

Faculteit Industriële
Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen: elektronica-
ICT

Masterthesis

Design of heat stress sensors for mass deployment in cities

Jayson Gorissen

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektronica-ICT

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Ronald THOELEN

PROMOTOR :

ir. Sacha TAKACS

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen | Agoralaan Gebouw H - Gebouw B | BE 3590 Diepenbeek

Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Agoralaan Gebouw D | BE 3590 Diepenbeek
Universiteit Hasselt | Campus Hasselt | Martelarenlaan 42 | BE 3500 Hasselt



2024
2025

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen: elektronica-
ICT

Masterthesis

Design of heat stress sensors for mass deployment in cities

Jayson Gorissen

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektronica-ICT

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Ronald THOELEN

PROMOTOR :

ir. Sacha TAKACS



KU LEUVEN

Woord vooraf

Het uitvoeren van deze masterproef stelde mij in staat om me te verdiepen in het ontwerpen van hardware voor een LoRa-gebaseerd meetsysteem, inclusief PCB-layout en embedded programming van microcontrollers. Verder heb ik een LoRa-netwerk opgezet, een Python-programma geschreven om de binnenkomende sensorgegevens te verwerken en op te slaan, en een eenvoudige webpagina gebouwd om deze data inzichtelijk te maken. Het was een zeer interessante en aangename ervaring om dit alles te mogen realiseren.

Allereerst gaat mijn dank uit naar mijn promotoren, Prof. Dr. Ir. Ronald Thoelen en Ir. Sacha Takacs, voor hun deskundige begeleiding, stimulerende feedback en voortdurende steun. Hun kritische blik en motiverende woorden hebben in belangrijke mate bijgedragen aan de kwaliteit van dit werk.

Een speciaal woord van dank wil ik richten tot mijn partner Matthias Klatte, die mij regelmatig praktisch heeft geholpen bij diverse testopstellingen, meelas in conceptteksten en waardevolle ideeën aanreikte. Zijn geduld en enthousiasme hebben me erdoorheen gesleept.

Ook ben ik erkentelijk voor de inspiratie en ondersteuning van mijn voormalige leerkrachten Ivan Hoeken, Peter Lenearts en Rik Bosmans. Hun aanmoediging en het geloof in mijn capaciteiten hebben mij destijds de weg gewezen naar dit vakgebied.

Tot slot wil ik mijn verdere familie bedanken voor hun onvoorwaardelijke steun, begrip en interesse gedurende het hele traject. Zonder hun aanmoediging en vertrouwen was dit werk niet mogelijk geweest.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	1
Lijst met tabellen	7
Lijst met figuren	9
Abstract	11
Abstract in English	13
1 Inleiding	15
1.1 Situering	15
1.2 Probleemstelling	15
1.3 Doelstellingen	16
1.3.1 Hoofddoelstelling	16
1.3.2 Deeldoelstellingen	16
1.3.3 SMART-criteria en eisenpakket	17
1.3.4 Beperkingen en randvoorwaarden	18
1.3.5 Onderzoeksvraag	18
1.4 Vooruitblik	19
2 Bronnenstudie	21
2.1 Inleiding	21
2.2 Invloed van stedelijke omgeving op hittestress	21
2.3 Sociale en economische context	22
2.4 Klimaatadaptatie- en mitigatiestrategieën	23
2.5 Casestudies en implementaties in vergelijkbare projecten	24
2.6 Sensoren en meetmethodes voor hittestress	24
2.7 Internet of Things (IoT) in stedelijke omgevingen	26
2.8 Dataverzameling en -transmissie	27
2.9 Data-analyse en modellering	31
2.10 Conclusie	32
3 Materiaal en methoden	33
3.1 Inleiding	33
3.2 LoRa-componenten	33
3.3 Sensoren	34

3.4	Microcontrollers	36
3.5	Extra componenten	36
3.6	Stroommetingen en optimalisaties	37
3.6.1	Softwarematige optimalisaties	37
3.6.2	Hardwarematige optimalisaties	37
4	Resultaten	39
4.1	LoRa-componenten	39
4.1.1	Overzicht werking LoRaWAN	42
4.2	Sensoren	43
4.3	PCB-Ontwerp	43
4.3.1	Microcontroller	43
4.3.2	Werking van de PCB firmware	44
4.3.3	Overige belangrijke componenten	45
4.3.4	Vermogencircuit	46
4.3.5	Ontwerp- en lay-outoverwegingen	48
4.3.6	Stroommetingen en -analyse	50
5	Discussie	53
5.1	LoRa-componenten	53
5.2	Sensoren	54
5.3	PCB-Ontwerp	54
5.3.1	Microcontroller	54
5.3.2	Werking van de PCB firmware	55
5.3.3	Overige belangrijke componenten	55
5.3.4	Vermogencircuit	56
5.3.5	Ontwerp- en lay-outoverwegingen	56
5.3.6	Stroommetingen en verwachte optimalisaties	57
6	Besluit	59
	Literatuurlijst	69
A	Bijlage - LoRa-componenten	71
A.1	Vergelijking van sensor node modules	71
A.2	Vergelijking van LoRa-gateways	72
A.3	LoRaWAN-serveropties	72
A.4	LoRaWAN Application Server	72
B	Bijlage - Sensoren	75
C	Bijlage - Microcontrollers	79
D	Bijlage - Extra componenten	81
E	Bijlage - LoRa-componenten	83
F	Bijlage - Sensoren PCB v1/v2	85

G Bijlage - Microcontoller PCB v1	87
H Bijlage - Overige belangrijke componenten PCB v1	89
I Bijlage - Berekeningen PCB v1	91
J Bijlage - werking firmware PCB v1	93
K Bijlage - Microcontoller PCB v2	95
L Bijlage - Overige belangrijke componenten PCB v2	97

Lijst van tabellen

1.1	Overzicht van de eisen volgens SMART-criteria	17
3.1	Pros en cons van microcontroller-platforms	36
4.1	Overzicht componentkeuze PCB v1 versus v2	45
4.2	Stroomverbruik per component voor en na optimalisatie	50
4.3	Gemeten en gecorrigeerde stroomopbrengst van het MPT15-75-zonnepaneel onder variërende schaduw	52
A.1	Vergelijking van LoRa sensor node modules	71
A.2	Overzicht van de technische specificaties.	72
B.1	Vergelijking temperatuur- en vochtigheidssensoren	75
B.2	Vergelijking temperatuursensoren voor stralingsmetingen	75
B.3	Vergelijking lux-sensoren	76
B.4	Vergelijking GPS-modules	76
B.5	Vergelijking CO ₂ -sensoren	76
B.6	Vergelijking fijnstofsensoren	77
C.1	Vergelijking Arduino-varianten	79
C.2	Vergelijking ESP32-modules	79
C.3	Vergelijking STM32-series	80
C.4	Algemene vergelijking microcontroller-platforms	80
D.1	Vergelijking geheugenopties	81
D.2	Vergelijking Fuel Gauge ICs	81
E.1	Technische specificaties van de Dragino LA66 LoRaWAN Shield	83
E.2	Technische specificaties van de Dragino DLOS8N Gateway	84

Lijst van figuren

2.1	CSS-modulatie	28
2.2	Visualisatie ADR	29
2.3	LoRaWAN Architectuur	30
4.1	VLINDER-dashboard	41
4.2	Resulterende Netwerkarchitectuur	42
4.3	Flowchart werking firmware PCB v1	44
4.4	Links inkomend vermogen van USB-C, rechts de boost-converter	46
4.5	Links inkomend vermogen van zonne-panneel, rechts batterijlader	46
4.6	Opzet Vermogencircuit	47
4.7	Getekende weergave van de bovenlaag (a) en 3D-visualisatie (b) voor PCB v1. . .	48
4.8	Gerealiseerde printplaat voor PCB v1 (10×12 cm).	48
4.9	Getekende weergave van de bovenlaag (a) en 3D-visualisatie (b) voor PCB v2. . .	49
4.10	Stroomverbruik tussen boost-converter en load in PCB v1	50
4.11	Stroomverbruik tussen batterij en boost-converter in PCB v1	51
H.1	Aansluitingsschema Battery Monitor	90
L.1	Aansluitschema Buck-Boost: TPS631010	97
L.2	Aansluitschema Load Switch: FDC6329L	98

Abstract

Stedelijke hitte-eilanden verhogen gezondheidsrisico's, maar realtime data ontbreekt vaak in snel groeiende steden. Conventionele weerstations zijn duur en energie-intensief, dus wordt er een betaalbaar LoRaWAN-sensornetwerk met laag energieverbruik ontwikkeld om temperatuur- en vochtigheidsdata op straatniveau te meten en via een simpel dashboard bijna realtime te visualiseren. Vooral in ontwikkelingslanden met weinig publieke data kunnen planners hiermee snel hittebestrijdingsmaatregelen nemen. De hoofdonderzoeksvraag luidt: Op welke wijze kan een robuust sensorsysteem met een laag energieverbruik worden ontwikkeld en geoptimaliseerd, dat real-time omgevingsparameters meet en rapporteert?

Ten eerste is er een end-to-endnetwerk opgezet met Dragino LA66-sensornodes, een DLOS8N-gateway en het open-source ChirpStack-platform. ChirpStack stuurt meetdata via HTTP POST naar een Python-backend. Het VLINDER-dashboard haalt de gegevens via HTTP GET in JSON-formaat op voor visualisatie. Ten tweede zijn er twee PCB-iteraties geïmplementeerd: versie 1 met een Arduino Nano Every; versie 2 met een ultralow-power STM32L071K8U3-microcontroller.

De tests tonen dat firmwareoptimalisaties het gemiddelde stroomverbruik met 66% reduceren, terwijl LoRa-verbindingen over ≥ 2 km stabiel blijven. Versie 2 belooft verdere verlaging van het verbruik en verbeterde batterijmonitoring. Hiermee levert het voorgestelde systeem een praktische basis voor gerichte adaptatiestrategieën tegen het hitte-eilandeffect.

Abstract in English

Urban heat islands increase health risks, but real-time data is often lacking in rapidly growing cities. Conventional weather stations are expensive and energy-intensive, so an affordable LoRaWAN sensor network with low energy consumption is being developed to measure street-level temperature and humidity data and visualize it almost in real time via a simple dashboard. Especially in developing countries with little public data, planners can quickly take heat mitigation measures with this. The main research question is: In what way can a robust, low-energy-consumption sensor system be developed and optimized to measure and report real-time environmental parameters?

First, an end-to-end network was set up with Dragino LA66 sensor nodes, a DLOS8N gateway, and the open-source ChirpStack platform. ChirpStack sends measurement data via HTTP POST to a Python backend. The VLINDER dashboard retrieves the data via HTTP GET in JSON format for visualization. Second, two PCB iterations were implemented: version 1 with an Arduino Nano Every; version 2 with an ultralow-power STM32L071K8U3 microcontroller.

The tests show that firmware optimizations reduce average power consumption by 66%, while LoRa connections remain stable over ≥ 2 km. Version 2 promises further reduction in consumption and improved battery monitoring. Thus, the proposed system provides a practical basis for targeted adaptation strategies against the heat island effect.

Hoofdstuk 1

Inleiding

1.1 Situering

In een wereld waarin urbanisatie in een versneld tempo toeneemt, ondervinden vooral stedelijke gebieden in ontwikkelingslanden de gevolgen van een snelgroeiende bevolking, intensieve verstedelijking en de effecten van klimaatverandering. Deze factoren dragen bij aan de vorming van stedelijke hitte-eilanden, waardoor hittegolven in stedelijke gebieden intenser worden en een ernstige impact hebben op de volksgezondheid [1], [2]. Vooral in veel Afrikaanse steden ontbreekt een adequate infrastructuur om de extreme weersomstandigheden te weerstaan, terwijl er een gebrek is aan grootschalig inzetbare technologieën voor het realtime verzamelen en analyseren van data omtrent hittestress [3]. Dit gebrek aan betrouwbare meet- en analysemiddelen belemmert beleidsmakers in hun vermogen om tijdig en effectief te reageren op kritieke momenten: zonder actueel inzicht in temperatuurpieken en bijbehorende gezondheidsrisico's kunnen preventieve maatregelen niet of te laat worden ingepland. Bovendien verhindert de afwezigheid van een solide datagestuurde basis het continu monitoren van hittestress, waardoor het niet mogelijk is om lange termijnstrategieën te ontwikkelen of om interventies op basis van historische trends en prognoses te optimaliseren. Daardoor lopen stedelijke overheden het risico onvoldoende voorbereid te zijn op steeds frequentere en intensere hittestressperiodes, met alle consequenties van dien voor de volksgezondheid en de stedelijke veerkracht.

Dit onderzoek, uitgevoerd in samenwerking met het Vlaamse Instituut technologie en onderzoek (VITO), richt zich op het ontwerpen en optimaliseren van hittestresssensoren die geschikt zijn voor massale toepassing in stedelijke gebieden in ontwikkelingslanden. Het project bouwt voort op een eerdere versie waarin via Arduino meerdere sensortypen werden uitgelezen en heeft als doel de bestaande technologie te verbeteren, onder andere door data op lange afstand te verzenden en door integratie van duurzame energieoplossingen zoals batterijen en zonnepanelen.

1.2 Probleemstelling

In snelgroeiende steden stelt men een toenemende blootstelling aan hittestress vast, mede als gevolg van de verstedelijking, het verdwijnen van groene infrastructuur en de gevolgen van klimaatverandering [4], [5], [6]. Deze hittestress heeft een directe impact op de gezondheid en het welzijn van de bevolking, vooral onder kwetsbare groepen zoals ouderen, kinderen en mensen

met onderliggende aandoeningen [3], [7], [8].

Een belangrijk obstakel voor effectieve actie is het gebrek aan betrouwbare, gedetailleerde en real-time gegevens over de intensiteit en verspreiding van hittestress binnen stedelijke gebieden [9], [10]. Traditionele weerstations en internationale klimaatgegevens hebben vaak een onvoldoende ruimtelijke resolutie om de realiteit op straatniveau te meten [1], [2]. Bovendien zijn bestaande sensortechnologieën vaak te duur of te complex om op grote schaal ingezet te worden in contexten met beperkte middelen [9], [11].

Dit gebrek aan data vormt een probleem voor lokale overheden, stadsplanners, gezondheidsinstanties en onderzoekers die beleid en interventies willen afstemmen op basis van objectieve informatie [4], [5]. Zonder inzicht in waar en wanneer hittestress het ergst is, blijven beleidsmaatregelen oppervlakkig, reactief en inefficiënt [3], [6].

De kern van het probleem is dus tweeledig: enerzijds is er een duidelijke behoefte aan gedetailleerde informatie over stedelijke hittestress, anderzijds ontbreekt het aan toegankelijke technologie om deze informatie te genereren. Indien deze situatie niet verandert, zullen steden slecht uitgerust zijn om zich aan te passen aan toenemende hitteproblemen, met alle sociale, economische en ecologische gevolgen van dien [4], [7].

1.3 Doelstellingen

1.3.1 Hoofddoelstelling

Het hoofddoel van dit project is het ontwerpen, ontwikkelen en testen van een kostenefficiënte en betrouwbare sensorsysteem voor de detectie van hittestress, specifiek geschikt voor grootschalige uitrol in grote of snelgroeïende steden. Deze sensor moet in staat zijn om de relevante omgevingsparameters te meten die bijdragen aan hittestress, zoals temperatuur, relatieve luchtvochtigheid, straling en eventueel windsnelheid, en deze gegevens in real-time via een draadloos netwerk door te sturen naar een centrale database voor analyse.

