Vuyge

Co-promotor: Dhr. G. Liekens

Academiejaar: 2022–2023

Eerste examenperiode

Departement IT en Digitale Innovatie .

Woord vooraf

Samenvatting

Inhoudsopgave

Lijst van figuren	vi
1 Inleiding	1
1.1 Probleemstelling	2
1.2 Onderzoeksvraag	2
1.3 Onderzoeksdoelstelling	2
1.4 Opzet van deze bachelorproef	3
2 Stand van zaken	4
2.0.1 Asset tracking in de bouwindustrie	4
2.0.2 Bluetooth Low Energy	11
2.0.3 Smartphones	15
3 Methodologie	17
3.0.1 Requirements-analyse	17
3.0.2 Long list	18
3.0.3 Short list	21
3.0.4 Conclusie vergelijkende studie	21
3.0.5 Voordelen van BLE asset tracking	22
3.0.6 Nadelen van BLE asset tracking	22
3.0.7 Toelichting van protocols, hardware en software	22
3.0.8 Proof of Concept	22
4 Conclusie	23
A Onderzoeksvoorstel	24
A.1 Introductie	24
A.2 State-of-the-art	25
A.3 Methodologie	25
A.4 Verwacht resultaat, conclusie	26
Bibliografie	27

Lijst van figuren

2.1	RFID tag	7
2.2	RFID handheld	8
2.3	Barcode	9
2.4	QR Code	10
2.5	Angle of Departure	13
2.6	Angle of Arrival	14
3.1	Barcode	20

1

Inleiding

Asset tracking is een veel voorkomend fenomeen wanneer een bedrijf de locatie van zijn fysieke activa wil bijhouden. Dit wordt gedaan in diverse sectoren en in de bouwindustrie is dit niet anders. Asset tracking in de bouwsector wordt reeds gedaan aan de hand van global positioning system (GPS), ultra-windband (UWB) en radio-frequency identification (RFID). Deze technologieën worden gebruikt om de locatie van materiaal en personeel op een complexe bouwwerf te bepalen en bij te houden. Een recente technologie, genaamd Bluetooth Low Energy (BLE), soms ook gekend als Bluetooth Smart, is een opkomende concurrent voor deze reeds gebruikte technologieën.

Bluetooth Low Energy is een draadloos personal area netwerk (PAN) dat werd ontwikkeld met Internet of Things (IoT) in gedachten. IoT applicaties hebben weinig resources en juist daarom is BLE ontwikkeld. Het wordt vandaag de dag virtueel overal gebruikt, gaande van fitness trackers en smart appliances tot location tracking en contact tracing, aangezien dit use cases zijn waar geen grote hoeveelheid data moet uitgewisseld worden of waar niet veel vermogen beschikbaar is. Vergeleken met het klassieke bluetooth is BLE bedoeld om het energieverbruik en de kosten aanzienlijk te doen verminderen, terwijl het communicatiebereik vergelijkbaar blijft. Bluetooth Low Energy wordt door bijna elk operating system ondersteund, zoals onder andere Windows, macOS, Linux, Android en iOS.

Dit gedeelte zal nog aangevuld worden met een verklaring waarom dit gebruikt kan worden in de bouwindustrie en op welk manier dit kan bijdragen.

1.1. Probleemstelling

In de bouwindustrie wordt er aan asset tracking gedaan aan de hand van reeds vermelde technologieën. Bluetooth Low Energy hoort in de grote meerderheid van de bedrijven hier nog niet bij, ondanks het potentieel en geschiktheid. Kostreductie is een van de belangrijkste processen binnenin een succesvol bedrijf en hier zou BLE optimaal aan kunnen bijdragen in het kader van asset tracking door de goedkope hardware en lange gebruiksduur.

Bluetooth Low Energy wordt reeds gebruikt voor indoor traceren. Op het vlak van oppervlakte is een bouwwerf niet erg verschillend met een groot magazijn of bedrijfsgebouw. Werfleiders en andere verantwoordelijken kunnen aan de hand van Bluetooth Low Energy op dezelfde manier hun werkmateriaal, personeel en machines traceren, maar dan veel goedkoper, accurater en mogelijks efficiënter.

Deze scriptie is geschreven in samenwerking met het bedrijf Aucxis te Stekene. Als opdrachtgever is er hardware voorzien zodat de Proof of Concept van deze scriptie gerealiseerd kon worden. Aucxis zal hier meerwaarde in vinden, aangezien ook zij Bluetooth Low Energy in hun asset tracking oplossingen willen integreren.

1.2. Onderzoeksvraag

Om deze problematiek uit te zoeken is een onderzoeksvraag opgesteld met bijhorende deelvragen. Hier zal geprobeerd worden een antwoord op te geven door een literatuurstudie en een experimentele uitvoering.

- Kan Bluetooth Low Energy asset tracking op een bouwwerf optimaliseren?
 - Is Bluetooth Low Energy optimaler op het vlak van kosten tegenover andere technologieën?
 - Is Bluetooth Low Energy optimaler op het vlak van beveiliging tegenover andere technologieën?
 - Is Bluetooth Low Energy optimaler op het vlak van traceernauwkeurigheid tegenover andere technologieën?
 - Is Bluetooth Low Energy optimaler op het vlak van installatiegemak tegenover andere technologieën?
 - Is Bluetooth Low Energy optimaler op het vlak van onderhoudskosten tegenover andere technologieën?

1.3. Onderzoeksdoelstelling

Het doel van deze scriptie is om te bewijzen al dan niet Bluetooth Low Energy een optimale(re) technologie is om assets op een bouwwerf te traceren. De voor-

naamste criteria zullen kosten, beveiliging, traceernauwkeurigheid en hoe makkelijk de installatie is. Dit zal vergeleken worden met de technologieën die vandaag de dag gebruikt worden door de meerderheid van de bouwbedrijven.

1.4. Opzet van deze bachelorproef

De rest van deze bachelorproef is als volgt opgebouwd:

In Hoofdstuk 2 wordt een overzicht gegeven van de stand van zaken binnen het onderzoeksdomein, op basis van een literatuurstudie.

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

In Hoofdstuk 4, tenslotte, wordt de conclusie gegeven en een antwoord geformuleerd op de onderzoeksvragen. Daarbij wordt ook een aanzet gegeven voor toekomstig onderzoek binnen dit domein.

2

Stand van zaken

In dit gedeelte van de scriptie zal de huidige manier van asset tracking binnen de bouwindustrie beschreven worden. Dit houdt in een uitgebreide beschrijving van de reeds gebruikte technologieën voor asset tracking in het algemeen en specifiek op een bouwterrein. Bluetooth Low Energy hoort hier ook bij en de werking ervan zal dus ook uitvoerig worden besproken, samen met de verschillen tussen BLE en het klassieke Bluetooth. Verder zal er verklaard worden hoe Bluetooth Low Energy bij smartphones werkt. Beveiliging van asset tracking technologieën wordt in dit deel van de scriptie ook uitvoerig besproken. De focus zal op Bluetooth Low Energy liggen maar de andere technologieën zullen ook besproken worden.

2.0.1. Asset tracking in de bouwindustrie

Het lokaliseren van middelen op een bouwterrein is in het verleden steeds een uitdagende taak geweest. Onbenutte middelen zoals werktuig gereedschap of machines zouden tot de grote meerderheid van verspilling in de bouwindustrie bijdragen (Nasr e.a., [2013](#)). Door het gebruik van verschillende technologieën hebben onderzoekers zich gericht tot het ontwikkelen van plaatsbepalingssystemen als poging om dit probleem aan te pakken. Met behulp van deze systemen kan activa zoals werktuig gereedschap, machines of personeel gevolgd worden met onder andere als doel op deze manier hun veiligheid te bewaren.

De technologieën die het meest gebruikt worden voor asset tracking in de bouwindustrie zijn GPS, RFID en UWB. Er zijn nog andere technologieën, namelijk barcode en QR code, die gebruikt worden voor asset tracking maar niet specifiek in de bouwindustrie. Deze zullen ook uitgebreid beschreven en later vergeleken worden met de andere technologieën aangezien het onderzoek in deze scriptie niks uitsluit.