1.3.2 Deeldoelstellingen

Om deze hoofddoelstelling te bereiken, worden de volgende deeldoelstellingen gedefinieerd:

1. **Literatuurstudie**

In kaart brengen van bestaande systemen en sensortechnologieën die relevant zijn voor het meten van hittestress.

2. **Selectie van parameters en sensoren**

Identificeren van de essentiële fysische parameters voor hittestressdetectie en selectie van geschikte, betaalbare sensoren.

3. **Hardware-ontwerp**

Ontwikkelen van een compact, energie-efficiënt en robuust sensorplatform, inclusief microcontroller, sensoren en energievoorziening.

4. **Dataoverdracht en communicatie**

Integratie van een draadloos communicatieprotocol voor het versturen van meetdata.

5. Softwareontwikkeling

Programmeren van de firmware die sensorwaarden uitleest, verwerkt, en verstuurt met minimale energieconsumptie.

6. Tests

Uitvoeren van labotests om de prestaties, en energieverbruik van het systeem te testen.

7. Analysetool / dashboard

Ontwikkelen van een eenvoudige visualisatietool of dashboard om de verzamelde gegevens te monitoren en analyseren.

8. Validatie

Uitvoeren van veldtesten om de prestaties, betrouwbaarheid systeem te evalueren.

1.3.3 SMART-criteria en eisenpakket

In Tabel 1.1 wordt een overzicht gegeven van de functionele en niet-functionele eisen die voor het meetsysteem zijn opgesteld, gerangschikt naar de SMART-criteria (Specifiek, Meetbaar, Acceptabel, Realistisch en Tijdsgebonden). Hierbij wordt per eis kort toegelicht welke specificatie gehanteerd wordt en waarom deze binnen de gestelde randvoorwaarden valt.

Tabel 1.1: Overzicht van de eisen volgens SMART-criteria

Eis	Specificatie
Meetparameters	Temperatuur, Luchtvochtigheid, CO ₂ , Fijnstof, Lux, Straling en GPS coördinaten
Communicatie	Min. 2 km LoRa bereik in stedelijke omgeving
Energieverbruik	Min. 1 week autonome werking zonder zonlicht
Kosten	Max. €150 per sensor voor productie in bulk
Datafrequentie	Minimaal 1 datapunt per 10 minuten
Betrouwbaarheid	$\geq 95\%$ succesvolle datapakketten bij veldtest
Robuustheid	Bestand tegen stof, regen, hoge temperaturen

Uit Tabel 1.1 blijkt dat de meeteenheid in staat moet zijn om een breed scala aan parameters te registreren (temperatuur, luchtvochtigheid, CO₂, fijnstof, lux, straling en GPS-coördinaten). Voor de communicatie is gekozen voor LoRa met een minimaal bereik van 2 km in stedelijke omgevingen om ook in dichtbebouwde gebieden betrouwbare dataoverdracht te garanderen. Met betrekking tot energieverbruik is vastgesteld dat het systeem ten minste een week autonoom moet kunnen functioneren zonder zonlicht, wat betekent dat er voldoende opslagcapaciteit en energiezuinige componenten nodig zijn. Om de kosten beheersbaar te houden, is €150 per sensor als bovengrens vastgesteld wanneer in bulk geproduceerd wordt. De datafrequentie is minstens een datapunt per uur, zodat langetermijntrends in de meetwaarden inzichtelijk blijven. Betrouwbaarheid is gedefinieerd als een succesratio van minimaal 95% bij het versturen van datapakketten in de veldtest. Tot slot moet het systeem robuust genoeg zijn om bestand te zijn tegen stof, regen en hoge temperaturen, aangezien de sensoren in uiteenlopende (weers)omstandigheden buiten komen te staan.

1.3.4 Beperkingen en randvoorwaarden

Het meetsysteem dient zodanig te worden geconcipieerd dat het onder uiteenlopende en soms extreme weersomstandigheden betrouwbaar blijft functioneren. Hierbij wordt specifiek aandacht besteed aan hitte-, vocht- en stofbestendigheid, zodat de sensoren ook in veeleisende omgevingen accuraat meten.

De energievoorziening van het systeem moet volledig autonoom zijn; in de praktijk betekent dit dat er gebruik wordt gemaakt van energieopslagfaciliteiten die, waar mogelijk, worden aangevuld met zonne-energie om langdurige werking te garanderen zonder fysieke tussenkomst. Communicatie tussen de sensoren en het dataverwerkingsplatform dient plaats te vinden via open standaard protocollen. Op deze wijze wordt zowel de interoperabiliteit met andere systemen gewaarborgd als de flexibiliteit om in de toekomst nieuwe technologieën te integreren. Tevens moet worden voldaan aan alle geldende lokale regelgeving op het gebied van draadloze communicatie; dit omvat onder meer frequentiegebruik en zendvermogens, zodat wettelijke beperkingen niet leiden tot onderbreking van dataverkeer of boetes.

Tot slot dient er bij de plaatsing en het onderhoud van de sensoren expliciet rekening te worden gehouden met veiligheidsaspecten voor zowel personeel als de omgeving. Dit impliceert dat er bij de installatie wordt gelet op risicoarme werkmethoden en dat onderhoudsprocedures zo worden ingericht dat zowel electrocuteer- als valgevaar tot een minimum beperkt blijven.

1.3.5 Onderzoeksvraag

Op basis van de in voorgaande paragrafen geformuleerde SMART-criteria en randvoorwaarden vloeit de centrale onderzoeksvraag voort:

Hoe kan een betaalbare, betrouwbare en energie-efficiënte sensor ontwikkeld worden voor de meting van hittestress in stedelijke contexten, en hoe kunnen deze gegevens efficiënt verzameld en geanalyseerd worden voor grootschalige monitoring?

Deze onderzoeksvraag kan verder opgesplitst worden in de volgende deelvragen. Allereerst moet worden onderzocht welke omgevingsparameters essentieel zijn voor een accurate inschatting van hittestress. Vervolgens dient te worden bepaald welke sensoren de beste balans bieden tussen nauwkeurigheid, energieverbruik en kostprijs. Een derde deelvraag richt zich op de vraag hoe het dataverkeer efficiënt kan verlopen via LoRa in stedelijke omgevingen. Daarnaast wordt gekeken welke vereisten noodzakelijk zijn om een energieonafhankelijke werking van de sensoren te realiseren. Tot slot wordt onderzocht hoe de verzamelde gegevens gevalideerd en gevisualiseerd kunnen worden.

1.4 Vooruitblik

Tot slot volgt in deze thesis een heldere en samenhangende weergave van alle onderzoeksfasen en bijbehorende inzichten. Hoofdstuk 2 biedt een uitgebreid theoretisch kader, waarin de problematiek rond warmtebelasting en de stand van zaken in sensortechnologie kritisch worden geanalyseerd. In hoofdstuk 3 worden de toegepaste materialen en methoden systematisch beschreven. Hoofdstuk 4 presenteert de resultaten van de experimentele opzet en dataverzameling. In hoofdstuk 5, de discussie, worden deze bevindingen beoordeeld, afgewogen ten opzichte van de theoretische verwachtingen en in een bredere wetenschappelijke context geplaatst. Hoofdstuk 6 tenslotte vat de belangrijkste conclusies samen en formuleert aanbevelingen voor vervolgonderzoek en praktische implementatie.

Hoofdstuk 2

Bronnenstudie

2.1 Inleiding

De ontwerpkeuze voor een grootschalig hittestress-monitoringsysteem in stedelijke gebieden vereist een geïntegreerd inzicht in zowel technische, ecologische als maatschappelijke aspecten. In deze bronnenstudie worden daarom acht kernthema's behandeld: de invloed van de stedelijke omgeving, de sociale en economische context, klimaatadaptatie- en mitigatiestrategieën, casestudies van vergelijkbare projecten, sensortechnologie en meetmethoden, IoT-toepassingen in stedelijke netwerken, dataverzameling en -transmissie, en ten slotte data-analyse en modellering. Elk van deze thema's draagt bij aan een beter begrip van de uitdagingen en mogelijkheden die samenhangen met de implementatie van een hittestress-monitoringsysteem in snelgroeiende steden. In de volgende paragrafen wordt per thema ingegaan op de relevante theoretische kaders, actuele onderzoeksresultaten en praktische toepassingen, met een nadruk op de haalbaarheid in stedelijke contexten.

2.2 Invloed van stedelijke omgeving op hittestress

Urban Heat Island-effect: oorzaken, gevolgen, mitigatiestrategieën

Het Urban Heat Island (UHI)-effect ontstaat wanneer stedelijke oppervlakken zoals asfalt en beton met lage albedo zonnestraling absorberen en vasthouden, terwijl natuurlijke vegetatie ontbreekt. Hierdoor liggen lucht- en oppervlaktetemperaturen in stadscentra vaak enkele graden hoger dan in omliggende landelijke gebieden, wat de energiebehoefte voor koeling en de uitstoot van broeikasgassen vergroot. Inwoners worden blootgesteld aan verhoogde thermische belasting, met als mogelijke gevolgen hitteberoerte en -uitputting. Mitigatiestrategieën omvatten het toepassen van hoog-albedo coatings, het uitbreiden van stedelijke begroeiing (groene daken, bomen) en het gebruik van *permeabele* bestrating om verdampingskoeling te bevorderen [12], [13].

Ruimtelijke verdeling van hitte in stedelijke gebieden

Satellietanalyses laten zien dat binnen steden de oppervlak- en luchttemperaturen sterk variëren met landgebruik en vegetatiedekking, waarbij gebieden met lage Normalized Difference Vegetation Index waarden de hoogste oppervlaktetemperaturen hebben. In Baton Rouge bleek 64% van de wijk aanzienlijke UHI-hotspots te zijn, gekoppeld aan verstedelijkte en weinig begroeide

zones [14]. In Fuzhou, China, toonde hot-spotanalyse aan dat industriële en dichtbebouwde woongebieden de grootste warmteclusters vormen, terwijl parken en waterlichamen fungeren als temperatuuroasen [15].

Invloed van bouwmaterialen, architectuur en stedelijke planning op thermisch comfort

Materiaalkeuze beïnvloedt de opslag en afgifte van warmte: beton en baksteen met hoge thermische massa houden warmte lang vast, wat 's nachts tot verhoogde oppervlaktetemperaturen leidt en het comfort vermindert [16]. Architectonische kenmerken zoals de straatkloofaspectverhouding en oriëntatie bepalen schaduwwerking en luchtcirculatie, waarbij goed georiënteerde straatkloven de convectie bevorderen en hittestress kunnen verlagen. Groene daken en gevelgroen dragen door verdamping direct bij aan lokale temperatuurdalingen en verbeteren het microklimaat in dichtbebouwde omgevingen [17], [18]. Tot slot kan de wijdverbreide inzet van airconditioning de buitenomgeving verder opwarmen doordat warmte naar buiten wordt afgegeven, wat de UHI-intensiteit versterkt [19].

2.3 Sociale en economische context

Maatschappelijke impact van hittestress

Hittestress vermindert de fysieke arbeidscapaciteit en veroorzaakt een toename van ziekteverzuim, wat leidt tot aanzienlijke productiviteitsverliezen in de industrie [20]. Daarnaast brengt arbeidsgerelateerde hittestress aanzienlijke financiële lasten met zich mee door medische behandelingen, verminderde werkuren en indirecte economische ontwrichting [21]. Wereldwijd leidt extreme hitte jaarlijks tot tienduizenden doden en legt een onevenredige druk op ouderen, kinderen en buitendienstmedewerkers, wat de gezondheidszorgsystemen belast [22]. In de landbouwsector verschuiven arbeiders hun werkuren naar de nacht om hitte te vermijden, wat echter mentale en fysieke gezondheidsrisico's vergroot en sociaaleconomische routines verstoort [23]. Volgens de Wereldgezondheidsorganisatie (WHO) is hitte de dodelijkste weersgerelateerde oorzaak ter wereld en kan een stijging van 1 °C de mortaliteit door cardiovasculaire aandoeningen doen toenemen [24].

Kostenanalyse van massale sensorimplementatie

Een grondige kostenanalyse van Internet of Things (IoT)-implementaties omvat hardware (sensoren, gateways), software (licenties, cloudservices), connectiviteit en personeelskosten voor installatie en onderhoud [25]. Cloudgebaseerde IoT-platforms voor smart city-diensten vertonen over een periode van tien jaar diverse uitgavenposten, waarbij dataverwerking en beveiliging vaak tot 40% van de totale kosten vertegenwoordigen [26]. Naast initiële investeringen moeten ook terugkerende kosten voor batterijvervanging en kalibratie worden meegenomen in de budgettering [27]. Studies tonen aan dat het inzetten van mobiele sensornodes de Return on Investment (ROI) kan verhogen door bewegingsprofielen en clustering-algoritmes, wat redundantie vermindert en kosten per node verlaagt [28]. Mass-customization-strategieën voor sensordoeleinden resulteren in kostenbesparingen tot 30% vergeleken met traditionele ontwerpaanpakken in intelligente gebouwtoepassingen [29].

Duurzaamheid, onderhoud en sociale acceptatie van sensoroplossingen

Langdurige duurzaamheid van sensornetwerken vraagt om modulaire ontwerpen en lokale onderhoudscapaciteit om interoperabiliteit te waarborgen [30]. Onderzoek toont aan dat IoT-implementaties op zich niet automatisch leiden tot sociale duurzaamheid. Investerings in training en bewustwording zijn nodig om acceptatie en verantwoord gebruik door gebruikers en gemeenten te garanderen [31]. Open-sourceplatforms voor sensordata bevorderen transparantie en betrokkenheid van belanghebbenden, wat de maatschappelijke acceptatie versterkt [32]. Tenslotte kan IoT-technologie, mits juist beheerd, een bijdrage leveren aan de Duurzame Ontwikkelingsdoelen door real-time monitoring van milieu- en sociale indicatoren en het mogelijk maken van snelle interventies [33]

2.4 Klimaatadaptatie- en mitigatiestrategieën

Rol van monitoring bij klimaatadaptatiestrategieën

Monitoring en evaluatie (M&E) vormen de basis van adaptatiebeleid: ze maken het mogelijk om de effectiviteit van maatregelen te meten, leerpunten te genereren en aanpassingen door te voeren [34]. Volgens het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) AR6-rapport is een M&E-framework onmisbaar om adaptatieresultaten te kwantificeren, kwetsbaarheid te verminderen en adaptatielimieten tijdig te signaleren [35]. Het klimaatverdrag (UNFCCC) benadrukt dat adaptatie-acties landelijk en lokaal gestuurd moeten zijn om inclusieve veerkracht op te bouwen [36]. Digitale tweelingen, gevoed door sensor- en remote-sensingdata, bieden een innovatief middel om adaptatiescenario's virtueel te testen en real-time monitoring te integreren in adaptatieplannen [37], [38].

Gebruik van sensorgegevens om beleid en stadsplanning te informeren

Sensor-netwerken en satellietwaarnemingen leveren gedetailleerde data over hitte-eilanden, luchtkwaliteit en microklimaatzones. Door deze data te integreren in stedelijke digitale tweelingen, kunnen planners hitte-hotspots lokaliseren, groenstructuren optimaliseren en aanpassingsmaatregelen zoals waterpartijen of schaduwstructuren gericht inzetten [39]. Crowd-sensing via smartphones en draagbare sensoren maakt gedetailleerde warmtekaarten mogelijk die variatie in hittebelasting op wijkniveau blootleggen [40]. Ook overvliegen of satellietbeelden, gecombineerd met AI-algoritmes, helpen om stedelijke kwetsbaarheidskaarten te actualiseren en zo adaptatiebeleid continu bij te stellen [102]. Ruimtelijke analyses op basis van IoT-data hebben aangetoond dat beleidsinterventies, zoals het aanplanten van bomen en reflecterende bestrating, significante lokale temperatuurdalingen kunnen opleveren [41].

Internationale richtlijnen en normen omtrent hitte-adaptatie (WHO, VN)

De WHO biedt uitgebreide richtlijnen voor hittegolven en gezondheid, waaronder protocollen voor waarschuwingssystemen, vroegtijdige waarschuwing van kwetsbare groepen en multisectorale reactiestrategieën [24], [42]. De UNFCCC-publicatie *Too Hot to Handle* presenteert praktische aanbevelingen voor gemeenten, zoals het aanpassen van openingstijden, witten van daken en gratis openbaar vervoer tijdens hittegolven, om blootstelling te verminderen [43]. Onder de Sendai Framework Monitor worden landen aangemoedigd adaptatiemaatregelen en Disaster Risk Reduction (DRR)-activiteiten te rapporteren aan 38 indicatoren, waaronder hitte-gerelateerde gezondheids-

en infrastructuurrisico's [44], [45]. De UNFCCC's National Adaptation Plan (NAP)-richtlijnen verschaffen landen een stappenplan voor het opstellen van nationale adaptatieprogramma's, met specifieke modules voor hittegolven en stedelijke aanpassing [46].

2.5 Casestudies en implementaties in vergelijkbare projecten

Voorbeelden van reeds uitgevoerde projecten

Smart City Kigali in Rwanda is een voorbeeld waarin Inmarsat een satellietgebaseerd IoT-netwerk implementeerde voor real-time dataverzameling uit uiteenlopende sensoren, inclusief temperatuursensoren en luchtkwaliteitsdetectoren. Data van deze sensoren wordt via IoT-gateways naar clouddashboards gestuurd voor analyse en beleidsvoering in stadsbeheer [47]. AirQo, een project van Makerere University, heeft een netwerk van meer dan 200 low-cost luchtkwaliteitssensoren uitgerold in meerdere Afrikaanse steden, waarmee PM_{2.5}-concentraties in kaart worden gebracht via openbare API's en digitale platforms [48]. In Singapore heeft SPTel een nationaal 'solar-powered' sensornetwerk opgezet waarbij sensorapparatuur draadloos verbonden is met een IoT-as-a-service platform, waardoor grootschalige zakelijke en overheidsapplicaties realtime data ontvangen via een beveiligde infrastructuur [49].

Resultaten van vergelijkbare sensorprojecten

De inzet van satellietconnectiviteit in Kigali leverde constante dekking, maar bleek relatief kostbaar en vatbaar voor vertragingen bij bewolking, wat leidde tot optimalisaties in backhaulstrategieën [47]. AirQo's kalibratiecampagnes met referentiemonitoren toonden aan dat low-cost sensoren initieel neigden naar overschatting van PM_{2.5}-waarden onder hoge luchtvochtigheid; dit werd gecorrigeerd met machine-learning gebaseerde kalibratiemodellen, wat leidde tot betrouwbaardere maandelijkse trendanalyses die beleidsmaatregelen informeerden [48].

Lessons learned uit eerdere projecten

Kalibratie en continue validatie tegen referentie-instrumenten zijn onmisbaar om de dataschaarste en bias van low-cost sensortechnologie te compenseren [50]. Kapitaalinvesteringen in educatie en capaciteitsopbouw bevorderen lokaal onderhoud en betrouwbaar netwerkbeheer; AirQo's samenwerking met Zindi en universiteiten illustreert hoe training de betrouwbaarheid en schaalbaarheid van sensornetwerken ondersteunt [48]. Duidelijke technische standaarden zijn cruciaal voor interoperabiliteit en brede adoptie van IoT-sensorinfrastructuren [51].

2.6 Sensoren en meetmethodes voor hittestress

Sensoren voor hittestressmeting

Hittestress wordt doorgaans gekwantificeerd met behulp van de Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT)-index, waarin de gecombineerde effecten van luchttemperatuur, relatieve luchtvochtigheid, windsnelheid en stralingsbelasting worden samengevat. De droge-luchttemperatuur (T_{db}) wordt gemeten met standaard temperatuursensoren en vormt de basis voor de bepaling van de thermische belasting. Voor de natte-luchttemperatuur (T_{wb}), die zowel de luchttemperatuur

als de relatieve luchtvochtigheid incorporeert en de verdampingseffecten weerspiegelt, worden vochtigheidssensoren in combinatie met verzadigde natte-luchttemperatuursensoren ingezet. De windsnelheid, die van invloed is op de convectieve warmteoverdracht en daarmee op zowel T_{wb} als de eindwaarde van de WBGT-index, wordt bepaald met behulp van ultrasone of mechanische anemometers. Tenslotte wordt de stralingsbelasting, die in de WBGT wordt weergegeven als de stralingsboltemperatuur (T_g), gemeten met een zwarte boltemperatuursensor die de som van directe zoninstraling en diffuse stralingsinvloeden registreert [52]. Deze vier parameters kunnen vervolgens worden geïntegreerd in de gebruikelijke WBGT-formule:

$$WBGT = 0,7 T_{wb} + 0,2 T_g + 0,1 T_{db} \quad (2.1)$$

Indien niet alle fysieke sensoren ter plaatse beschikbaar zijn, kunnen de ontbrekende variabelen zoals windsnelheid of stralingsbelasting met behulp van lokaal beschikbare gegevens of historische klimaatinformatie worden gereconstrueerd om de WBGT waarde alsnog te berekenen en daarmee hittestress in stedelijke contexten te monitoren.

Een praktijkvoorbeeld is het gebruik van de Kestrel 5400 Heat Stress Tracker, die temperatuur, vochtigheid, windsnelheid en stralingswarmte meet om de WBGT te berekenen [53]. Tijdens hete dagen, wanneer het risico op hittestress het grootst is, blijft de windsnelheid doorgaans laag en relatief constant; in die situatie kan deze parameter betrouwbaar worden overgenomen van een nabijgelegen WHO-station, dat zich meestal bij een luchthaven bevindt.

Betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van low-cost sensoren

Low-cost sensoren bieden een kosteneffectieve oplossing voor grootschalige monitoring, maar hun nauwkeurigheid kan variëren. Zo introduceerde Sulzer et al. een draagbaar Mobile Biometeorological System (MoBiMet) op basis van een Raspberry Pi en diverse low-cost sensoren. In deze studie werden de prestaties van deze sensoren vergeleken met commerciële referentiesensoren om hun nauwkeurigheid te evalueren [54].

Een vergelijkbaar onderzoek richtte zich op low-cost sensoren voor luchtkwaliteitsmonitoring en benadrukte in het bijzonder het belang van systematische kalibratieprocedures om de meetresultaten te verbeteren en te valideren [55].

Deze bevindingen illustreren dat, hoewel low-cost sensoren een waardevol instrument kunnen vormen voor uitgebreide en gedistribueerde dataverzameling, grondige kalibratie en validatie onontbeerlijk zijn om de betrouwbaarheid van de verkregen meetwaarden te waarborgen.

Methoden om thermisch comfort en hittestress te kwantificeren

Er zijn verschillende methodes ontwikkeld om thermisch comfort en hittestress te evalueren:

- **Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT):** Deze index combineert de effecten van temperatuur, vochtigheid, stralingswarmte en wind om de hittestress te beoordelen. De WBGT wordt berekend met behulp van een droge bolthermometer, een natte bolthermometer en een zwarte bolthermometer [56].
- **Universal Thermal Climate Index (UTCI):** De UTCI is ontwikkeld om de thermische stress op mensen in verschillende klimaten te evalueren. Het houdt rekening met temperatuur, vochtigheid, wind en stralingswarmte en wordt beschouwd als een geavanceerdere

maatstaf voor thermisch comfort [57].

- **Heat Index (HI):** Deze index combineert temperatuur en relatieve luchtvochtigheid om aan te geven hoe warm het aanvoelt. Het is een eenvoudige maatstaf die veel wordt gebruikt in weersvoorspellingen.
- **Physiologically Equivalent Temperature (PET):** De PET houdt rekening met de thermofysiologische reacties van het menselijk lichaam en wordt gebruikt om het thermisch comfort in stedelijke omgevingen te beoordelen.

Een studie vergeleek de UTCI met andere thermische indices zoals Short-term Effective Temperature (SET), PET, Predicted Mean Vote (PMV), Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) en WBGT, en benadrukte de effectiviteit van UTCI in het vastleggen van variaties in omgevingsfactoren zoals temperatuur, vochtigheid, windsnelheid en zonnestraling [58].

2.7 Internet of Things (IoT) in stedelijke omgevingen

Toepassingen van IoT voor grootschalige monitoring

In moderne slimme steden worden IoT-netwerken ingezet om een groot scala aan stedelijke diensten te monitoren en aan te sturen, van luchtkwaliteit en verkeersstromen tot afvalbeheer en openbare verlichting. Een uitgebreide enquête toont hoe IoT-architecturen generiek zijn opgebouwd uit sensornetwerken, netwerkgateways, edge- en cloudverwerking, en dataplatforms voor visualisatie en analyse. Deze opzet verbetert servicekwaliteit en operationele efficiëntie in sectoren zoals mobiliteit, energie en veiligheid [59], [60]. Case studies, bijvoorbeeld het Newcastle Urban Observatory, laten zien hoe zulke systemen bij city-wide uitrol meer dan 3600 sensoren en dagelijks miljoenen metingen kunnen verwerken, met realtime dashboards voor beleidsmakers en burgers [60].

Energiebeheer van sensoren en systemen op zonnen-energie

Duurzame energievoorziening is essentieel voor langdurige werking van sensorknooppunten. IoT-gebaseerde zonne-energiesystemen combineren zonne-panelen, Maximum power point tracking (MPPT)-omvormers en energieopslagsystemen om continu data te verzamelen en door te sturen naar cloudplatforms via Long Range Wide Area Network (LoRaWAN), Narrowband (NB)-IoT of Wi-Fi. Onderzoek wijst uit dat dergelijke smart solar energy management systems via IoT de prestaties van zonne-installaties kunnen voorspellen en de kwaliteit van de netaansluiting verbeteren, terwijl lokaal de paneeltemperatuur en outputspanning worden bewaakt [61]. Daarnaast kan IoT-monitoring het energieverbruik van sensoren optimaliseren door dynamische aanpassing van zendintervallen en deep-sleepcycli, wat de totale systeemkosten en CO₂-voetafdruk aanzienlijk verlaagt [62].

Energiezuinige microcontrollers

Voor batterij- en zonne-gevoede IoT-apparaten zijn ultra-low-power microcontrollers onmisbaar. Zo biedt de STM32L-serie van STMicroelectronics, met name de STM32L4-reeks gebaseerd op een ARM Cortex-M4 core, uitstekende energie-efficiëntie. Bij maximale werkfrequenties bedraagt het actieve verbruik ongeveer 90 $\mu\text{A}/\text{MHz}$, terwijl in deep-sleep-modus de stroomconsumptie kan dalen tot circa 120 nA. Deze microcontrollers beschikken verder over meerdere low-power

modi, hardwareversleuteling en speciale low-power clocks, waardoor ze bij uitstek geschikt zijn voor toepassingen waarbij een combinatie van lange batterijlevensduur en betrouwbare prestaties vereist is [63].

Een ander voorbeeld is de ESP32, die eveneens verschillende slaapmodi ondersteunt. In deep-sleep-modus ligt het stroomverbruik rond de 150 μ A, terwijl geoptimaliseerde wake-up-mogelijkheden en geïntegreerde Real-time clock (RTC)-timers ontwikkelaars in staat stellen zendcycli en verwerkingstijden precies af te stemmen op de eisen van de applicatie. Hierdoor kan het energieverbruik drastisch worden verminderd zonder dat de functionaliteit of reactietijd van het apparaat in gevaar komt, wat de ESP32 zeer geschikt maakt voor energieonafhankelijke monitoringtoepassingen [64].

Batterijduur maximaliseren door energiebeheer en low-power-design

Het verlengen van de operationele levensduur van IoT-sensornodes vereist een mix van hardware- en softwarestrategieën, zoals deep-sleep modi, dynamische aanpassing van zendintervallen en energiezuinige schakelingen [65]. Power-saving mode in Low Power Wide Area Network (LPWAN)-protocollen stelt apparaten in staat zowel luister- als zendcycli in een sessie af te handelen, waardoor wake-up overhead drastisch wordt verminderd en de batterijduur toeneemt [66]. Bovendien maakt energy-aware systeemontwerp, in combinatie met zonne-energie en supercapacitors, volledig batterijloze LPWAN-nodes mogelijk, wat onderhoudsarme, zelfvoorzienende netwerken ondersteunt [67].

Gebruik van zonnepanelen, batterijen en supercapacitors

Zonne-energie aangedreven IoT-sensorknooppunten combineren fotonvoltaïsche panelen met oplaadbare batterijen of supercapacitors om continuïteit van datacollectie te waarborgen zonder frequente vervanging van energieopslag [68], [69]. Herlaadbare lithium-ionbatterijen blijven de meest toegepaste opslagmedia vanwege hun hoge energiedichtheid. Supercapacitors hebben daarentegen een zeer hoge cyclische levensduur, snelle laadtijden en een breed bedrijfstemperatuurbereik, wat ze uitermate geschikt maakt voor sensortoepassingen met piekbelastingen [68], [70].

2.8 Dataverzameling en -transmissie

LoRa

Long Range (LoRa) is een draadloze modulatie-technologie specifiek ontworpen voor IoT-toepassingen waarbij lange afstand, laag energieverbruik en lage datarates centraal staan. Het vormt de fysieke laag (PHY) van een LPWAN en is bedoeld om sensorgegevens over afstanden van enkele kilometers betrouwbaar te transporteren, terwijl apparaten jaren op een kleine batterij kunnen blijven werken [71].

In een LoRa-netwerk zenden eindapparaten (nodes) hun data enkelvoudig uit naar een of meerdere gateways, die de signalen op hun beurt via een backbone, meestal via Ethernet, 3G/4G of glasvezel, doorsturen naar een netwerkserver. De rol van LoRa beperkt zich dus tot de luchtinterface: wie “LoRa” zegt, bedoelt de semtech-patent-gebaseerde chirp spread spectrum (CSS)-modulatie, niet het volledige netwerkprotocol. Voor het volledige IoT-stack gebruikt men

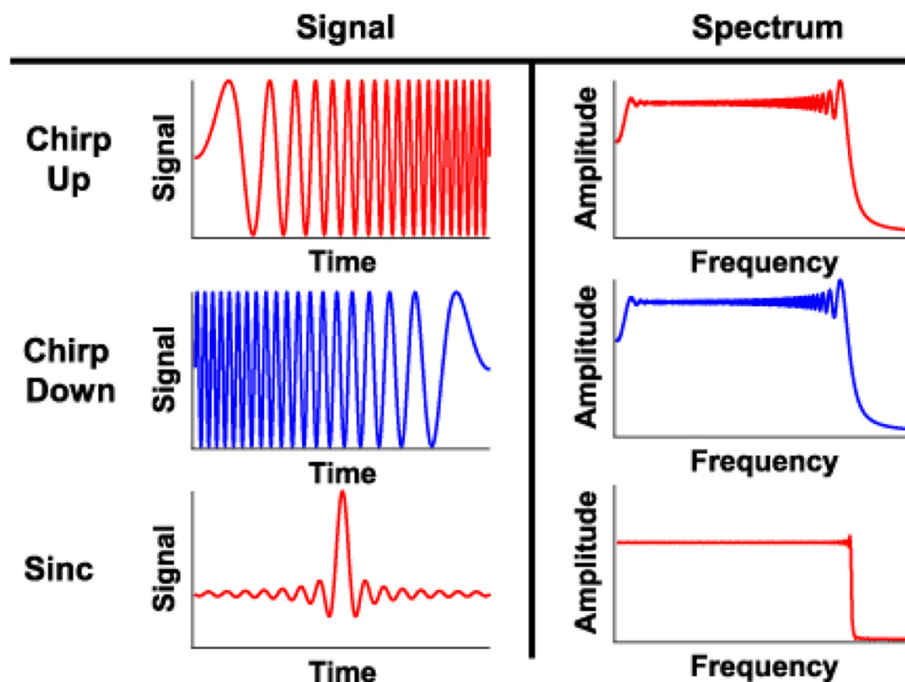
doorgaans het bovenliggende LoRaWAN-protocol, dat zaken als device-authenticatie, encryptie en mediumtoegang regelt [71].