Global Positioning System

Het Global Positioning System (GPS) is een positionering en navigatie systeem ontwikkeld door het Amerikaans ministerie van defensie (McNeff, [g.d.](#)) in de jaren zestig. Het bestaat ondertussen uit meer dan dertig satellieten die rond onze aarde cirkelen. Deze kunnen met behulp van de atomische klok, die elke satelliet aan boord heeft, en hun gekende precieze locatie continu uitzenden door middel van signalen die gebruikers op aarde kunnen ontvangen. Hiermee is het mogelijk de tijd en locatie van de gebruiker te bepalen met respectievelijk een paar nanoseconden en meter speling. Elke GPS-satelliet kent zijn eigen baanlocatie en systeemtijd. Om de positie van een ontvanger nauwkeurig te kunnen bepalen, moeten er ten allen tijde minstens vier satellieten zichtbaar zijn die voldoende van elkaar gescheiden zijn. Met behulp van trilateratie, wat de basis is van de gebruikte technieken waarbij de afstandsmetingen van $n+1$ satellieten worden gebruikt voor een n -dimensionale positiebepaling (Rahman, [2012](#)), is het mogelijk de positie te bepalen van een gebruiker op aarde. Hier zal niet verder op uitgebreid worden, aangezien dit niet aansluit bij het doel van deze scriptie.

Vandaag de dag is GPS de meest gebruikte technologie voor het traceren van activa (Nasr e.a., [2013](#)). In de bouwindustrie is GPS zeer handig door zijn groot werkbereik. Hierdoor kunnen bedrijven hun activa volgen over de hele wereld. Dit wordt gerealiseerd aan de hand van trackers die geïnstalleerd worden op het dashboard van voertuigen en machines of op een andere veilige plek waar de tracker niet makkelijk beschadigd kan worden. Deze trackers zijn aangekocht bij een bepaald bedrijf die meestal een bijhorende website of software voorziet waar de klant kan inloggen om de locatie van al zijn activa te raadplegen. Soms voorzien deze GPS trackers extra functionaliteiten zoals diagnostische informatie over de motor (Devlin & McDonnell, [2009](#)), wat zaken inhoudt als stationair draaien, hard remmen, kilometers per liter, etc.

Radio Frequency Identifier

Radio Frequency Identifier (RFID) is een draadloze communicatietechnologie die in zijn simpelste vorm objecten kan detecteren, opsporen, identificeren, volgen en controleren (Tan & Sidhu, [2022](#)). Het bestaat voornamelijk uit drie elementen: readers (figuur [2.2](#)), antennes en tags (figuur [2.1](#)). De reader, soms ook transeiver genaamd, heeft de mogelijkheid radio frequentie (RF) elektrische golven te sturen naar een of meerdere RFID tags. De tags hoeven dus niet in het gezichtsveld van de reader te zitten. Deze tags, actief of passief, ontvangen de elektrische golf met hun antenne en zetten deze met behulp van een spoel om naar elektrische stroom. Vervolgens wordt deze stroom door de tag, die bevestigd is aan een fysiek object, gebruikt om terug via een RF elektrische golf een antwoord te sturen naar de reader.

RFID tags kunnen opgedeeld worden in drie soorten. Actieve, semi-passief en passieve tags (Mezzanotte e.a., 2021). Actieve tags bezitten een batterij die heel het systeem van stroom voorziet. Zo een systeem (van een actieve tag) bestaat uit een ontvanger, een zender en omgevingssensoren. Het principe van een passieve tag is vrij verschillend, want deze tags zullen de stroom, die toekomt als RF elektrische golf omgezet wordt door de ingebouwde spoel, gebruiken om een antwoord te verzenden. Passieve tags hebben geen batterij en transmitter. Semi-passieve tags zijn een mix van actief en passief, in de zin dat ze dezelfde functioneringsprincipe gebruiken, maar ze hebben wel een batterij om de microchip of sensoren van stroom te voorzien.

RFID wordt vaak gebruikt in sectoren waar er bijvoorbeeld producten worden gestockeerd in een magazijn. Indien er door een reader een vraagimpuls wordt verzonden, kunnen de tags antwoorden met een digitaal gegeven. Dit is vaak hun identificatienummer. Op deze manier kan een ID worden toegewezen aan ieder product bij het printen van de tag en kan een magazijnmedewerker met behulp van een reader op deze manier het juiste product vinden in een magazijn.

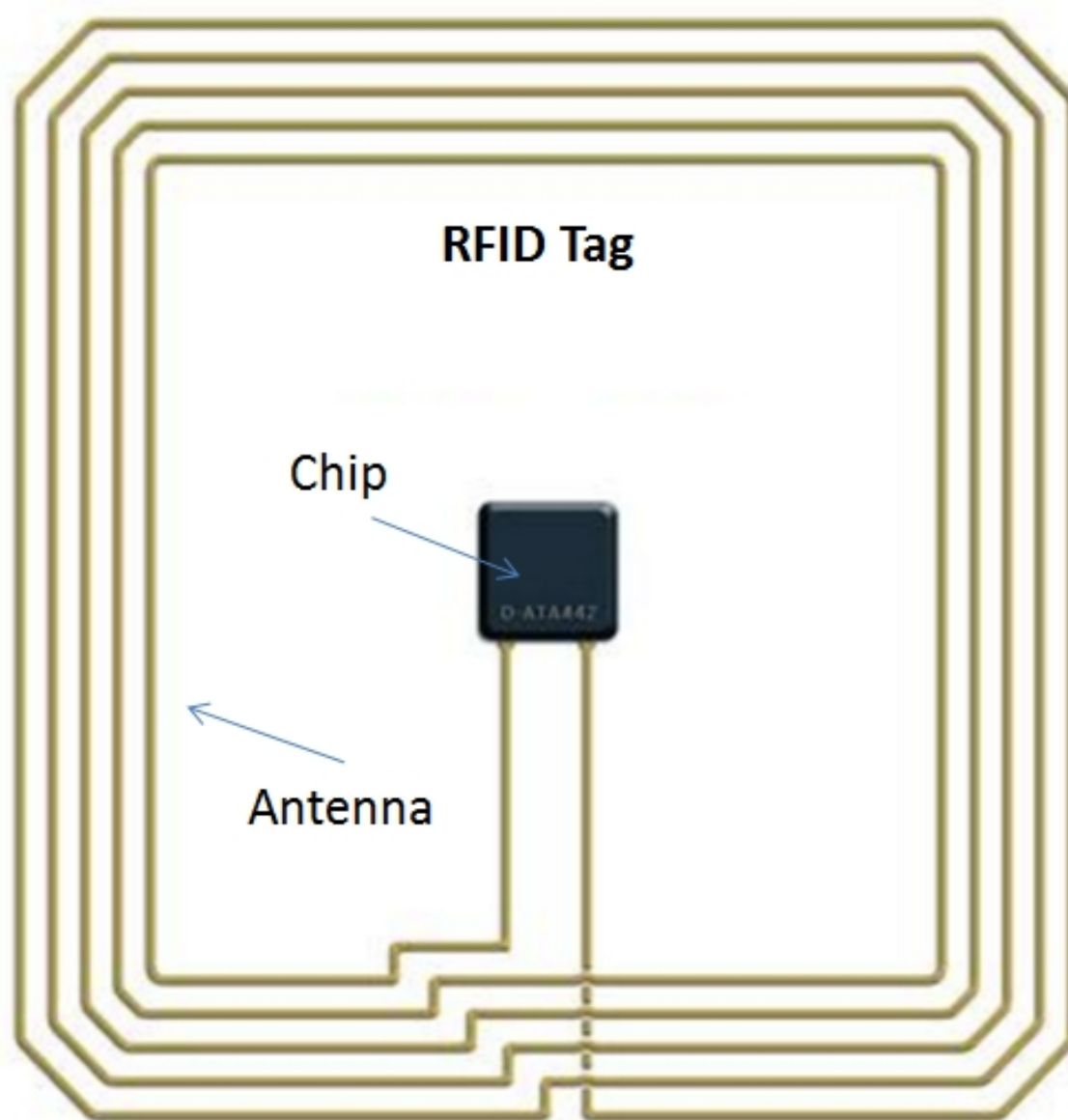
In de bouwindustrie wordt dit op een gelijkaardige manier gebruikt om assets te traceren en lokaliseren.