Typische toepassingen van LoRa zijn slimme meetsystemen, stadsbreed sensornetwerk voor luchtkwaliteit of parkeerbeheer, landbouwmonitoring en asset-tracking. Dankzij de licentievrije sub-GHz banden is er geen vergunning nodig, maar moet je je houden aan regelgeving omtrent zendvermogen en duty-cycle [71].

Met deze technologie kunnen dus wijdverspreide, zelfvoorzienende IoT-netwerken opgezet worden. Ideaal voor onderzoek en prototyping in zowel stedelijke als landelijke omgevingen.

Werking van LoRa

LoRa maakt gebruik van een CSS-modulatieschema (Figuur 2.1) om data over grote afstanden tegen een zeer laag zendvermogen te verzenden. In de basis verzendt een LoRa-zender signalen waarvan de frequentie in de loop van de tijd continu omhoog (*up-chirp*) of omlaag (*down-chirp*) wordt gevarieerd. Deze chirps zijn zeer robuust tegen ruis en multipad-reflecties, omdat de ontvanger in staat is verschillen in start- en eindpunt van de chirps te meten zelfs als de signaal-ruisverhouding (SNR) ver onder 0 dB ligt [72].



Figuur 2.1: CSS-modulatie

Spreidingsfactor en bandbreedte

Twee cruciale parameters in LoRa zijn de spreidingsfactor (SF) en de bandbreedte (BW):

- **Spreidingsfactor (SF):** een geheel getal tussen 6 en 12 dat bepaalt hoeveel chips (symbolelementen) gebruikt worden om een symbool over te dragen. Een hogere SF verhoogt de gevoeligheid van de ontvanger en het bereik, maar verlaagt de effectieve bitsnelheid.
- **Bandbreedte (BW):** typisch 125 kHz, 250 kHz of 500 kHz. Een hogere BW zorgt voor kortere chirps en dus een hogere datasnelheid, ten koste van iets minder robuustheid.

De theoretische bitsnelheid R_b wordt benaderd door:

$$R_b \approx \frac{SF \times BW}{2^{SF}} \times CR \quad (2.2)$$

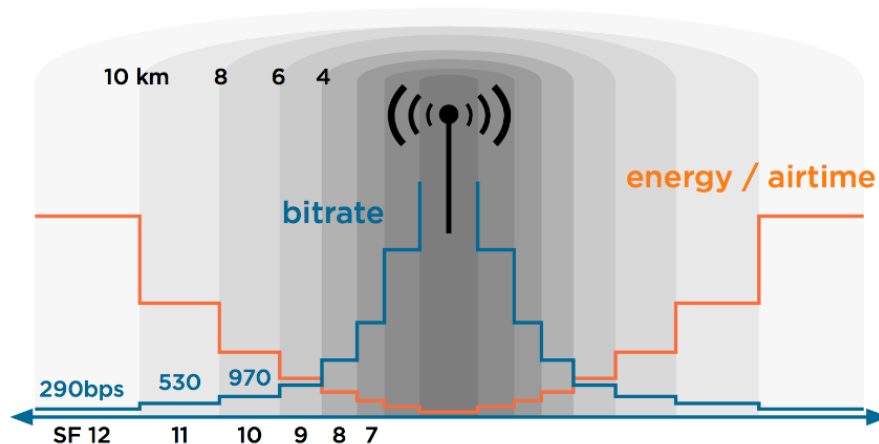
waarbij CR de *coding rate* is.

Ontvanger en demodulatie

Binnenkomende chirps worden in de ontvanger gecorreleerd met referentie-chirps om frequentieverschuiving en tijdsvertragingen te bepalen. Door in het correlatiedomein naar pieken te zoeken, kan de ontvanger de exacte symbooltijden en -waarden reconstrueren, zelfs bij SNR-waarden tot -20 dB. Dit resulteert in een link-budget (tot 150 dB), waardoor verbindingen over kilometers in stedelijke en rurale gebieden mogelijk zijn [72].

Adaptive Data Rate en netwerkmanagement

LoRa vormt enkel de fysieke laag; het bovenliggende LoRaWAN-protocol verzorgt de MAC-laag en beheert dynamische aanpassing van SF en zendvermogen per eindapparaat. Met de *Adaptive Data Rate* (ADR)-functie (Figuur 2.2) monitort de netwerkserver de linkkwaliteit aan de hand van meegezonden RSSI- en SNR-waarden en stuurt periodiek instructies terug om de parameters te optimaliseren voor zowel netwerkcapaciteit als batterijlevensduur [72].



Figuur 2.2: Visualisatie ADR

Netwerkarchitectuur en componenten

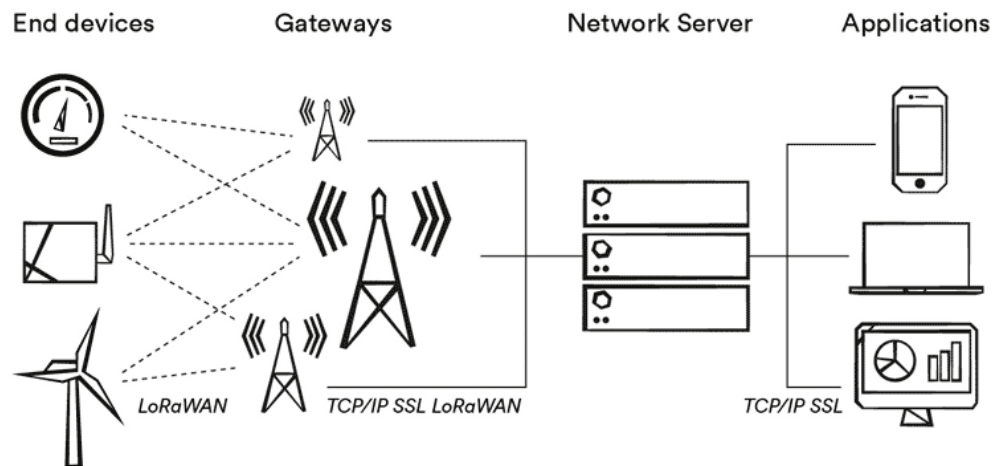
Een typisch LoRa-gebaseerd LPWAN bestaat uit vier opeenvolgende lagen (Figuur 2.3), elk met specifieke functies en hardwarecomponenten. In de volgende paragrafen worden deze componenten nader toegelicht [73].

In de onderliggende laag bevinden zich de end devices, ook wel LoRa-sensorknopen genoemd, die via een microcontroller met geïntegreerde LoRa-radio continu omgevingsmetingen verrichten en deze in de uplink versturen. Deze veldapparaten zijn uitgerust met verschillende sensoren en beschikken over een autonome energiebron.

De gateway vormt de schakel tussen het LoRa-netwerk en het IP-backbone-netwerk. Zij ontvangt gelijktijdig chirps van meerdere end devices en stuurt de verzamelde datapakketten door via bijvoorbeeld Ethernet, 3G/4G of Wi-Fi naar de Network Server.

De LoRaWAN Network Server beheert vervolgens alle uplink- en downlinkberichten. Daartoe authenticeren apparaten zich via DevEUI en JoinEUI, worden de ontvangen berichten gecontroleerd op integriteit en gedecrypteerd, en wordt ADR toegepast om zendparameters dynamisch te optimaliseren. De ontsleutelde gegevens worden daarna doorgestuurd naar de Application Server.

Op de LoRaWAN Application Server vindt de toepassingslogica plaats: hier worden de payloads ontsleuteld, beschikbaar gesteld via API-interfaces, en verwerkt tot dashboards, alarmen en datavisualisaties.



Figuur 2.3: LoRaWAN Architectuur

Communicatieprotocollen naast LoRa

Naast LoRa worden in IoT-toepassingen ook andere LPWAN- en short-range-protocollen ingezet. Narrowband IoT (NB-IoT) maakt gebruik van bestaande mobiele netwerken en biedt uitstekende indoor-prestaties en hoge netwerkcapaciteit voor miljoenen apparaten met een batterijlevensduur tot tien jaar [74], [75]. ZigBee ondersteunt mesh-topologieën voor enkele honderden meters, lage datasnelheden en zeer laag stroomverbruik, waardoor het veel wordt toegepast in gebouw- en straatverlichting [76], [77]. Bluetooth Mesh breidt Bluetooth Low Energy uit met many-to-many-communicatie, ondersteunt tot 32 767 knooppunten en is geoptimaliseerd voor betrouwbaarheid via flooding-mechanismen en retransmissies [78], [79]. Wi-Fi HaLow opereert in het sub-GHz-spectrum, biedt grotere reikwijdte tot enkele kilometers en energiebeheertechnieken zoals Target Wake Time, waardoor het geschikt is voor batterijgevoede sensoren [80], [81].

Netwerkstructuren voor grootschalige sensorimplementaties

Grootschalige sensorinstallaties maken vaak gebruik van hiërarchische en clustering-architecturen om schaalbaarheid en energie-efficiëntie te waarborgen. Star-topologieën zijn eenvoudig maar creëren een single point of failure bij de gateway. Mesh-netwerken, zoals bij ZigBee en Bluetooth Mesh, verbeteren veerkracht en dekking door multi-hop-routing, maar vragen meer complexiteit in routing en time-synchronisatie [82]. Cluster-gebaseerde protocollen verdelen nodes in groepen met een clusterhoofd voor data-aggregatie, wat berichtenverkeer en energieverbruik reduceert [83].

Betrouwbaarheid en robuustheid van draadloze datacommunicatie in stedelijke gebieden

In stedelijke omgevingen zorgen multipad-fading, interferentie en obstakels voor packet loss en variabele latenties. Time Slotted Channel Hopping vermindert interferentie en fading door tijd- en frequentiediversiteit, wat de betrouwbaarheid en voorspelbaarheid van low-power sensor netwerken aanzienlijk verbetert [84]. Studies in industriële en kantooromgevingen tonen aan dat netwerkbeschikbaarheid en fouttolerantie kunnen stijgen door redundante paden en automatisering van foutdetectiemechanismen. Daarnaast dragen adaptieve zendvermogensregeling en automatische herconfiguratie van netwerkparameters bij aan stabiele datatransmissie onder wisselende radiofrequente (RF)-condities [85].

2.9 Data-analyse en modellering

Methoden van data-analyse voor hitte-stressgegevens

Data-analyse voor hitte-stress maakt vaak gebruik van statistische methoden zoals tijdreeksanalyse, regressiemodellen en clustering om patronen in temperatuur- en omgevingsdata te ontdekken [86]. Waveletdecompositie en Fouriertransformaties worden toegepast voor trenddetectie en ruisonderdrukking in real-time datasets [87]. Daarnaast presenteren gepersonaliseerde low-cost systemen, gebaseerd op IoT-architecturen, voorbeelden van end-to-endpipelines voor data-extractie, preprocessing en analyse, waarbij nauwkeurigheid en betrouwbaarheid worden gevalideerd tegen referentiesensoren [88].

AI- en machine learning-methoden om hittestresspatronen en -risico's te voorspellen

Machine learning-modellen zoals random forests, support vector machines en diepe neurale netwerken zijn succesvol toegepast op de voorspelling van de Universal Thermal Climate Index (UTCI), met een verbeterde nauwkeurigheid en minder datavereisten dan klassieke methoden [89], [90]. Voor gezondheidsrisico's levert het combineren van omgevingsdata met ML-algoritmes significant betere voorspellingen van hitteberoerte-incidenten op dan enkel op WBGT gebaseerde modellen [91]. Systematische reviews tonen bovendien aan dat brede ML-algoritmen betrouwbaar hittegevoelige gezondheidsuitkomsten kunnen voorspellen, wat beleidsmakers en hulpdiensten waardevolle inzichten biedt [92].

Open-source softwaretools voor verwerking en visualisatie van sensorgegevens

Een veelgebruikte oplossing voor time-series data in IoT is de combinatie InfluxDB met Grafana, waardoor real-time monitoring en alerting eenvoudig in te richten zijn [93]. ThingsBoard biedt een end-to-end open-source platform voor data-acquisitie, verwerking en visualisatie, met native ondersteuning voor NB-IoT, LoRaWAN en Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) [94]. Voor Python-gebaseerde workflows worden libraries als Pandas en NumPy voor data cleaning en analyse gebruikt, terwijl Plotly en Dash interactieve, webgebaseerde visualisaties mogelijk maken [95]. OpenRemote is een open-source device-management en visualisatieplatform voor grootschalige IoT-implementaties [96].

2.10 Conclusie

In deze studie zijn de belangrijkste bouwstenen voor het ontwerp van betaalbare, betrouwbare hittestresssensoren in snelgroeiende steden verkend. Er zijn uiteenlopende sensortypes, methoden en IoT-infrastructuren vergeleken en besproken. Strategieën voor duurzame energievoorziening en draadloze transmissieprotocollen vormen de basis van een robuuste monitoringarchitectuur.

Vervolgens zijn analysemethoden in kaart gebracht, evenals open-source platforms voor real-time visualisatie en risicovoorspelling. Casestudies uit verschillende continenten benadrukken succesfactoren en hindernissen. De invloed van het UHI-effect, bouwmaterialen en stedelijke planning op thermisch comfort, en maatschappelijke en economische aspecten zijn in samenhang geanalyseerd. Deze inzichten vormen de basis voor de concrete ontwerpkeuzes, experimentele opzet en validatie van het sensornetwerk in de volgende hoofdstukken.

Hoofdstuk 3

Materiaal en methoden

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de selectie, karakterisering en toepassing van de benodigde hardware- en softwarecomponenten voor de realisatie van een zelfvoorzienende IoT-sensornode beschreven. Allereerst worden verschillende LoRa-componenten besproken, gevolgd door een systematische vergelijking van sensoren op meetbereik, nauwkeurigheid, interfacecomplexiteit en kosten.

Vervolgens worden drie microcontrollerfamilies naast elkaar geplaatst om verschillen in rekenkracht, geheugencapaciteit, energieverbruik en connectiviteitsmogelijkheden inzichtelijk te maken. Daarna komen essentiële randcomponenten aan bod, waaronder niet-vluchtige geheugenopties en batterijmonitoring, die cruciaal zijn voor betrouwbare dataopslag en accubeheer.

In de afsluitende sectie worden methodes om stroommetingen en -optimalisaties uit te voeren besproken. Deze opzet vormt het fundament voor zowel het hardware-ontwerp als de dataverzameling en -verwerking in de rest van deze thesis, en biedt een helder overzicht van de keuzes en afwegingen die de ontwikkeling van een energie-efficiënte en betrouwbare sensornode sturen.

3.2 LoRa-componenten

In de volgende subsecties worden verschillende LoRa-componenten beschreven, aangezien inzicht in hun technische specificaties en functionele mogelijkheden onmisbaar is voor de opzet en optimalisatie van een betrouwbaar LoRa-netwerk. Door de eigenschappen van sensornodes, gateways en serveropties te analyseren, kunnen ontwerpkeuzes worden onderbouwd op het gebied van bereik, energieverbruik, dataverwerking en schaalbaarheid. Bijlage A bevat details van elk LoRa-Component.

Vergelijking van sensor node modules

Verschiedende commerciële LoRa-sensornodemodules verschillen in zendvermogen, ontvangergevoeligheid en energieverbruik [97], [98], [99]. Deze vergelijking is nodig om een module te kiezen die zowel voldoende bereik heeft als zuinig genoeg is voor langdurige veldmetingen.

Vergelijking van LoRa-gateways

Twee representatieve LoRa-gateways verschillen voornamelijk in concentratorcapaciteit, werkingskracht en toepassingsgebied. De DLOS8N beschikt over een multi-channel SX1302-concentrator met 10 kanalen en biedt robuuste, outdoor LoRaWAN-functionaliteit, terwijl de LG01v2 een enkelkanaalsmodule is voor betaalbare indoor peer-to-peer-toepassingen [100], [101]. Deze vergelijking helpt bij het bepalen van de juiste gateway voor dekking en schaalbaarheid in het netwerk.

LoRaWAN-serveropties

LoRaWAN-servers variëren van open source tot commerciële SaaS- en cloudprovider-integraties. Twee gangbare open-sourceplatforms zijn ChirpStack en The Things Stack [102], [103]. Het kiezen van de juiste serveroplossing is essentieel voor betrouwbare dataverwerking, netwerkbeheer en schaalbaarheid.

LoRaWAN Application Server

Een LoRaWAN Application Server biedt een webportaal voor visualisatie, analyse en beheer van sensordata, met functionaliteiten zoals data-dashboards, waarschuwingen op basis van drempelwaarden, apparaten- en gebruikersbeheer, en API-toegang (REST/MQTT) voor externe integratie [104]. Voor implementatie kan men kiezen tussen zelf ontwikkelen van een webapplicatie of het gebruik van bestaande open-source/SaaS-templates.

3.3 Sensoren

Verschillende sensorklassen worden beschouwd, elk gekenmerkt door bereik, nauwkeurigheid en meetfrequentie. Bijlage B bevat de volledige specificaties en tabellen.

Temperatuur- en relatieve luchtvochtigheid

Het kwantificeren van hittestress en het inschatten van thermisch comfort in stedelijke omgevingen vereist maatstaven voor zowel de luchttemperatuur als de relatieve luchtvochtigheid. Luchttemperatuur is de primaire aanduiding van de thermische belasting, terwijl relatieve luchtvochtigheid van invloed is op het verdampingsvermogen van de menselijke huid en daarmee op de perceptie van warmte. Drie gangbare sensortypen DHT22, AM2320 en SHT31/SHT35 verschillen in temperatuurbereik, RH-bereik, nauwkeurigheid en samplefrequentie [105], [106], [107].

Temperatuursensoren voor stralingsmetingen

Naast de luchtparameters is de stralingsbelasting een sleutelcomponent voor de bepaling van hittestress, omdat zonnestraling de effectieve warmtebelasting op het menselijk lichaam sterk verhoogt. De DS18B20 is goedkoop en waterdicht, maar traag en minder nauwkeurig. De PT100/PT1000 biedt hoge lineariteit en samplingfrequentie, maar vereist meetbruggen en kalibratie [108], [109].

Lux-sensoren

Door lux-waarden continu te meten, kunnen lokale pieken in zoninstraling worden vastgesteld en kan de stralings-component van hitte-indicatoren worden gekalibreerd, vooral op momenten dat directe zonneval's middags of in open plazas aanzienlijk kan zijn. BH1750, TSL2561 en VEML7700 verschillen in dynamisch bereik, resolutie en lineariteit bij hoge luxwaarden [110], [111], [112].

GPS-modules

In een grootschalig meetsysteem is het essentieel om elke meting geografisch te verankeren, zodat ruimtelijke patronen van hittestress inzichtelijk worden en het eenvoudiger is om sensoren op hun exacte locatie terug te vinden voor onderhoud of kalibratie. VMA-430, NEO-6M en NEO-M8N onderscheiden zich in multi-constellatie-ondersteuning, bouwwijze en energieverbruik [113], [114], [115].

CO₂-sensoren

Hoewel CO₂-concentraties op zichzelf geen directe maatstaf zijn voor hittestress, fungeren zij als indicator voor menselijke bezetting en ventilatiepatronen in stedelijke en semi-binnenstedelijke ruimtes. SCD41, Senseair S8 en MH-Z19B verschillen in detectiemethode, nauwkeurigheid en kostprijs [116], [117], [118].

Fijnstofsensoren

Fijnstof is een belangrijke luchtkwaliteitsparameter die rechtstreeks verband houdt met ademhalingsgezondheid, zeker tijdens perioden van hittestress wanneer luchtvervuiling vaak een extra risicofactor vormt. SEN5x, PMS5003 en SDS011 verschillen in sensortechnologie, nauwkeurigheid in schone lucht en interface [119], [120], [121]. In een monitoringnetwerk dragen deze sensoren bij aan de gecombineerde beoordeling van thermische en luchtkwaliteitsstress, doordat hoge fijnstofconcentraties tijdens hittegolven de respiratoire belasting versterken. Door fijnstofsensoren te integreren, kan het systeem zowel hitte- als luchtvervuilingsrisico's identificeren en kan een completer beeld worden geschetst van het milieu waaraan stedelijke bewoners worden blootgesteld.

3.4 Microcontrollers

Een microcontroller vormt het hart van elk IoT-gestuurd meetsysteem doordat zij alle randapparatuur zoals sensoren, communicatie-interfaces en energiebeheer aanstuurt en coördineert. Drie platformfamilies worden kort vergeleken: Arduino (Uno, Nano, Nano Every), ESP32 (WROOM-32, WROVER, S3) en STM32 (F-serie, U-serie, L-serie) (Tabel 3.1).

Tabel 3.1: Pros en cons van microcontroller-platforms		
Platform	Pros	Cons
Arduino	• Laag in kosten • Zeer groot ecosysteem • Eenvoudig in gebruik • Laag stroomverbruik	• Beperkte kloksnelheid • Klein geheugen • Geen draadloze connectiviteit
ESP32	• Hoge kloksnelheid • Veel geheugen • Wi-Fi en Bluetooth • Groot ecosysteem	• Hoog stroomverbruik • Middelmatige complexiteit • Kosten hoger dan Arduino
STM32	• hoge rekenkracht • Zeer laag stroomverbruik • Veel geheugen • Diverse hardwareinterfaces • Professioneel ecosysteem	• Hogere complexiteit • Kosten gemiddeld tot hoog • Steile leercurve

De Uno en Nano zijn ideaal voor instaprojecten dankzij het grote ecosysteem, terwijl de Nano Every extra rekenkracht en geheugen biedt, maar met iets hoger stroomverbruik en minder community-ondersteuning [122], [123], [124].

De ESP WROOM-32, WROVER en S3 bieden variërende geheugen- en interfacemogelijkheden voor intensievere IoT-toepassingen [125], [126], [127].

De STM32 F-serie is geschikt voor veeleisende embedded-toepassingen. De STM32 U-serie richt zich op ultra-low-power IoT. De STM32 L-serie combineert lage stroom met redelijke prestaties voor draagbare toepassingen [128], [129], [130].

Bijlage C geeft een samenvattende vergelijking van architectuur, kloksnelheid, geheugen, connectiviteit en stroomverbruik weer.

3.5 Extra componenten

Verschillende randcomponenten voor dataopslag en batterijbeheer variëren in technologie, prestaties en kosten. Bijlage D toont volledige specificaties en tabellen.

Memory

Geheugen is essentieel om sensordata tijdelijk op te slaan wanneer er geen directe verbinding met de server mogelijk is, bijvoorbeeld bij netwerkuitval of tijdens onderhoud. Door gebruik te maken van niet-vluchtige geheugentypes zoals EEPROM, FRAM of MRAM kan data veilig

bewaard blijven bij stroomonderbreking, wat dataverlies voorkomt en de betrouwbaarheid van het systeem verhoogt [131], [132], [133].

Battery monitoring / Fuel Gauge

Een batterijmonitor (fuel gauge) is nuttig om de resterende accucapaciteit nauwkeurig te bepalen en vroegtijdig te waarschuwen voor lage laadtoestanden. Dit voorkomt onverwachte uitval en helpt bij planning van onderhoud of vervanging. Door IC's zoals de RT9426GQW of STC3100 te integreren, kan het systeem het stroomverbruik real-time bijhouden, de accustatus optimaliseren en de levensduur van de batterij verlengen [134], [135].

3.6 Stroommetingen en optimalisaties

Om het energieverbruik van het sensornetwerk nauwkeurig in kaart te brengen, zijn stroommetingen essentieel. Hiervoor wordt gebruikgemaakt van de Power Profiler Kit 2 van Nordic Semiconductor. Met deze tool kan het stroomprofiel van het systeem, worden geregistreerd. Door meetwaarden zoals piekstromen tijdens datatransmissie en het gemiddelde stroomverbruik in slaapmodus vast te leggen, ontstaat een gedetailleerd beeld van waar en wanneer het systeem het meest energie verbruikt. Deze inzichten vormen de basis voor gerichte optimalisaties om de operationele levensduur van de batterij te verlengen en de betrouwbaarheid van het netwerk te verhogen.

3.6.1 Softwarematige optimalisaties

Softwarematig stroomverbruik kan aanzienlijk worden teruggedrongen door slim gebruik van de microcontroller en de LoRa-radio:

- **Gebruik van slaap- en standby-modi:** Door de microcontroller zoveel mogelijk in diepe slaapstand (Deep Sleep) te zetten wanneer er geen metingen hoeven plaats te vinden, wordt het basisverbruik drastisch verlaagd. Alleen op vooraf ingestelde momenten of bij externe interrupts (bijv. bewegingssensor) wordt de MCU “wakker” gemaakt om een meting uit te voeren en data te verzenden.
- **Efficiënte firmware-architectuur:** Optimalisaties zoals het vermijden van blocking-code, minimaliseren van wachttijden (polling) en het gebruik van low-level interruptgestuurde routines verminderen de actieve verwerkingstijd van de MCU, wat direct leidt tot een lager stroomverbruik.

3.6.2 Hardwarematige optimalisaties

Naast software kunnen ook hardwarekeuzes en -aanpassingen bijdragen aan een lager energieverbruik:

- **Keuze van ultralow-power componenten:** Door te werken met een microcontroller zoals een STM32-MCU, die beschikt over meerdere diepe slaapstanden en een zeer laag quiescent current, wordt het basisverbruik sterk verlaagd. Ook de keuze voor een efficiënte spanningsregelaar met een laag standby-stroomverbruik helpt om verliezen te minimaliseren.

- **Optimaliseren van voedingstopologie:** Het gebruik van een DC–DC-converter in plaats van een lineaire spanningsregelaar (LDO) kan de efficiëntie verbeteren, vooral wanneer de ingangsspanning significant hoger is dan de voedingsspanning van de MCU.
- **Selectie van energieuze sensoren en randcomponenten:** Door bijvoorbeeld te kiezen voor sensoren die een ingebouwde interruptmogelijkheid bieden bij drempeloverschrijding, kan de microcontroller langer in slaapstand blijven. Ook kunnen componenten met lage-lek condensatoren en schakelbare spanningsrails helpen om randcircuits volledig uit te schakelen wanneer ze niet nodig zijn.

Hardwarematige optimalisaties zijn vaak nodig omdat software alleen het nadenken over gedrag van de MCU adresseert, terwijl fysieke componentkeuzes en voedingstopologie direct de energie-efficiëntie van het hele systeem bepalen. Zonder aandacht voor beide niveaus blijft de potentiële batterijcapaciteit beperkt.

Hoofdstuk 4

Resultaten

4.1 LoRa-componenten

De Dragino LA66 LoRaWAN Shield is een compacte sensormodule die ideaal is voor energiezuinige toepassingen. Met een nauwkeurige TCXO-oscillator, een externe SMA-antenne en een eenvoudige UART-interface kan deze module direct communiceren met een microcontroller en ondersteunt hij beveiligde Over the Air Activation (OTAA)-sleutels voor veilige netwerktoegang [98]. Dankzij het geringe stroomverbruik en het kleine formaat is de LA66 zeer geschikt als sensor node om op straatniveau temperatuur- en vochtigheidsmetingen te verzenden zonder een grote fysieke footprint.

De Dragino DLOS8N Outdoor LoRaWAN Gateway vormt de schakel tussen de sensornodes en het internet. Deze gateway is weerbestendig en kan draadloos of bedraad verbonden worden met een backbone, waardoor hij eenvoudig in stedelijke omgevingen kan worden geïnstalleerd. Optioneel kan een mobiele verbinding worden gebruikt om ook op afgelegen locaties een betrouwbare dataverbinding te garanderen. Door de robuuste behuizing en ingebouwde bliksembescherming blijft de gateway stabiel functioneren [100].

Voor het beheer en de verwerking van de gemeten data is gekozen voor ChirpStack, een open-source LoRaWAN-server. ChirpStack biedt een modulair platform waarin gateways, netwerkserver en applicatieserver naadloos samenwerken. Het ondersteunt zowel OTAA- als Activation By Personalisation (ABP)-authenticatie en ADR. Hiermee ontstaat een flexibel en schaalbaar ecosysteem waarmee sensoren eenvoudig kunnen worden aangemeld, beheerd en geconfigureerd, terwijl de verzamelde data overzichtelijk beschikbaar blijft voor visualisatie en analyse [102].

LoRaWAN Application Server

De implementatie van de LoRaWAN Application Server bestaat uit twee componenten:

1. Python-script voor opslag en dataverwerking

Het op `Flask` gebaseerde Python-script verzorgt zowel de ontvangst en opslag van inkomende LoRaWAN-berichten als het samenvoegen van historische sensorwaarden en het ontsluiten ervan via een REST-API.

- Het endpoint `/chirpstack` biedt een HTTP-POST-interface voor berichten van de Lo-

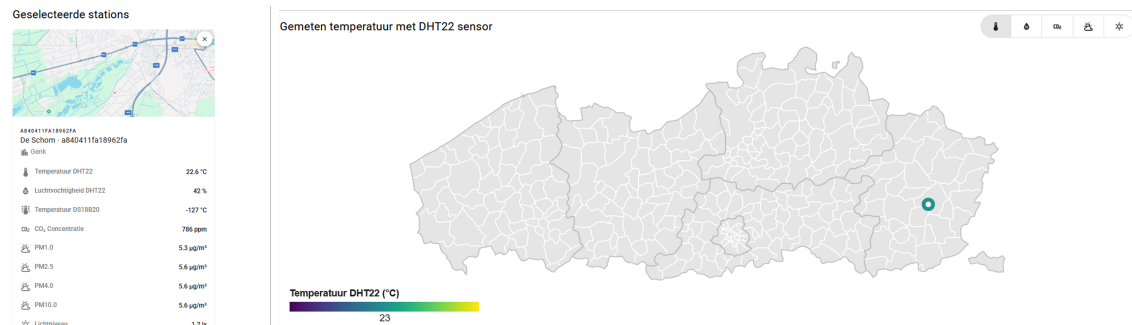
RaWAN Network Server. Binnenkomende JSON-payloads worden gevalideerd, de base64-gecodeerde data gedecodeerd en als ASCII-tekst geïnterpreteerd. Afhankelijk van het sensortype (GPS, CO₂, PM, DHT22, DS18B20, LIGHT) schrijft het script de individuele metingen weg naar per-apparaat en per-sensortype CSV-bestanden in **SensorData/<devEUI>**. Bij de eerste schrijfbeurt worden kolomheaders aangemaakt en voor elke nieuwe meting een UTC-timestamp geregistreerd.