Ultra-wideband

Ultra-wideband is een draadloze radiotechnologie die ontwikkeld is om over een korte afstand met een hoge snelheid gegevens over te brengen (Rahayu e.a., 2008). Door zijn hoge bandbreedte is UWB geschikt voor verschillende doeleinden zoals video en audio maar ook in traditionele toepassingen zoals niet-coöperatieve radarbeeldvorming en andere zaken zoals het verzamelen van nauwkeurige plaatsbepalingen en tracking. Een perfecte implementatie werd hiervan gedaan door Apple die UWB gebruikt als technologie voor de Apple AirTag (Griffith, 2021).

Het is mogelijk voor UWB apparaten, door passende technische normen, om te opereren in het spectrum dat door bestaande radiodiensten bezet worden zonder storing te veroorzaken. Dit heeft als voordeel dat op deze manier schaarse spectrumbronnen efficiënter gebruikt kunnen worden.

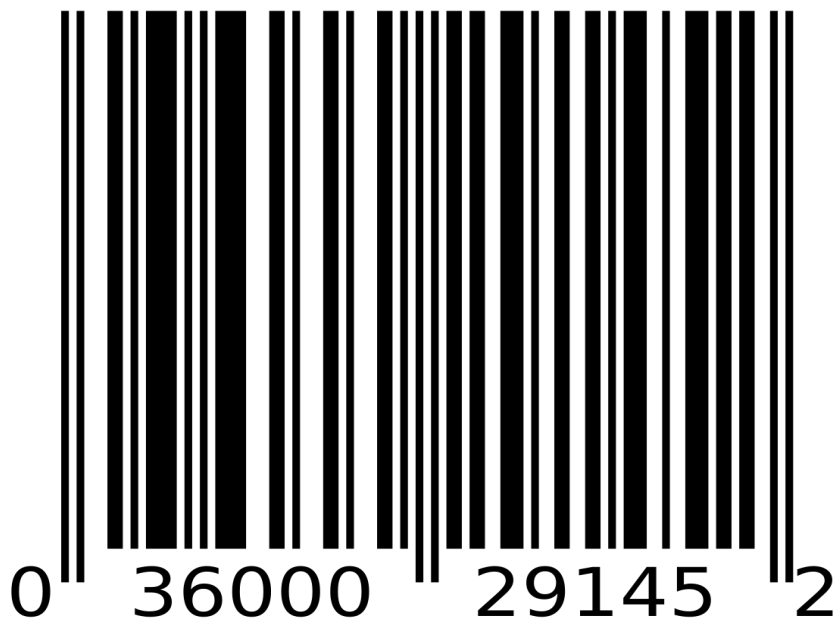
Ultra-wideband wordt reeds gebruikt om indoor zaken te traceren aangezien dit hiervoor een zeer geschikte technologie is. Met behulp van tags en sensors, een gelijkaardig systeem als BLE en RFID, kunnen assets getraceerd en 2D weergegeven worden (Siddiqui e.a., 2019). Dit wordt gerealiseerd door middel van Angle of Arrival (AOA) en Time of Arrival (TOA) algoritmen te gebruiken die samen met het verschil tussen de verschillende technologieën wat verder in deze scriptie uitgelegd zullen



Figuur (2.1)
RFID tag



Figuur (2.2)
RFID handheld



Figuur (2.3)

Dit is een generieke barcode.

worden.

Barcode

Barcodes zijn de meest gebruikte vorm van asset tracking (Penny, 2022) en is al in gebruik sinds de jaren zestig. Een barcode is een afbeelding dat bestaat uit een serie zwarte en witte balkjes (Rankin, 2020). Dit visueel patroon kan gelezen worden door een barcode scanner of ook barcode lezer genoemd. Zo een barcode scanner kan aan de hand van een ingebouwde lichtbron en een lens de afbeelding scannen en decoderen, door middel van een vast algoritme, naar iets betekenisvol. Barcodes worden het meest gebruikt in detailhandel, magazijnen, voor inventarisatie en niet te vergeten om kassasystemen van supermarkten te automatiseren. Het is dus zeker mogelijk barcodes te gebruiken als asset tracking technologie in de bouwindustrie, maar of dit daarvoor geschikt is zal later in deze scriptie besproken worden.

Er zijn twee soorten barcodes namelijk twee dimensionale, ook wel QR Codes genoemd (figuur 2.4), en eendimensionale barcodes zoals op figuur 2.3.

Quick Response codes

QR codes of zoals eerder vermeld ook bekend als tweedimensionale barcodes zijn ook een soort barcode, zoals de naam al aangeeft, maar meer complex. Ze zijn uitgevonden in 1993 door een Japans autobedrijf. Tweedimensionale barcodes kunnen buiten gewoon tekst ook bijvoorbeeld de prijs, voorraadniveaus en zelfs productafbeeldingen opslaan en die informatie dan vrijgeven indien iemand



Figuur (2.4)

Dit is een generieke QR code.

met een compatibel toestel zoals een smartphone de code scant.

QR is een afkorting voor quick response. Dit soort code wordt gewoonlijk gebruikt voor marketing doeleinden (Rodrigue, [2022](#)) waar ze worden vaak gebruikt om gebruikers om te leiden naar landingspagina's, websites, sociale-mediaprofielen of winkelcoupons. Ze worden de laatste tijd ook vaak gebruikt in hippe restaurants als vervanger van de papieren menukaart. Het ontwerp, de functionaliteit en doeleinden van de QR codes kunnen considerabel verschillen maar deze QR codes vallen meestal in een van de volgende twee categorieën, namelijk statische of dynamische QR codes.

Statische QR codes zijn uitstekend voor het opslaan van vaste of gevoelige informatie, zoals identificatienummers van bepaalde zaken of toegangscode's. Dit zou dus ideaal zijn voor bijvoorbeeld identificatienummers van activa die traceerbaar moeten zijn aangezien deze informatie niet regelmatig moet bijgewerkt worden.

Dynamische QR codes daarentegen laten toe de scanbare informatie zonder limiet bij te werken. Dit is mogelijk aangezien de informatie niet in de code ingebakken zit, in plaats daarvan leidt de code de persoon die de code scant om naar een specifieke URL die altijd aangepast kan worden. Een mooie toepassing hiervan is de

eerder besproken restaurantmenu.

De werking van dit soort barcode is net zoals de mogelijke functionaliteiten iets complexer maar nog steeds hetzelfde principe als dat van een normale barcode. Een QR code bestaat uit drie grotere vierkanten en een patroon van zwarte en witte blokjes. Dit patroon is uniek per code en bevat de informatie die door te scannen, wat maar enkele seconden duurt, met een compatibel toestel leesbaar wordt. Zo goed als alle smartphones kunnen QR codes standaard scannen met behulp van de camera app en indien dit niet het geval is zijn er meer dan genoeg apps die dit mogelijk maken. De drie grotere blokjes hebben als functie de oriëntatie van de code weer te geven. Hierdoor kunnen scanners op de correcte manier de code scannen.

2.0.2. Bluetooth Low Energy

Bluetooth Low Energy, ook wel Bluetooth Smart genoemd, is een wireless personal area network (PAN) dat deel uitmaakt van de Bluetooth 4.0 standaard, ontworpen en ontwikkeld door de Bluetooth Special Interest Group (SIG). Dit is het non-profit normalisatie-instituut dat toezicht houdt op de ontwikkeling van Bluetooth standaarden en het beheer van licenties van de Bluetooth-technologieën en -handelsmerken aan fabrikanten.

BLE zendt gegevens uit via 40 kanalen in de 2.4GHz ISM-frequentieband (Kumbhar, 2017). Dit is een gedeelte van het radiospectrum, gereserveerd voor industriële (Industrial), wetenschappelijke (Scientific) en medische (Medical) doeleinden zoals microgolven, medische apparatuur, procesverwarming en soorten elektrolampen. De laatste jaren zijn er ook draadloze communicatie toestellen geproduceerd die ook deze banden kunnen gebruiken zonder storing te veroorzaken voor bestaande apparaten die gebruik maken van de ISM-banden, zoals BLE.