- De functie `unify_sensor_data(dev_eui)` leest alle CSV-bestanden voor een gegeven apparaat in, rondt tijdstempels af op minuten en voegt alleen complete meetgegevens (alle sensortypes in dezelfde minuut) samen tot een JSON-object per tijdstip. Deze verzamelde metingen worden aangeboden via:
 - `/measurements/{station}`: alle historische metingen voor een enkel station,
 - `/measurements`: de meest recente meting per station,
 - `/stations/{station}` en `/stations`: metadata per station (inclusief stad/straat afgeleid uit bestandsnamen en laatste GPS-coördinaten).

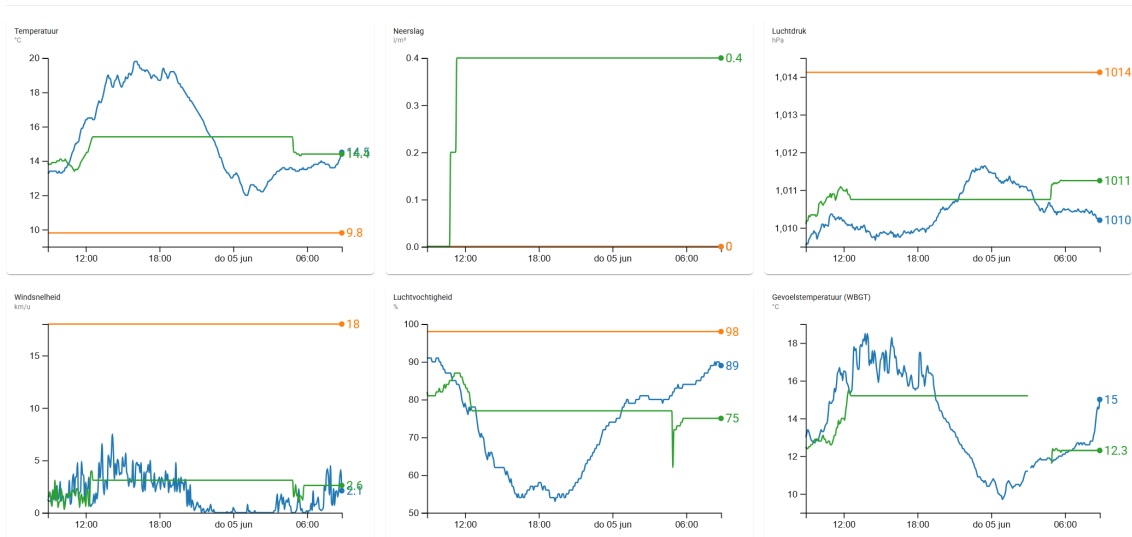
Dit script fungeert als een lichtgewicht data-ingestie- en verwerkingslaag, waarbij sensorgegevens duurzaam worden gelogd, gestructureerd samengevoegd en via een eenvoudige REST-API beschikbaar gesteld voor downstreamapplicaties.

2. Adaptatie van het VLINDER-dashboard

Voor de visualisatie van de verwerkte data is een open-source webdashboard gebaseerd op het VLINDER-project van de Universiteit Gent geïmplementeerd (Figuur 4.1). Het dashboard is geschreven in Vue.js en haalt data op via de REST-API van de Python-backend. Grafieken voor meerdere meetstations worden gegenereerd met JavaScript-bibliotheken en kunnen via URL-parameters dynamisch geconfigureerd worden. De originele code is overgenomen van de GitHub-repository van [bmesuere/vlinder](#) en aangepast om eigen stations en datatypes te ondersteunen [136].



(a) kaart

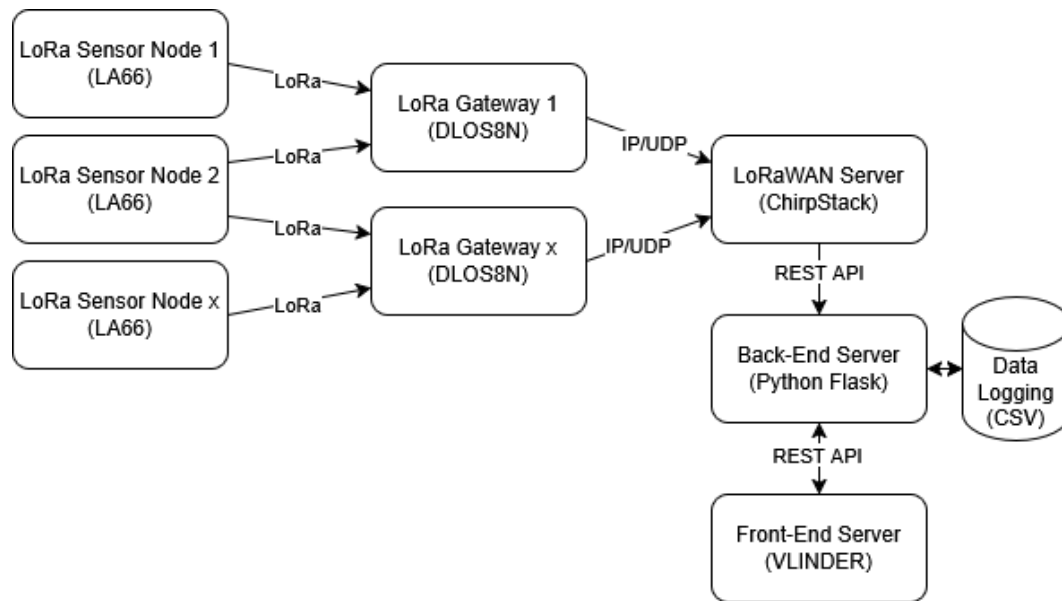


(b) Grafieken

Figuur 4.1: VLINDER-dashboard

4.1.1 Overzicht werking LoRaWAN

Figuur 4.2 toont het resulterende netwerk op basis van de gekozen LoRa-componenten.



Figuur 4.2: Resulterende Netwerkarchitectuur

4.2 Sensoren

De volgende sensoren zijn geselecteerd voor het systeem:

- Temperatuur- en luchtvochtigheidssensor: DHT22 [105]
- Temperatuursensor voor stralingsmetingen: DS18B20 [108]
- Lux-sensor: BH1750 [110]
- GPS-module: VMA-430 [113]
- CO₂-sensor: SCD41 [116]
- Fijnstofsensor: SEN55 [119]

Bijlage F bevat volledige specificaties en achtergrondinformatie.

4.3 PCB-Ontwerp

4.3.1 Microcontroller

Voor de eerste PCB-iteratie (v1) is gekozen voor de Arduino Nano Every. Deze heeft een grote gebruikerscommunity en is eenvoudig te programmeren, waardoor de ontwikkeling snel van start kon gaan. Bovendien biedt de Nano Every voldoende I/O-pinnen en zowel 5 V- als 3,3 V-spanningsregelaars, wat integratie met uiteenlopende sensoren en randapparatuur vereenvoudigt [124]. Zie Bijlage G voor de volledige specificaties.

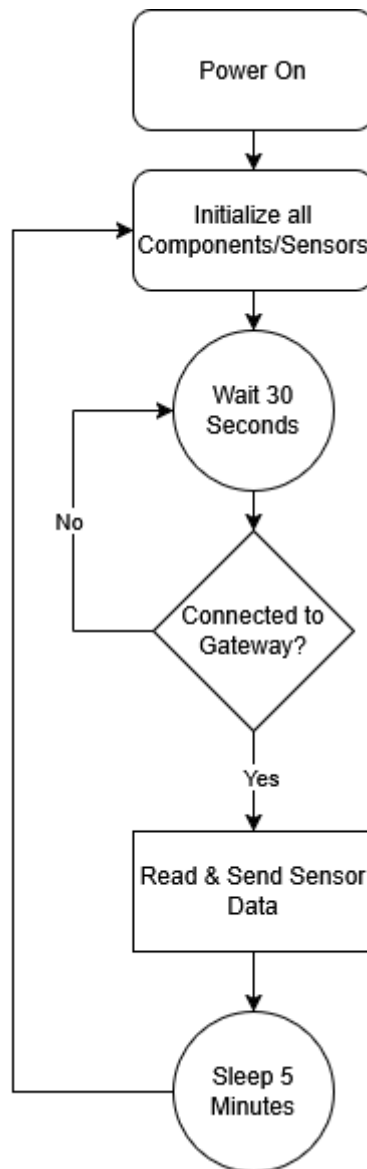
Na uitgebreide tests en aanvullende eisen op het gebied van energieverbruik kon vanwege extra ontwikkelingstijd een tweede PCB-iteratie (v2) worden gerealiseerd. In deze versie is de MCU vervangen door de STM32L071K8U3 om de volgende redenen:

- **Lagere ruststroom:** De STM32L0-serie biedt meerdere diepe slaapstanden en een zeer laag quiescent current, wat de batterijlevensduur verlengt.
- **Hogere rekenkracht:** Voor toekomstige firmwareoptimalisaties en eventuele lokale data-analyse is een 32-bit core met 32 MHz aantrekkelijker dan de 8-bit ATmega4809 op 20 MHz.
- **Uitgebreidere interfaces:** De STM32L071K8U3 beschikt over meer I/O-pinnen en extra hardware-peripherals (bijv. meerdere UART/SPI/I²C-kanalen), wat flexibiliteit biedt voor toekomstige uitbreidingen (zoals extra sensoren of een andere communicatiebus).

Bijlage K bevat de volledige specificaties van de STM32L071K8U3 [137]. Hiermee kan de tweede iteratie voldoen aan strengere energie-eisen en meer complexe functionaliteit.

4.3.2 Werking van de PCB firmware

Figuur 4.3 toont de werking van de eerste iteratie schematisch aan. Bijlage J bevat een uitgebreide uitleg van de firmware. De firmware bij tweede PCB-iteratie zal grotendeels hetzelfde blijven.



Figuur 4.3: Flowchart werking firmware PCB v1

4.3.3 Overige belangrijke componenten

In zowel de eerste als de tweede PCB-iteratie zijn verschillende randcomponenten opgenomen die essentieel zijn voor het betrouwbaar opslaan van meetgegevens en het beheer van de energievoorziening. Het niet-vluchtige geheugentype MB85RC256VPNF-G-JNERE1 (FRAM) dient om sensordata te bewaren wanneer er tijdelijk geen verbinding is met het LoRa-netwerk [138]. FRAM combineert de snelle schrijfsnelheid van SRAM met niet-vluchtigheid, waardoor een groot aantal schrijfcycli mogelijk is bij laag stroomverbruik en de data-integriteit behouden blijft.

Voor spanningsconversie gebruikte v1 de boost-converter TPS61202 om de batterijspanning te verhogen tot de benodigde 5 V voor de microcontroller [139]. In v2 is dit aangepast door de TPS631010-buck-boost-converter toe te passen, zodat de stabiele 3,3 V die de STM32 vereist altijd gegarandeerd is [140].

Het laadbeheer van de batterij wordt in beide iteraties verzorgd door de BQ24210 [141]. Dit IC regelt de laadstroom en -spanning op basis van de aangesloten adapter en de huidige accustatus, zodat de batterij veilig en efficiënt wordt opgeladen.

Voor nauwkeurige monitoring van de resterende accucapaciteit is in beide versies het RT9426GQW-fuel-gauge-IC geïntegreerd [142]. Dit component meet continu spanning, stroom en resterende laadstatus, zodat het systeem vroegtijdig kan controleren of er voldoende vermogen beschikbaar is.

In v2 is daarnaast de FDC6329L-loadschakelaar toegevoegd [143]. Dit schakelingselement maakt het mogelijk om randcomponenten, zoals bijkomende sensoren of communicatiemodules, automatisch uit te schakelen wanneer deze niet actief nodig zijn. Door deze extra component gecontroleerd van stroom te voorzien, kan het totale systeemverbruik nog verder omlaag, wat vooral relevant is bij lange inzetperioden op locaties met beperkte energievoorziening.

Tabel 4.1 geeft een overzicht van.

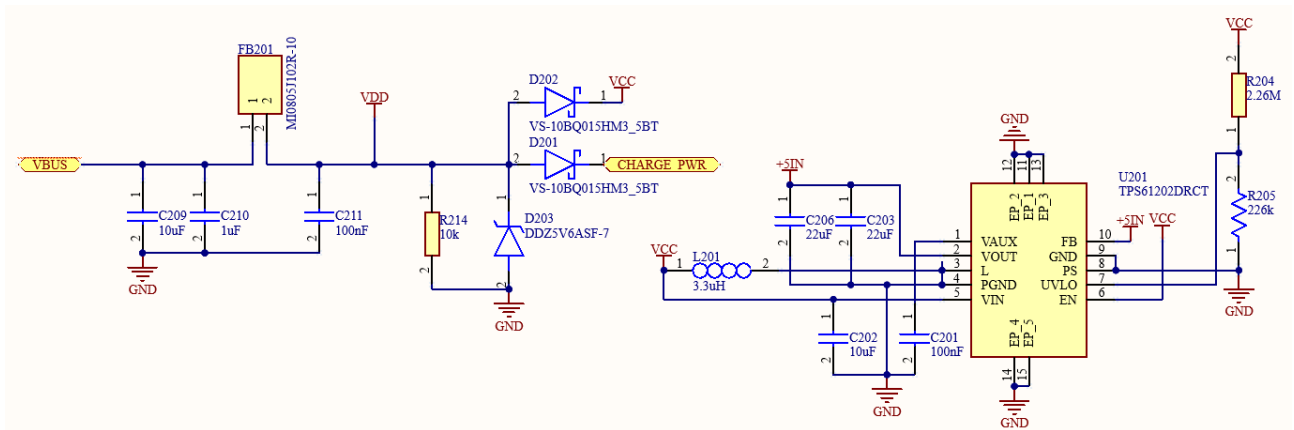
Tabel 4.1: Overzicht componentkeuze PCB v1 versus v2

Componentcategorie	PCB v1	PCB v2
Microcontroller	Arduino Nano Every	STM32L071K8U3
Niet-vluchtig geheugen	MB85RC256VPNF-G	MB85RC256VPNF-G
Spanningsconversie	TPS61202 (boost, 5 V)	TPS631010 (buck-boost, 3,3 V)
Batterijlader	BQ24210	BQ24210
Batterijmonitor / Fuel gauge	RT9426GQW	RT9426GQW
Load switch	–	FDC6329L

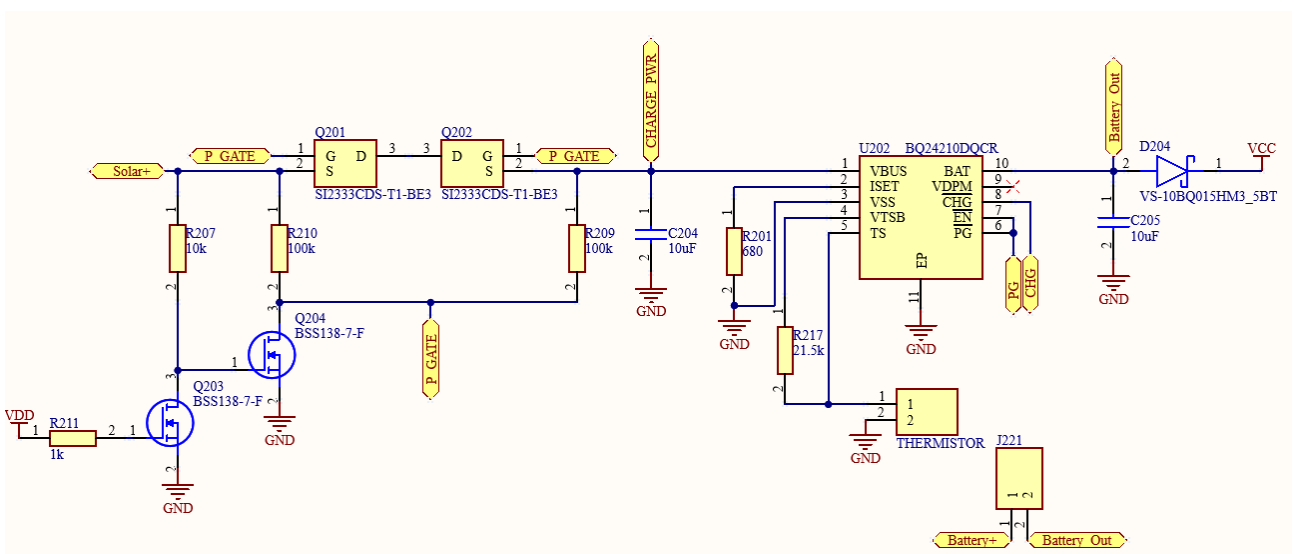
4.3.4 Vermogenscircuit

In de eerste PCB-iteratie is gekozen voor een hybride voedingsarchitectuur waarbij het systeem kan worden gevoed via een USB-C-poort of een zonnepaneel. De USB-C-poort fungeert zowel als primaire voedingsbron als laadinterface voor de interne batterij, waardoor herstart en onderhoud mogelijk zijn zonder fysieke batterijverwijdering. Omdat de nominale spanning van een enkele cel (3,7 V) onvoldoende is voor de 5 V-logica van de Arduino Nano Every, is in versie 1 een boost-converter (TPS61202DRCT) toegepast om de batterijuitgangsspanning naar 5 V te verhogen (Figuur 4.6a) [139].

De dimensionering van zowel de batterijlader (BQ24210DQCR) als de boost-converter is berekend aan de hand van de specificaties en het beoogde stroomprofiel; volledige rekenstappen en achtergrondinformatie zijn te vinden in Bijlage H [141]. Om terugvoeding tussen de USB-C- en zonnepaneel-ingangen te voorkomen, is gebruikgemaakt van back-to-back P-kanaal MOSFETs, zodat automatisch altijd USB-C prioriteit heeft op het zonnepaneel. Het geplande batterij-monitoringcircuit met de RT9426GQW fuel gauge kon in deze revisie door leveringsproblemen niet worden geïmplementeerd [142]. Figuur 4.4 en 4.5 tonen het volledige vermogensschema van versie 1.



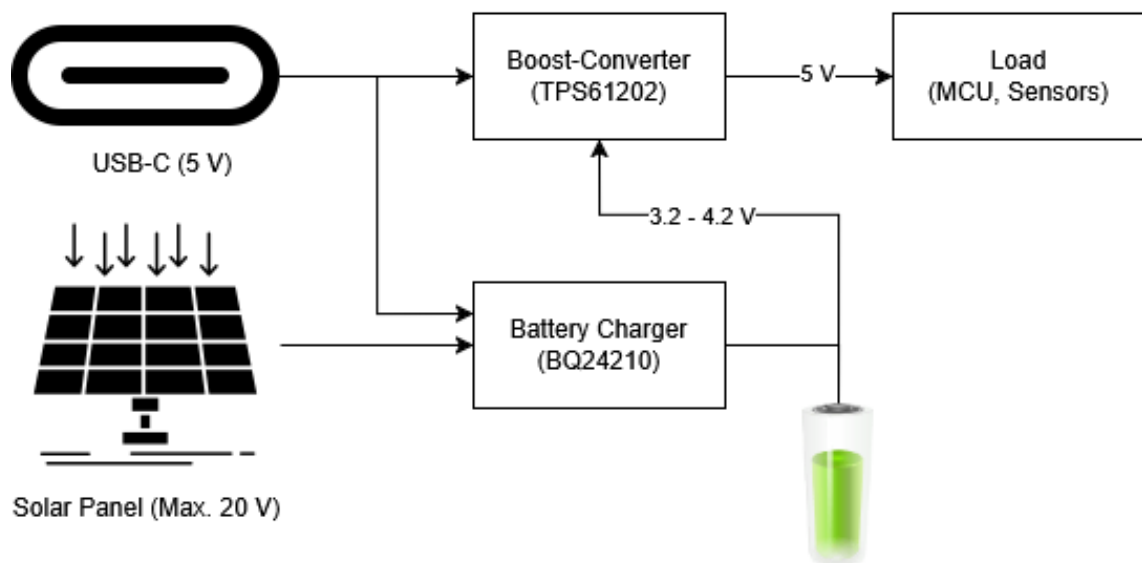
Figuur 4.4: Links inkomend vermogen van USB-C, rechts de boost-converter



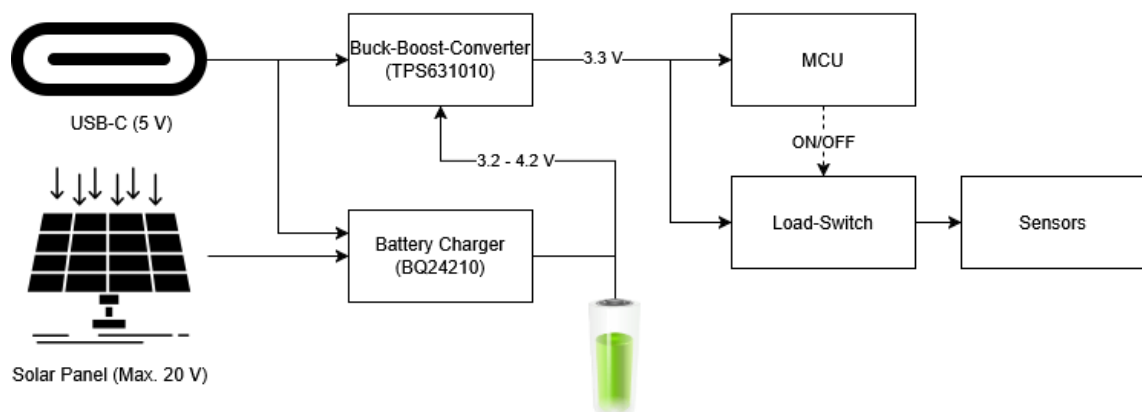
Figuur 4.5: Links inkomend vermogen van zonne-panneel, rechts batterijlader

In PCB-versie 2 blijft de algemene opzet van het vermogensschema gelijk aan versie 1, met dezelfde USB-C- en zonnepaneel-ingangen en dezelfde back-to-back MOSFET-configuratie voor bronselectie. Omdat de MCU in de tweede iteratie een STM32L071K8U3 is, die op 3,3 V werkt, is de boost-converter vervangen door een buck-boost-converter (TPS631010) om de uitgangsspanning consequent op 3,3 V te houden, ongeacht de batterijspanning [140]. Hierdoor wordt de efficiëntie verhoogd wanneer de batterij zowel boven als onder de 3,3 V uitkomt, terwijl de voeding van de LoRa-module en andere randcomponenten gewaarborgd blijft (Figuur 4.6b).

Daarnaast is in versie 2 een FDC6329L-loadschakelaar toegevoegd om randcomponenten, zoals extra sensoren, automatisch af te schakelen wanneer deze niet in gebruik zijn; dit draagt bij aan een verdere verlaging van het totale stroomverbruik [143]. De batterijlader (BQ24210DQCR) en het geplande fuel-gauge-IC (RT9426GQW) zijn ten opzichte van versie 1 onveranderd gebleven, waardoor de bijbehorende laad- en monitorsoftware hergebruikt kon worden.



(a) Eerste PCB Iteratie



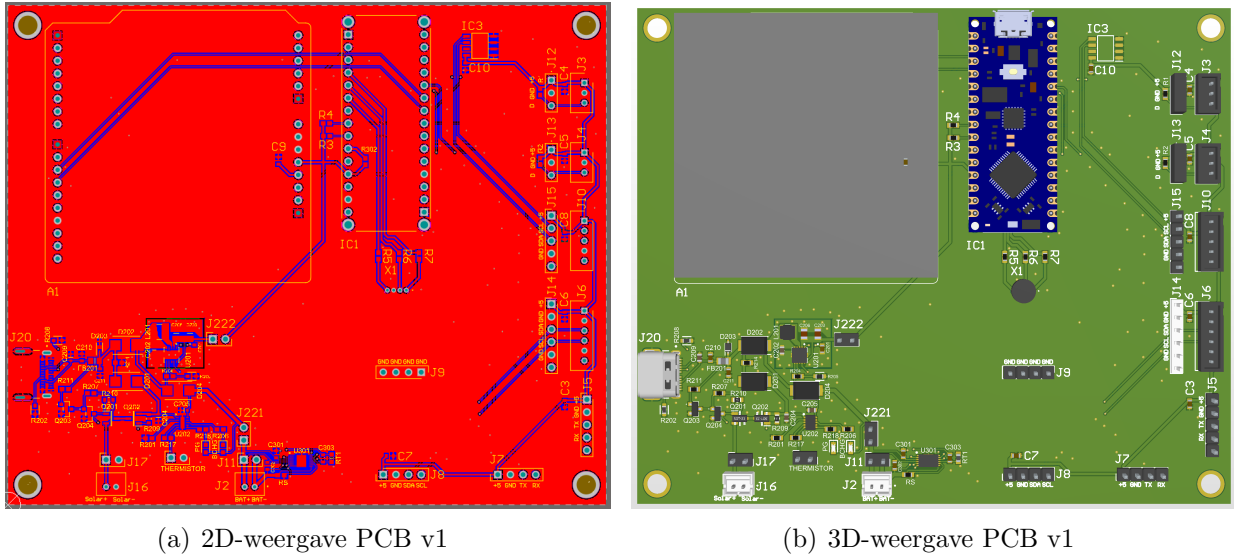
(b) Tweede PCB Iteratie

Figuur 4.6: Opzet Vermogencircuit

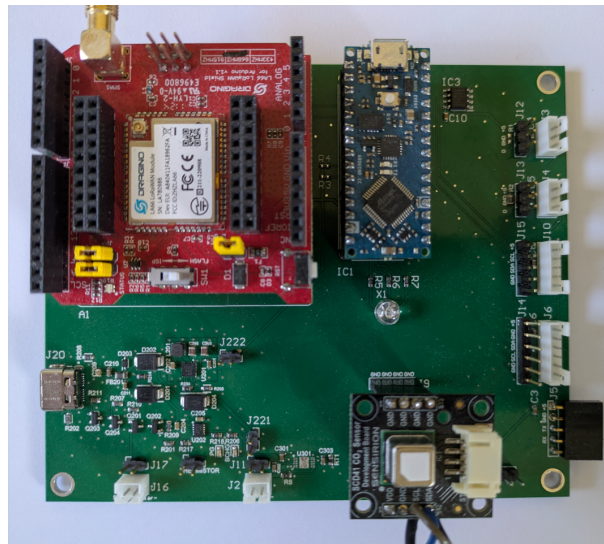
4.3.5 Ontwerp- en lay-outoverwegingen

Voor beide PCB-iteraties is in de ontwerpfase eerst gecontroleerd op functionele fouten en componentplaatsing. De algemene lay-outrichtlijnen bleven voor v1 en v2 gelijk: een tweelaags PCB met sporen van minimaal 90°-hoeken om de productie te vereenvoudigen, en zowel de boven- als onderzijde zijn flood-filled om de impedantie naar het grondvlak te minimaliseren en de EMC-prestaties te verbeteren.

Voor PCB-versie 1 besloeg de uiteindelijke lay-out een bord van 10×12 cm (Figuur 4.7 en 4.8).



Figuur 4.7: Getekende weergave van de bovenlaag (a) en 3D-visualisatie (b) voor PCB v1.



Figuur 4.8: Gerealiseerde printplaat voor PCB v1 (10×12 cm).

49

4.3.6 Stroommetingen en -analyse

In PCB-versie 1 zijn uitgebreide stroommetingen uitgevoerd om het energiegedrag van het systeem te karakteriseren. Per component zijn mogelijke optimalisaties in kaart gebracht (Tabel 4.2), waarna het totale stroomverbruik daalde van ongeveer 150 mA naar 50 mA, wat neerkomt op een reductie van circa 66%.

Tabel 4.2: Stroomverbruik per component voor en na optimalisatie

Component	Voor optimalisatie	Na optimalisatie
LA66 LoRaWAN Shield	227 μ A	227 μ A
VMA-430	40 mA	18,5 mA
BH1750	130 μ A	130 μ A
DHT22	11 μ A	11 μ A
DS18B20	4,8 μ A	4,8 μ A
Arduino Nano Every	30 mA	24 mA
SEN55	67 mA	6,8 mA
SCD41	18 mA	400 μ A
Totaal	150 mA	50 mA

Verder is er ook onderscheid gemaakt tussen het stroomverbruik dat optreedt na de boost-converter, richting de sensornode (sensoren en microcontroller), en het stroomverbruik tussen de batterij en de boost-converter. Figuur 4.10 toont de gemeten stroom tussen de boost-converter en de load, inclusief een grafiek met piek- en dalwaarden en een weergave van het gemiddelde verbruik. In Figuur 4.11 is het gemiddelde en fluctuerende verbruik tussen de batterij en de boost-converter weergegeven.



(a) Stroomverbruik tussen boost-converter en load (sensoren, MCU)

55.69mA average	237.86mA max	5:00.4m time	16.73c charge
--------------------	-----------------	-----------------	------------------

(b) Gemiddeld verbruik tussen boost en load

Figuur 4.10: Stroomverbruik tussen boost-converter en load in PCB v1



(a) Stroomverbruik tussen batterij en boost-converter

105.44mA average	384.71mA max	5:00.4m time	31.68c charge
---------------------	-----------------	-----------------	------------------

(b) Gemiddeld verbruik tussen batterij en boost

Figuur 4.11: Stroomverbruik tussen batterij en boost-converter in PCB v1

Uit deze metingen blijkt dat het stroomverbruik aan de batterijzijde hoger ligt dan aan de kant van de boost-converter. Dit is te verklaren doordat bij een lagere batterijspanning een grotere stroom nodig is voor hetzelfde elektrische vermogen. Hieronder volgt de berekening van het geleverde vermogen en het rendement van de boost-converter.

1. Geleverd vermogen vanuit de batterij:

$$P_{\text{batt} \rightarrow \text{boost}} = U_{\text{batt}} \cdot I_{\text{batt}} = (3.92 \text{ V} - 0.21 \text{ V}) \times 0.10553 \text{ A} = 0.391 \text{ W}, \quad (4.1)$$

waarbij rekening is gehouden met een spanningsval van 0.21 V over de diode ter bescherming tegen omgekeerde polariteit.