Vergeleken met Bluetooth Classic, ondersteunt Bluetooth Low Energy meerdere communicatietopologieën, namelijk point-to-point, mesh en broadcast terwijl Bluetooth Classic enkel point-to-point ondersteunt. Door de mesh topologie kunnen er grootschalige en betrouwbare netwerken gebouwd worden tussen verschillende toestellen. Hoewel Bluetooth vroeger meer bekend stond voor het uitwisselen van gegevens tussen toestellen wordt het tegenwoordig ook vaak gebruikt voor het positioneren van apparaten. Dit wordt gedaan aan de hand van een paar concepten.

Real-Time Locating System

Een Real-Time Locating System heeft als hoofddoel het identificeren en real-time de positie of hoek van bepaalde objecten te kunnen bepalen (Lehtimäki, 2018), in dit geval gebruik makend van radio golven maar nog mogelijkheden zijn infrarood

of ultrasound. Dit is meestal in een gebouw of een ander afgebakend gebied. Dit is van toepassing op bijvoorbeeld het bepalen van de locatie van assets of mensen en nog zeer veel IoT (Internet of Things) toepassingen.

Angle of Arrival

Bluetooth maakt gebruik van twee verschillende methoden om de locatie, specifiek de afstand en richting van een Bluetooth Low Energy signaal te bepalen. Angle of Arrival is hier een van. In deze methode zendt een apparaat, zoals een asset tag met behulp van een antenne een signaal uit. Deze wordt opgevangen door een ontvangend apparaat die over een reeks antennes beschikt. Hierdoor kan de ontvanger gegevens verzamelen, waarmee de richting van het signaal berekend kan worden (zoals te zien is op figuur 2.6). Theoretisch gezien zullen de ontvangende reeks antennes faseverschillen zien door de verschillende afstanden tot de zender, maar dit is net zoals de meeste zaken in de praktijk niet zo simpel.

Angle of Departure

Het fundamentele idee van Angle of Departure is hetzelfde als deze van Angle of Arrival, maar nu zijn de rollen omgedraaid. Het apparaat dat een signaal ontvangt, heeft maar een antenne en hetgeen dat de data verzendt, heeft er meerdere. Dit kan u zien op figuur 2.5 waarbij TX de zender is en RX de ontvanger. Bij Angle of Departure berekent het ontvangende apparaat zelf zijn locatie aan de hand van de verschillende antennes van het zendende apparaat en hun posities.

Hier kunnen veel combinaties in gemaakt worden en met behulp van de Received Signal Strength Indicator (RSSI) zijn er nog eens extra mogelijkheden.

Received Signal Strength Indicator

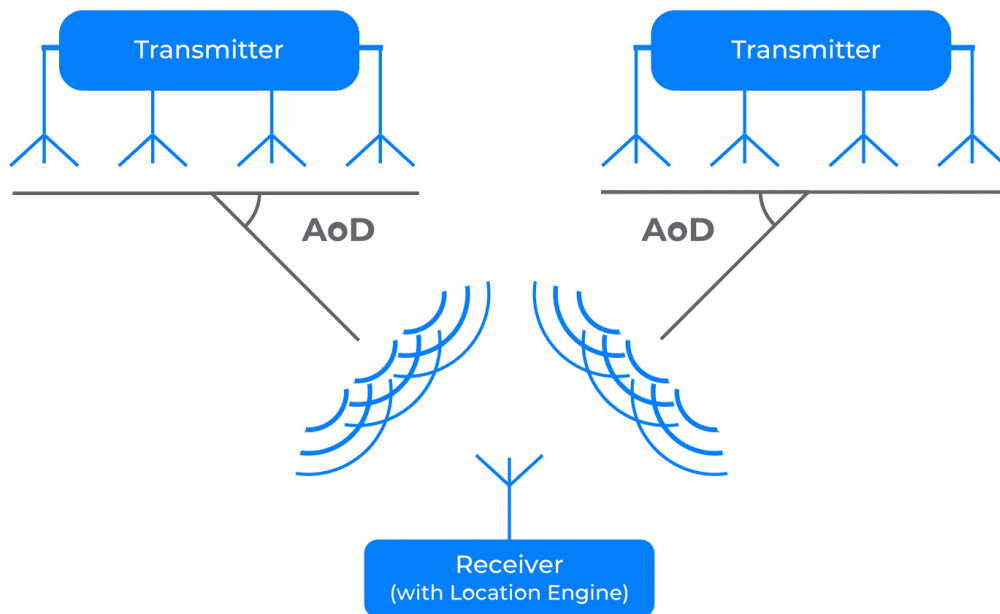
De Received Signal Strength Indicator (RSSI) geeft het signaalvermogen aan de ontvangende kant weer (M.I. e.a., 2015). Dit kan gebruikt worden om de afstand tussen bijvoorbeeld twee apparaten te bepalen.

Security

Een zeer belangrijke eigenschap van een technologie die waardevolle activa moet kunnen traceren is beveiliging. Hoe veilig is het gebruik van Bluetooth Low Energy voor asset tracking doeleinden nu eigenlijk? Op een bouwwerf staat veel materiaal met enorme waarde zoals machines, voertuigen en ander kostbaar werkmateriaal. Het zou niet interessant zijn als onbevoegden zomaar waardevol materiaal zouden opsporen.

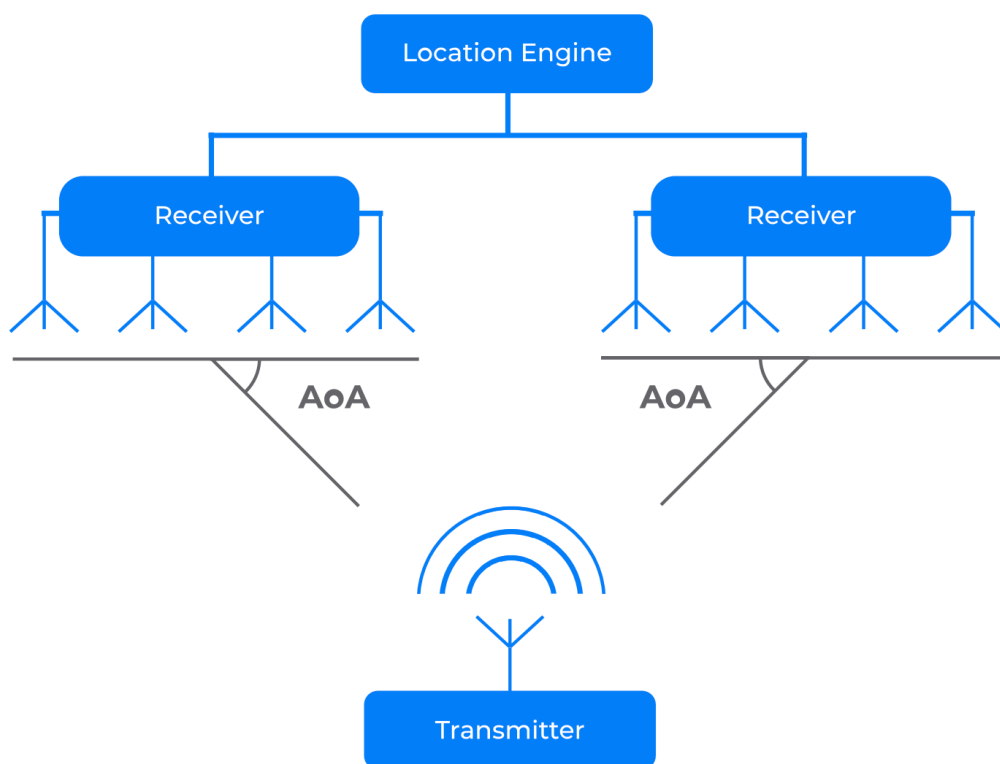
Bluetooth Low Energy tags en beacons hebben maar een beperkte functionaliteit. Het enigste verschil tussen de twee is dat tags verplaatsbaar zijn en beacons meestal stationair zijn, maar ze hebben dezelfde functionaliteit namelijk zijn uniek

Angle of Departure (AoD) Method



Figuur (2.5)
Angle of Departure

Angle of Arrival (AoA) Method



Figuur (2.6)
Angle of Arrival

identificatienummer met een vast interval uitzenden via radiofrequentie. Afhankelijk van dit interval kan die tag of beacon dit meerdere jaren doen zonder het vervangen van de batterij. Aangezien dit gebeurt door middel van de reeds eerder besproken broadcast modus (Sevier & Tekeoglu, 2019) kan ieder apparaat die luistert naar Bluetooth Low Energy signalen, door bijvoorbeeld gebruikt te maken van een simpele BLE scanner app van de App of Play Store, dit oppikken.

Dit is een nadelige situatie maar onvermijdelijk in het geval van Bluetooth Low Energy aangezien dit nu eenmaal de manier is waarop de Bluetooth protocol opzettelijk ontworpen is. Indien we kijken naar andere technologieën zoals GPS of RFID zien we wel een verschil.

In het geval van RFID kunnen we een gelijkaardige conclusie maken. RFID tags zijn net zoals BLE tags vrij “dom” (Juels, 2005). In de zin dat bij RFID iedereen met een RFID scanner een tag kan scannen en data kan terugkrijgen zonder authenticatie. Dit is een minder groot probleem indien de teruggegeven data, meestal een ID, willekeurig is en geen persoonlijke data meegeeft. Het nadeel hiervan is net zoals bij BLE tags dat iedereen met de juiste apparatuur, in dit geval een RFID scanner, tags kan opsporen en uitlezen.

GPS heeft dit probleem niet. Een GPS tracker die gemonteerd zit in een voertuig, op een machine of een ander voorwerp heeft een simkaart. Met behulp van deze kaart kan de GPS tracker zijn locatie en andere data rechtstreeks via het mobiel internet naar de servers sturen van het bedrijf waarvan de trackers aangekocht geweest zijn. Die servers zorgen dan dat de correcte data bij de juiste klanten terechtkomt indien zij inloggen in hun accounts.

Barcode en QR code hoeven vermeld te worden op vlak van security aangezien je die eerst manueel moet zoeken voor de code gescand kan worden.

2.0.3. Smartphones

Vandaag de dag zijn zo goed als alle smartphones BLE-compatibel. Dit wil zeggen dat deze probleemloos kunnen communiceren met zaken als smartwatches, headphones, fitness trackers en vooral in het geval van dit onderzoek belangrijk, beacons. Bluetooth Low Energy wordt heel vaak gebruikt voor advertenties te lanceren op smartphones indien een persoon dicht bij een voorwerp loopt. Bijvoorbeeld iemand wandelt voorbij een laptop die net uitgekomen is met de app van die bepaalde winkel geïnstalleerd op zijn smartphone. In dit geval kan een BLE beacon geplaatst zijn in de buurt die continu signalen uitzend over die bepaalde laptop zodat mensen met de app daar reclame over kunnen ontvangen.

Device	First supported version	Current version when writing
iOS	iOS 5 en later	16.1
Android	Android 4.3 en later	13
Windows Phone	Windows Phone 8.1 and later	8.1
Windows	Windows 8 and later	11
macOS	10.10 and later	13
Linux	Linux 3.4 and later	6.1.1

Tabel 2.1: Een overzicht van de populairste besturingssystemen en vanaf wanneer BLE ondersteunt werd

Bluetooth Low Energy wordt door zeer veel apparaten standaard ondersteund zoals beschreven staat in tabel 2.1. In deze tabel wordt weergegeven vanaf wanneer Bluetooth Low Energy ondersteund werd per besturingssysteem.

Zoals de tabel weergeeft wordt Bluetooth Low Energy reeds een lange tijd ondersteund. De laatste versie van iOS, Android, Windows Phone, Windows, macOS en Linux is op het moment van schrijven (december 2022) respectievelijk 16.1, 13, 8.1, 11, 13 en 6.1.1. Bijvoorbeeld voor Android 4.3 was de releasedatum 9 juli 2012. Dit is al meer dan tien jaar geleden dus ook al is Bluetooth Low Energy een vrij recente technologie, is deze tegelijkertijd ook al zeer matuur.

3

Methodologie

Zoals eerder vermeld zal, dit onderzoek zich focussen op het voorstel dat Bluetooth Low Energy een optimale oplossing is voor asset tracking in de bouwindustrie. Tegenwoordig worden daar vooral andere technologieën voor gebruikt. BLE zit daar reeds tussen, maar in veel mindere mate. In dit gedeelte van de scriptie zal er een requirements-analyse uitgevoerd worden waarin alle functionele en niet-functionele vereisten uitgezocht zullen worden. Vervolgens zal er een long en short list opgesteld worden waarin alle technologieën, die vandaag de dag voornamelijk gebruikt worden, aan bod zullen komen, vergeleken en gefilterd zullen worden op geschiktheid. Hierin zal ook een grondige beschrijving aanwezig zijn van alle voor- en nadelen van BLE. Ook bestaat dit deel uit een toelichting van alle geschikte protocols, software en hardware. Op basis hiervan zal er een experimenteel onderzoek plaatsvinden aan de hand van een zelfontwikkelde Android-applicatie.

3.0.1. Requirements-analyse

Om een correcte vergelijking te maken tussen de meest frequent voorkomende technologieën die gebruikt worden om zaken als machines, voertuigen, werkmateriaal of personeel te traceren op een bouwterrein moet er enkele functionele en niet-functionele vereisten opgesteld worden. Deze zullen de beslissingsfactoren zijn waarom een bepaalde technologie boven een ander wordt verkozen. Aan de hand van deze factoren zal de hierna opgestelde long list geoptimaliseerd worden naar een short list waarin enkel de beste kandidaten nog aanwezig zijn.

Voor functionele vereisten gaan we kijken naar zaken die definiëren wat het systeem moet doen om aan de behoeften en verwachtingen van de gebruiker te voldoen. Zaken die hier onder ressorteren zijn bijvoorbeeld het kunnen traceren van een bepaald activa binnen een bepaalde voorafbepaalde radius en een liefst zo klein mogelijke foutmarge hebben tussen de locatie in werkelijkheid en degene

aangegeven op de gebruikte software. Dit laatste, ook wel traceernauwkeurigheid genoemd, is een interessant gegeven om te vergelijken aangezien bepaalde technologieën bekend staan om een accuratere plaatsbepaling te hebben dan andere.

Voor niet-functionele vereisten gaan we kijken naar zaken die de werking van een systeem kunnen beoordelen, in plaats van specifiek gedrag. Deze eisen staan tegenover de functionele eisen, die hierboven beschreven staan, die specifiek gedrag of functies definiëren. Vereisten die hier ressorteren zijn zaken als initiële en operationele kosten, beveiliging, installatiegemak en het onderhoud van hardware.

3.0.2. Long list

De meest frequent voorkomende technologieën om activa te traceren op een bouw-
werf zijn in de literatuurstudie van deze scriptie reeds opgelijst en beschreven ge-
weest. In dit gedeelte van de scriptie zullen deze technologieën met elkaar verge-
leken worden aan de hand van functionele en niet-functionele vereisten die in de
rubriek hierboven vastgesteld zijn geweest.

De zes reeds beschreven technologieën zijn Global Positioning System (GPS), Radio
Frequentie Identifier (RFID), Ultra-wideband (UWB), Barcode, QR Codes en Blue-
tooth Low Energy (BLE). Deze technologieën zullen met elkaar vergeleken worden
door middel van volgende functionele en niet-functionele criteria:

- Dekking
- Traceernauwkeurigheid
- Kosten
- Beveiliging
- Installatiegemak
- Onderhoud

Uit deze vergelijking zal een kleinere lijst gevormd worden (short list) met de tech-
nologieën die het meest potentieel hebben. Deze zullen dan meer in detail beke-
ken en vergeleken worden welke van de vijf technologieën het meest geschikt is
voor de use-case die deze scriptie behandelt namelijk asset tracking op een bouw-
werf. Hieruit zal een tijdelijke conclusie opgebouwd worden.

Uit tabel 3.1 kunnen verschillende dingen gelezen en afgeleid worden. Uit deze
oppervlakkige verschillen kan al snel een conclusie gemaakt worden welke tech-
nologieën meer geschikt zijn dan anderen, hieruit ontstaat dan een specifiekere
lijst met kandidaten volgens geschiktheid.

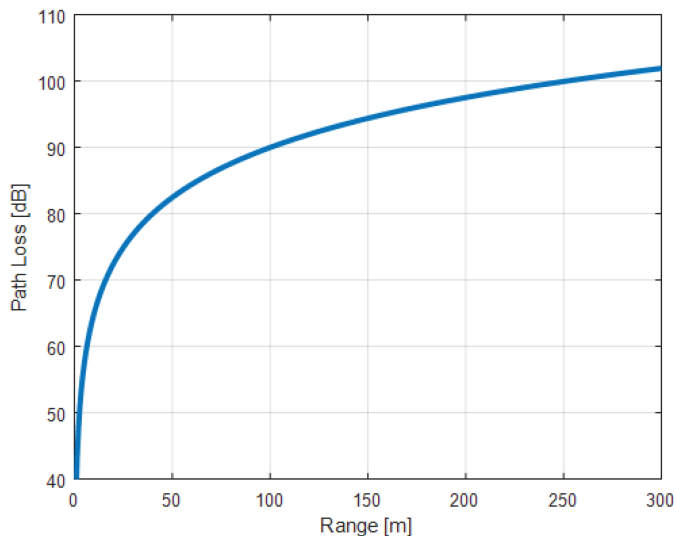
	GPS	RFID	UWB	Barcode	QR Codes	BLE
Werkgebied	∞	<100m	<200m	Nvt	Nvt	< 100m
Nauwkeurigheid	<10m	<10cm	<30cm	Nvt	Nvt	2-3m
Beveiliging						
Installatiekosten	Goedkoop	Duur	Goedkoop	Goedkoop	Goedkoop	Goedkoop
Onderhoudskosten	Duur	Goedkoop	Goedkoop	Goedkoop	Goedkoop	Goedkoop
Tag prijs	€25 tot €50	50 cent tot €100	>€100	Afhankelijk	Gratis - afhankelijk	€5 tot €100
Functie	Identificatie en lokalisatie	Identificatie	Identificatie en lokalisatie	Identificatie	Identificatie	Identificatie en lokalisatie

Tabel 3.1: Een vergelijking van alle mogelijke asset tracking technologieën volgens bepaalde criteria. De meeste data voor deze tabel werd uit een eerder uitgevoerde studie overgenomen, geschreven door Ahmed e.a. (2020).

Het eerste criteria is werkgebied. Dit toont de afstand waarop een tag bereikt kan worden. Als gekeken wordt naar de verschillende technologieën zijn er meteen zaken die opvallen. Beginnend bij GPS waarbij kan geobserveerd worden dat het werkbereik oneindig is. Dit betekent dat een GPS tag van overal ter wereld bereikt kan worden. Dit is logisch aangezien een GPS tag een simkaart bevat die de positie en soms ook andere data doorstuurt naar de servers van de gekozen provider over het mobiel netwerk, zoals reeds uitgelegd is geweest. Wat voor dit criteria nog opvalt is dat er bij barcode en QR code 'niet van toepassing' bijstaat. Vanzelfsprekend aangezien barcode en QR code functioneel niet geschikt zijn voor lokalisatie. Barcodes en QR codes kunnen wel van op een afstand gescand worden, maar dit is enkel mogelijk indien er een directe gezichtslijn is met de barcode of QR code. De afstand wordt uiteindelijk bepaald door de resolutie van de barcode of QR code. Als gekeken wordt naar de overige technologieën kan geobserveerd worden dat RFID en BLE gelijk staan en dat UWB het grootste werkgebied heeft. Deze waarden zijn zeker niet vast en kunnen veel afwijken. Dit is data verzameld door Roberts (2006) en wijkt voor RFID soms honderden meters af van andere data op het internet. Het werkgebied van technologieën als RFID, UWB of BLE hangt dus volledig af van het soort tag.

RFID heeft twee soorten tags, namelijk actief en passieve tags. Actieve tags hebben een externe energiebron, meestal een batterij. Dit betekent dat actieve tags van veel verder gelezen kunnen worden. Passieve tags halen hun vermogen uit de transmissie van de lezer via inductieve koppeling (Roberts, 2006). De passieve tags reageren dan op dat signaal. Inductieve koppeling vereist gewoonlijk dat het signaal van redelijk dichtbij verstuurd wordt. Actieve tags langs de andere kant communiceren gewoonlijk via propagatiekoppeling en reageren op de transmissie van de lezer door gebruik te maken van intern vermogen, zoals eerder vermeld.

Net zoals bij RFID is het werkgebied van UWB en BLE tags volledig afhankelijk van het soort tag dat gebruikt wordt. In het geval van BLE en UWB wordt het werkbereik bepaald door de combinatie van chipset, antenne en pad verlies. Pad verlies is de maat waarin vermogen van een radiosignaal uitgedrukt wordt dat verloren gaat onderweg van de zender tot de ontvanger (Tosi e.a., 2017). Het wordt gedefi-

**Figuur (3.1)**

Een grafische representatie van pad verlies, verkregen door vergelijking 3.1 uit (Tosi e.a., 2017)

nieerd als het verschil tussen het vermogen van de zender en de gevoeligheid van de ontvanger, beiden uitgedrukt in dBm (decibel-milliwatts). Het verband tussen pad verlies en afstand (d) wordt in figuur 3.1 weergegeven. De vergelijking is wel alleen maar geldig voor een isotrope antenne en houdt geen rekening met eventuele verliezen, reflectie, ruis of obstakels in de omgeving. Het werkgebied kan door deze factoren drastisch variëren. Dit geldt natuurlijk voor alle technologieën waar radio frequentie aan te pas komt.

$$pathloss = 40 + 25 \times \log(d) \quad (3.1)$$

Onderhoudskosten - beter dan dit kan natuurlijk niet, maar dit komt met een prijskaartje

De laatste criteria is de functie van de technologieën. Aan de hand van dit criteria kan makkelijk bepaald worden wat de mogelijkheden zijn van een bepaalde technologie. Iedere technologie blijkt de mogelijkheid tot identificatie te hebben maar wat voor dit vergelijkend onderzoek belangrijk is, is of de technologie mogelijkheid biedt tot lokalisatie. Als we de technologieën overlopen zien we meteen twee technologieën die eruit springen. Dit zijn barcode en QR code. Bij deze twee is het niet mogelijk om op een of andere manier de locatie van het activa waaraan de code bevestigd is te lokaliseren. Voor de onderzoeksvraag van deze scriptie is het wel van cruciaal belang dat dit mogelijk is en daarom zullen we deze twee technologieën achterwegen laten voor deze vergelijkende studie.

Het tweede criteria is traceernauwkeurigheid. Indien een bouwwerf van kleine oppervlakte is of de te traceren activa dicht bij elkaar staan is het van belang dat deze makkelijk gelokaliseerd kan worden en dat deze activa niet met elkaar verwisseld worden door een slechte traceernauwkeurigheid. Aangezien barcode en QR code niet van op afstand traceerbaar zijn zullen deze vanzelfsprekend niet meegerekend worden. De traceernauwkeurigheid bij deze twee technologieën zal altijd 100% zijn aangezien de activa eerst handmatig gelokaliseerd moet worden voor de code gescand kan worden.

De waarden van de andere technologieën zijn vrij verschillend. De technologie die er een beetje uitsteekt is GPS. Dit is geweten dat GPS in het algemeen het minst exact de locatie van iets weergeeft. De afstand kan variëren van een paar meter tot precies. Zo een afwijking kan veroorzaakt worden door verschillende zaken zoals satellietgeometrie, signaal obstructie of atmosferische omstandigheden.

Bij de andere technologieën is er nog maar een technologie dat meer dan een meter afwijkt en dit is BLE. Om de afstand te bepalen tussen een zendende (TX) en een ontvangende (RX) node wordt bij BLE Received Signal Strength Indicator (RSSI) gebruikt. Dit is de reden voor de afwijking bij de traceernauwkeurigheid van BLE. RSSI wordt berekend aan de hand van vergelijking 3.2.

$$RSSI = -10 \times N \times \log(d) + a \quad (3.2)$$

Hierin is N een constante die als één wordt aangenomen, d de afstand in meters tussen de twee apparaten en a het vermogen van de TX op één meter afstand.

3.0.3. Short list

Twee technologieën zijn duidelijk niet geschikt voor asset tracking op een bouwwerf, namelijk barcode en QR code. De reden hiervoor is dat activa waarop een code bevestigd is niet van op afstand gelokaliseerd kan worden. Dit is van cruciaal belang indien men snel activa wil lokaliseren in een complexe en drukke omgeving als een bouwwerf. Indien de overgebleven technologieën nog eens naast elkaar gelegd worden komen we bij tabel 3.2 uit. Hier zijn er wat extra criteria bijgevoegd aangezien de technologieën op specifiekere vlakken met elkaar verschillen die in de praktijk minstens even belangrijk zouden kunnen zijn om de meest geschikte technologie voor asset tracking op een bouwwerf te kiezen. Dit zijn zaken zoals de levensduur van batterijen, energieverbruik en of de technologie compatibel is met smartphones.

smartphone compatibiliteit rfid <https://gadgetfaculty.com/smartphone-rfid-reader-rfid-tag/> uhf is not compatible with nfc

3.0.4. Conclusie vergelijkende studie

Hier zal een conclusie opgesteld worden aan de hand van de vergelijkende studie die uitgevoerd is geweest in de rubriek hierboven. Deze conclusie, samen met de

	GPS	RFID	UWB	BLE
Functie	Identificatie en lokalisatie	Identificatie	Identificatie en lokalisatie	Identificatie en lokalisatie
Werkgebied	∞	<100m	<200m	< 100m
Nauwkeurigheid	<10m	<10cm	<30cm	2-3m
Beveiliging				
Installatiekosten	Goedkoop	Duur	Goedkoop	Goedkoop
Onderhoudskosten	Duur	Goedkoop	Goedkoop	Goedkoop
Tag prijs	€25 tot €50	50 cent tot €100	>€100	€5 tot €100
Batterij	<3 jaar	3-5 jaar	<2 jaar	2-5 jaar
Energieverbruik	Laag	Laag/Hoog	Laag	Laagst
Smartphone compatibiliteit	•		•	•

Tabel 3.2: Een nauwkeurigere vergelijking van verschillende geschikte asset tracking technologieën volgens bepaalde criteria. De data voor deze tabel werd net zoals bij tabel 3.1 uit een eerder uitgevoerde studie overgenomen, geschreven door Ahmed e.a. (2020).

uitkomst van de proof of concept zullen dan de eindconclusie bepalen.

3.0.5. Voordelen van BLE asset tracking

Hier zullen alle voordelen van BLE asset tracking beschreven worden en nog een vergeleken worden met andere technologieën.

3.0.6. Nadelen van BLE asset tracking

Hier zullen alle nadelen van BLE asset tracking beschreven worden en nog een vergeleken worden met andere technologieën.

3.0.7. Toelichting van protocols, hardware en software

In dit gedeelte zal een toelichting van alle bestaande protocols van beacons en tags beschreven worden. Hierbij wordt er gezocht naar de meest geschikte hardware waarbij er nauwkeurig afgewogen moet worden tussen kosten en functionaliteit.

3.0.8. Proof of Concept

4

Conclusie



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.

A.1. Introductie

Bluetooth Low Energy (BLE) is een eenvoudige draadloze netwerktechnologie (Heydon, [2013](#)), onafhankelijk van het klassieke Bluetooth. Het is geoptimaliseerd voor ultra laag energieverbruik en een lagere datacapaciteit. BLE wordt standaard ondersteund door zo goed als alle populaire operating systems zoals iOS, Android, macOS en Windows.

Een technologie zoals deze kan gebruikt worden in diverse sectoren met verschillende toepassingen. Enkele van deze toepassingen zijn bijvoorbeeld access control, blood monitoring en smart watches, maar in deze scriptie zal er gefocust worden op asset tracking op een bouwwerf. Hier rond kunnen verschillende vraagstellingen geformuleerd worden.

In dit onderzoek wordt een proof of concept uitgevoerd om de huidige manier van asset tracking op een bouwwerf te optimaliseren aan de hand van BLE beacons, BLE tags, gateways en compatibele smartphones. Er zal ook een algemene analyse gebeuren van de beveiliging van BLE. Hoewel de beveiligingsfuncties in de loop der jaren opmerkelijk zijn verbeterd, is de BLE-technologie nog steeds vatbaar voor ernstige bedreigingen (Lacava e.a., [2022](#)), waardoor een kloof ontstaat tussen het theoretische standaardontwerp en de uitvoering ervan.

Het doel van dit onderzoek is om een introductie te geven tot de problematiek en waarom dit een verbetering zou kunnen zijn op de huidige manier van asset tracking. Vervolgens volgt er een analyse van wetenschappelijke teksten en artikels, waaruit alle voordelen en nadelen van het gebruik van BLE, in de context van asset

tracking, op een bouwwerf voorkomen. Daaropvolgend wordt er op zoek gegaan naar de meest geschikte protocols, compatibiliteit van software en hardware zoals beacons en gateways. Tot slot wordt een app samengesteld waarmee assets gelokaliseerd en gevisualiseerd kunnen worden, waarna advies over de meest optimale oplossing verleend wordt.

A.2. State-of-the-art

Op een bouwwerf worden vandaag de dag heel wat traceertechnologieën gebruikt (Nasr e.a., [2013](#)), aangezien deze hebben aangetoond efficiënt en betaalbaar te zijn. Enkele hiervan zijn Ultra-Wide Bands (UWB), Radio Frequency Identification Cards (RFID) en Global Positioning Systems (GPS). Real-time assets zoals werkmateriaal, machines en werkpersoneel kunnen aan de hand hiervan getraceerd worden.

Een Bluetooth Low Energy beacon of tag is een simpel toestel dat niet meer hoeft te zijn dan een CPU, radio en batterij. Het is een radio transmitter (Andony, [2022](#)) die BLE signalen verstuurt zodat die geïnterpreteerd kunnen worden door compatibele apps of operating systems binnen een bepaalde afstand. Dit signaal is meestal een uniek ID nummer. Door dit signaal kan ook de locatie van de beacon of tag bepaald worden door de ontvanger. Hier speelt RSSI (Subhan e.a., [2019](#)) een belangrijke rol. Als gevolg van ruis treden er fluctuaties op in de RSSI, wat leidt tot een fout in de afstandsbepaling, die uiteindelijk invloed nauwkeurigheid van de positiebepaling beïnvloed. BLE tags kunnen bijna op elk voorwerp worden aangebracht, zodat het via Bluetooth kan worden geïdentificeerd en gevolgd. Door het minimale stroomverbruik kunnen deze bovendien langer aanstaan zonder te moeten worden opgeladen. Dit maakt BLE tags ideaal voor het volgen van inventaris of het bewaken van de locatie van waardevolle voorwerpen.

Een mogelijke vraag die kan worden gesteld is waarom BLE nog niet gebruikt wordt voor asset tracking op een bouwwerf en dat is wat in deze scriptie onderzocht wordt.

A.3. Methodologie

Het onderzoek houdt zes fasen in. In deze fasen wordt er een kleine vergelijkende studie uitgevoerd en een Proof of Concept opgesteld.

De eerste fase is een introductie over de problematiek. Dit wordt gerealiseerd door een grondige studie van vakliteratuur, zoals wetenschappelijke teksten of blogs. Hieruit volgt een tekst die alle vereisten aanhaalt voor een optimale oplossing. De geschatte duurtijd van deze fase bedraagt twee weken.

De tweede fase houdt een analyse in van wetenschappelijke teksten, met als resultaat een uitgebreide tekst over de voordelen van BLE asset tracking, ten opzichte van technologieën die vandaag de dag gebruikt worden. Hiervoor is een week genoeg.

De derde fase is opnieuw een beschrijving, maar dan over de valkuilen van BLE asset tracking. Deze fase van het onderzoek brengt alle mogelijke tekortkomingen in kaart. Ook voor deze fase is een week voldoende.

De vierde fase bestaat uit het toelichten van de meest geschikte protocols, compatibiliteit van software en hardware ,zoals beacons en gateways. Hierbij wordt er gezocht naar de meest geschikte hardware waarbij er nauwkeurig afgewogen moet worden tussen kosten en functionaliteit. Vervolgens wordt er een veldonderzoek uitgevoerd om, naargelang de vereisten, de keuze te maken op welke manier de app ontwikkeld zal worden. Tot slot zullen alle beschikbare protocols in kaart gebracht worden. De geschatte duurtijd van deze fase bedraagt drie weken.

De vijfde fase van dit onderzoek bedraagt het ontwikkelen van een applicatie waarmee assets gelokaliseerd en gevisualiseerd kunnen worden. Deze app wordt verwacht in .NET te worden geschreven voor het Android operating system. De geschatte duurtijd van deze fase bedraagt vier weken.

De zesde en laatste fase bevat een verduidelijking van de bekomen resultaten, met als doel te bewijzen dat het voorgestelde concept, asset tracking a.d.h.v. Bluetooth Low Energy, een optimale manier is. De geschatte duurtijd van deze fase bedraagt een week.

A.4. Verwacht resultaat, conclusie

Er wordt verwacht dat Bluetooth Low Energy een zeer optimale keuze is voor asset tracking binnen een bouwwerf. Met een lage kostprijs, makkelijke installatie en nauwkeurige tracering, behoort deze technologie aan de top van rendabele en duurzame mogelijkheden.

De doelgroep van dit onderzoek, namelijk werfleiders of andere leidinggevende functies kunnen op dezelfde manier hun werkmateriaal, personeel en machines traceren, maar dan veel goedkoper, accurater en mogelijks efficiënter.

Bibliografie

- Ahmed, F., Phillips, M., Phillips, S. & Kim, K.-Y. (2020). Comparative Study of Seamless Asset Location and Tracking Technologies. *Procedia Manufacturing*, 51, 1138–1145. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.160>
- Andony, B. (2022, februari 17). *Bluetooth Low Energy (BLE) Construction Uses and Applications*. <https://mycomply.net/info/blog/bluetooth-low-energy-ble/>
- Devlin, G. & McDonnell, K. (2009). Assessing real time GPS asset tracking for timber haulage. *The Open Transportation Journal*, 3(2009), 78–86. https://researchrepository.ucd.ie/bitstream/10197/6101/1/Devlin_TOTJ.pdf
- Griffith, E. (2021, april 29). *How Do Apple AirTags Work? Ultra-Wideband Explained*. <https://www.pcmag.com/how-to/what-is-ultra-wideband-uwbb>
- Heydon, R. (2013). *Bluetooth Low Energy*. Verkregen 5 oktober 2022, van <https://ptgmedia.pearsoncmg.com/images/9780132888363/samplepages/013288836X.pdf>
- Juels, A. (2005). RFID security and privacy: A research survey. *IEEE journal on selected areas in communications*, 24(2), 381–394. <http://www.msccs.mu.edu/~iq/papers/rfid/RFID%20Security%20and%20Privacy%20A%20research%20survey.pdf>
- Kumbhar, A. (2017). Overview of ISM Bands and Software-Defined Radio Experimentation. *Wireless Personal Communications*, 97(3), 3743–3756. <https://doi.org/10.1007/s11277-017-4696-z>
- Lacava, A., Zottola, V., Bonaldo, A., Cuomo, F. & Basagni, S. (2022). Securing Bluetooth Low Energy networking: An overview of security procedures and threats. *Computer Networks*, 211, 108953. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.108953>
- Lehtimäki, S. (2018). Understanding Advanced Bluetooth Angle Estimation Techniques for Real-Time Locationing. <https://www.silabs.com/documents/public/presentations/ew-2018-understanding-advanced-bluetooth-angle-estimation-techniques-for-real-time-locationing.pdf>
- McNeff, J. G. (g.d.). The Global Positioning System. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*. https://dlwqtxts1xzle7.cloudfront.net/33214552/gps1-libre.pdf?1394781812=&response-content-disposition=inline;%20filename=The_Global_Positioning_System.pdf&Expires=1670951514&Signature=TfWOHhEIld4FQGOYdr eFCPq3VIIntXnbavTxgE2-f-VN9ngQwnPXYEaFrwm~-Hlrq~fMpaht~i5luaQ~XAUOjVrgNBaO

BVO~-Pb2OQBiUhI3PQaxSt~DwfGkT2tWlsub-SZDBiGg6BoTlYrVI4QA3zw4xhAiG2evcOUKa
PCDLNNQ__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

- Mezzanotte, P., Palazzi, V., Alimenti, F. & Roselli, L. (2021). Innovative RFID Sensors for Internet of Things Applications. *IEEE Journal of Microwaves*, 1(1), 55–65. <https://doi.org/10.1109/JMW.2020.3035020>
- M.I., J., P., E., R.B., A., I., I., T., S. & M., J. (2015). Review of angle of arrival (AOA) estimations through received signal strength indication (RSSI) for wireless sensors network (WSN). *2015 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT)*, 354–359. <https://doi.org/10.1109/I4CT.2015.7219597>
- Nasr, E., Shehab, T. & Vlad, A. (2013). Tracking Systems in Construction: Applications and Comparisons. <http://ascpro0.ascweb.org/archives/cd/2013/paper/CPGT11002013.pdf>
- Penny, S. (2022, juli 11). 7 Asset Tracking Technologies. <https://www.smatstraffic.com/2022/07/11/7-asset-tracking-technologies/>
- Rahayu, Y., Rahman, T. A., Ngah, R. & Hall, P. S. (2008). Ultra wideband technology and its applications. *2008 5th IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN '08)*. <https://doi.org/10.1109/wocn.2008.4542537>
- Rahman, M. Z. (2012, februari 3). *Global Navigation Satellite Systems: Signal, Theory and Applications* (S. Jin, Red.). InTech. Verkregen 15 december 2022, van <https://pdfs.semanticscholar.org/7e43/54de28c704b061314a79a3e1d51a46c9bb92.pdf#page=254>
- Rankin, S. (2020, januari 27). *How do Barcodes Work? Your Questions, Answered*. <https://www.lightspeedhq.com/blog/how-do-barcodes-work/>
- Roberts, C. M. (2006). Radio frequency identification (RFID). *Computers & Security*, 25(1), 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2005.12.003>
- Rodrigue, E. (2022, september 21). *What is a QR Code + How Does It Work? Everything Marketers Should Know*. <https://blog.hubspot.com/blog/tabid/6307/bid/16088/everything-a-marketer-should-know-about-qr-codes.aspx>
- Sevier, S. & Tekeoglu, A. (2019). Analyzing the security of Bluetooth low energy. *2019 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC)*, 1–5. https://www.researchgate.net/profile/Ali-Tekeoglu/publication/333228988_Analyzing_the_Security_of_Bluetooth_Low_Energy/links/5de01b6a4585159aa4518887/Analyzing-the-Security-of-Bluetooth-Low-Energy.pdf
- Siddiqui, H., Vahdatikhaki, F. & Hammad, A. (2019). Case study on application of wireless ultra-wideband technology for tracking equipment on a congested site. *J. Inf. Technol. Constr.*, 24, 167–187. https://ris.utwente.nl/ws/files/166448084/2019_10_ITcon_Siddiqui.pdf

- Subhan, F., Khan, A., Saleem, S., Ahmed, S., Imran, M., Asghar, Z. & Bangash, J. I. (2019). Experimental analysis of received signals strength in Bluetooth Low Energy (BLE) and its effect on distance and position estimation. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 33(2). <https://doi.org/10.1002/ett.3793>
- Tan, W. C. & Sidhu, M. S. (2022). Review of RFID and IoT integration in supply chain management. *Operations Research Perspectives*, 9, 100229. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2022.100229>
- Tosi, J., Taffoni, F., Santacatterina, M., Sannino, R. & Formica, D. (2017). Performance Evaluation of Bluetooth Low Energy: A Systematic Review. *Sensors*, 17(12), 2898. <https://doi.org/10.3390/s17122898>