2. Geleverd vermogen vanuit de boost-converter naar de sensornode:

$$P_{\text{boost} \rightarrow \text{load}} = U_{\text{out}} \cdot I_{\text{out}} = 3.3 \text{ V} \times 0.55 \text{ A} = 0.275 \text{ W}. \quad (4.2)$$

3. Rendement van de boost-converter:

$$\eta = \frac{P_{\text{boost} \rightarrow \text{load}}}{P_{\text{batt} \rightarrow \text{boost}}} = \frac{0.275 \text{ W}}{0.391 \text{ W}} \approx 0.702 (\approx 70.2\%). \quad (4.3)$$

Voor de voeding van het systeem is in versie 1 een MPT15-75-zonnepaneel toegepast. De gemeten stroomopbrengst onder verschillende schaduwgradaties is opgenomen in Tabel 4.3. Hierin is voor elke meting de stroom van de permanent ingeschakeld LEDs (elk circa 12 mA) gecorrigeerd om de netto oplaadstroom te bepalen. Uit de resultaten blijkt dat het paneel bij volle belasting een netto laadstroom van circa 62 mA kan leveren, terwijl bij 50% schaduw nog een kleine overschotstroom van ongeveer 6,8 mA resteert. Bij 75 % schaduw ligt de netto opbrengst onder de detectiegrens, hoewel de LEDs nog branden en er dus wel enig vermogen geleverd wordt, maar niet eenduidig meetbaar is.

Tabel 4.3: Gemeten en gecorrigeerde stroomopbrengst van het MPT15-75-zonnepaneel onder variërende schaduw

Schaduwgraad	Gemeten stroom (mA)	Gecorrigeerd (mA)
0 % (geen schaduw)	38,0	62,0
25 %	16,0	40,0
50 %	6,8	30,8
75 %	0,0	0,0
100 % (volledig)	0,0	0,0
0 % + transparant object	16,0	40,0

Met de gemeten waarden kan de verwachte operationele levensduur t van de batterij worden bepaald zonder rekening te houden met de wisselende energieopbrengst van het zonnepaneel. Voor een batterij met een capaciteit van 1800 mA h en een gemiddelde stroom van 105.53 mA geldt:

$$t_{1800} = \frac{1800 \text{ mA h}}{105.53 \text{ mA}} = 17.06 \text{ h.} \quad (4.4)$$

Voor de beoogde batterij van 5000 mA h resulteert dit in:

$$t_{5000} = \frac{5000 \text{ mA h}}{105.53 \text{ mA}} = 47.37 \text{ h.} \quad (4.5)$$

Aangezien PCB-versie 2 nog in productie is, zijn daar nog geen daadwerkelijke stroommetingen uitgevoerd. Na ontvangst van de printplaat zullen de volgende metingen plaatsvinden: sluimerverbruik van microcontroller en sensoren, actief verbruik tijdens datatransmissie, en laad- en ontlaadstromen van de batterij. Op basis van de opzet die in versie 1 is gevalideerd, kan dan worden vastgesteld of de wijzigingen (zoals de vervanging van de boost-converter door een buck-boost-converter en toevoeging van een load-schakelaar) inderdaad leiden tot lagere energierekeningen en verbeterd batterijrendement.

Hoofdstuk 5

Discussie

5.1 LoRa-componenten

LoRa Sensor Node en Gateway

De Dragino LA66 LoRaWAN Shield en de DLOS8N gateway zijn allebei afkomstig van dezelfde fabrikant, wat het opzetten en configureren van het LoRa-netwerk aanzienlijk heeft vereenvoudigd. Doordat beide modules grotendeels compatibel zijn qua softwarestack en configuratieprocedure, kon er sneller een werkend prototype gerealiseerd worden. Bovendien faciliteert het feit dat de LA66 als Arduino Shield is uitgevoerd het PCB-ontwerp voor de sensornode: er hoefde geen eigen RF-layout te worden ontwikkeld en te worden getest, waardoor het hardware-ontwerp veel minder tijd vergde dan wanneer een losse module met maatwerkantenne was toegepast. De DLOS8N-gateway bleek door zijn gebruiksvriendelijke webinterface erg eenvoudig in te stellen: vrijwel alle configuratiestappen waren intuïtief en in enkele minuten voltooid, zodat er weinig tijd verloren ging aan debugging of compatibiliteitsaanpassingen.

LoRaWAN-server

ChirpStack is vanwege zijn open-source karakter als LoRaWAN-server geselecteerd. De mogelijkheid om zonder licentiekosten aan de slag te gaan, en de actieve community eromheen, waren doorslaggevend. Bij de initiële installatie onder Windows via WSL traden echter verbindingproblemen op, waardoor de Network Server geen stabiele verbinding met de gateway kon maken. Ondanks deze hobbels is de verwachting dat dergelijke problemen niet zullen optreden wanneer de server op een dedicated platform zoals een Raspberry Pi wordt ingezet. Doordat ChirpStack op Linux-gebaseerde omgevingen zeer goed wordt ondersteund, zal de migratie naar een Raspberry Pi waarschijnlijk leiden tot een soepelere integratie en minder configuratieconflicten.

LoRaWAN Application Server

Bij de implementatie van de LoRaWAN Application Server is bewust gekozen voor een strikte scheiding tussen back-end en front-end. Hierdoor bleef de logica van het bestaande VLINDER-dashboard vrijwel ongewijzigd. De back-end verwerkt inkomende berichten, valideert en decodeert deze, en slaat de gegevens als CSV-bestanden op. Deze keuze voor CSV-opslag is gemaakt omdat het de meest directe en overzichtelijke manier bleek om sensordata te loggen zonder dat daar een bijkomende database-infrastructuur zoals MySQL of PostgreSQL voor nodig was. Op

deze wijze bleven de ontwikkeltijd en complexiteit beperkt, terwijl de visualisatie via het Vue.js-gebaseerde dashboard eenvoudig kon aansluiten op de gegenereerde CSV-bestanden.

Toekomstige plannen

Voor de volgende fase van het project staat op de planning om onderzoek te doen naar het op afstand sturen van commando's naar de sensornodes. Dit onderdeel zal pas verder worden uitgewerkt zodra PCB-versie 2 beschikbaar is en bewezen functioneel is. De verwachting is dat met een werkende hardwarebasis nieuwe firmware-mogelijkheden kunnen worden ontwikkeld om bijvoorbeeld over-the-air updates of commando's voor het aanpassen van sensorconfiguraties te realiseren.

5.2 Sensoren

Voor PCB-versie 1 is een selecte set sensoren gekozen die elk binnen hun meetdomein (temperatuur/vochtigheid, licht, CO₂, fijnstof, GPS) een goede prijs-prestatieverhouding bieden, waaronder de DHT22, DS18B20, BH1750, VMA430, SCD41 en SEN55. Deze modules communiceren via gestandaardiseerde digitale interfaces wat de firmware-integratie vereenvoudigde en tijdens de prototypingfase bijdroeg aan stabiele en foutloze dataverzameling. In praktijktests voldeden alle sensoren ruim aan de gestelde nauwkeurigheids- en reactietijdeisen en functioneerden ze zoals bedoeld.

Omdat de sensorprestaties in versie 1 aan de verwachtingen voldeden, is de sensorconfiguratie in PCB-versie 2 onveranderd gebleven. Door de bestaande sensorketen te hergebruiken, werd de ontwerp- en firmwarecomplexiteit beperkt, terwijl de betrouwbaarheid van de datastromen behouden bleef. Hiermee is verzekerd dat de tweede iteratie voortbouwt op een gevalideerde meetsamenstelling zonder onnodige aanpassingen.

5.3 PCB-Ontwerp

5.3.1 Microcontroller

In de eerste PCB-iteratie is gekozen voor de Arduino Nano Every vanwege de uitgebreide community-ondersteuning en beschikbare bibliotheken, waardoor de firmwareontwikkeling sterk werd versneld en vereenvoudigd [124]. Hoewel aanvankelijk werd gevreesd dat de klassieke Arduino Nano onvoldoende geheugen zou hebben voor alle functionaliteit, bood de Nano Every met 48 kB flash en 6 kB SRAM voldoende speling voor zowel de huidige implementatie als toekomstige uitbreidingen. Hierdoor was deze MCU bij uitstek geschikt om snel een werkend prototype op te zetten en ruimte te houden voor latere functionaliteitsuitbreiding.

Na validatie van versie 1 zijn de energie-eisen echter opnieuw geëvalueerd. Voor PCB-versie 2 is daarom overgestapt naar de STM32L071K8U3 [137]. Deze keuze is ingegeven door het professionele karakter van de STM32-serie, die in veel industriële en medische toepassingen wordt gebruikt en daardoor gunstig is voor toekomstig gebruik en onderhoud. Daarnaast biedt de STM32L0-core meerdere ultra-low-power slaapmodi, waardoor het quiescent-verbruik aanzienlijk wordt verlaagd, en beschikt de MCU over een flexibele periferie die mogelijkheden biedt voor efficiëntere firmware-architectuur.

5.3.2 Werking van de PCB firmware

Voor PCB-versie 1 is de firmware in duidelijke fasen opgebouwd, waarbij per sensor een aparte ontwikkelingsstap is genomen. Zo kon bij elke toevoeging snel worden gecontroleerd of er specifieke problemen optraden, en konden deze direct worden opgelost zonder dat de al gerealiseerde functionaliteit werd aangetast. In de eerste fase zijn de basisfunctionaliteiten geïmplementeerd: de aansturing en uitlezing van de DHT22- en DS18B20-sensoren, gecombineerd met de initiële LoRaWAN-communicatie. Zodra deze onderdelen betrouwbaar werkten, zijn achtereenvolgens de BH1750-, SCD41- en SEN55-sensoren geïntegreerd, telkens met adequate wachttijden en power-down-routines om piekstromen te spreiden en het verbruik te minimaliseren. Hierdoor bleef de firmware steeds overzichtelijk, konden regressiefouten snel worden opgespoord en bleef de ontwikkeltijd per module gering. Nadat alle sensoren correct werden uitgelezen en afzonderlijk via LoRaWAN werden verzonden, is het slaap- en wake-up-mechanisme toegevoegd volgens het uiteindelijke cyclische patroon. In de praktijk bleek deze opbouwmethode zeer effectief: de uiteindelijke firmware draaide stabiel en voldeed aan de gestelde eisen voor betrouwbaarheid en energiebeheer.

Voor PCB-versie 2 kon nog geen volledige implementatie op de doelhardware worden getest, aangezien de STM32-gebaseerde print nog niet beschikbaar was. Ter voorbereiding is echter op een STM Nucleo-ontwikkelbord al een prototype-firmware gemaakt waarin per sensor de benodigde drivers en libraries zijn opgezet, inclusief LoRa-communicatiecode. Op deze manier zijn de sensoren (DHT22, DS18B20, BH1750, SCD41, SEN55 en GPS) afzonderlijk gevalideerd onder de STM32L071K8U3-omgeving, en is de LoRa-stack alvast werkend opgedeeld in geschikte modules. Zodra de definitieve PCB in ontvangst is genomen, kan deze gefaseerde codebasis snel worden geïntegreerd en de complete firmwarecyclus worden getest, waarbij slechts minimale aanpassingen nodig zijn om de pinconfiguraties en power-managementroutines aan te sluiten op het nieuwe bord. Hierdoor wordt de doorlooptijd van versieswaps beperkt en is het risico op vertraging door onbekende hardwarefouten kleiner.

5.3.3 Overige belangrijke componenten

Voor de eerste PCB-iteratie is gekozen voor de MB85RC256VPNF-G FRAM als niet-vluchtig geheugen [138]. Dit geheugen biedt voldoende capaciteit om sensordata tijdelijk op te slaan wanneer er geen verbinding met de LoRa-gateway beschikbaar is, en garandeert door de snelle schrijfsnelheid en de vele mogelijke schrijfcycli dat de chronologische volgorde van meetdata behouden blijft. MRAM werd niet geselecteerd vanwege beperkte beschikbaarheid en hogere kostprijs. Hoewel de FRAM op v1 reeds fysiek is geïnstalleerd en getest, is de daadwerkelijke inzet ervan uitgesteld tot PCB-versie 2.

In v1 was een boost-converter (TPS61202) verantwoordelijk voor het verhogen van de batterijspanning naar 5 V om de Arduino Nano Every van stroom te voorzien [139]. Tevens werd de RT9426GQW fuel gauge aanbevolen voor later inbouwen om op afstand de batterijstatus te monitoren en onderhoud te plannen, maar leveringsproblemen maakten actieve tests hiervan in v1 niet mogelijk [142].

Voor PCB-versie 2 is het voedingsontwerp aangepast door de TPS631010 buck-boost-converter in te zetten, zodat direct een stabiele 3,3 V rail wordt gegenereerd voor de STM32L071K8U3 MCU [140]. Deze wijziging sluit aan op de lagere voedingsspanning van de STM32 en verbetert

de energie-efficiëntie wanneer de batterijspanning boven of onder 3,3 V uitkomt. Daarnaast is in v2 een FDC6329L load switch toegevoegd [143]. Dit schakelingselement maakt het mogelijk om randcomponenten, zoals extra sensoren of communicatiemodules, automatisch van stroom te voorzien of af te schakelen wanneer deze niet in gebruik zijn, zodat het totale stroomverbruik tijdens slaapmodi verder kan worden teruggebracht.

De BQ24210DQCR-batterijlader blijft in beide iteraties ongewijzigd en regelt de laadcycli op basis van adapterspanning en accustatus [141]. In PCB-versie 2 is de RT9426GQW fuel gauge inmiddels daadwerkelijk geïmplementeerd, waardoor nu real-time monitoring van spannings- en laadstatusgegevens mogelijk is. Hiermee kan predictief onderhoud worden gepland en kan het systeem automatisch schakelen naar energiebesparende modi wanneer de batterij een kritieke drempel bereikt. De in v1 geïnstalleerde FRAM wordt in de firmware van v2 geïntegreerd om tussen metingen lokaal op te slaan alvorens data via LoRaWAN te versturen. Tests van functioneren en integratie van de converter, fuel gauge en load switch volgen na ontvangst van de definitieve printplaat.

5.3.4 Vermogencircuit

In PCB-versie 1 is voor het vermogencircuit bewust gekozen voor een conservatieve opzet om de risico's in deze eerste ontwerpiteratie te beperken. Er is gebruikgemaakt van beproefde componenten en topologieën met uitgebreide documentatie, en de componentwaarden zijn met ruime marges geselecteerd om variaties in ingangsspanning en temperatuur betrouwbaar op te vangen. Uit de berekeningen blijkt dat de boost-converter een rendement van ongeveer 70,2% haalt, wat acceptabel is voor dit stadium, maar nog ruimte voor verbetering biedt. In deze fase lag de nadruk op het garanderen van een stabiele 5 V-voorziening en een correcte laadregeling, in plaats van op maximale efficiëntie. De indicator-LEDs van de batterijlader geven daarbij tijdelijk inzicht in de werking van het zonnepaneel, maar vormen ook een onnodige last; daarom is voorzien dat deze LEDs in de volgende iteratie via een schakelaar of bridge headers uitgeschakeld kunnen worden zodra de functionaliteit is geverifieerd. De positieve testresultaten uit versie 1 vormen een solide basis voor toekomstige verfijningen.

Voor PCB-versie 2 wordt verwacht dat het vermogencircuit verder geoptimaliseerd wordt, onder andere door de boost-converter te vervangen door een buck-boost-ontwerp en door een load switch toe te voegen om randcomponenten helemaal uit te schakelen. De concrete uitwerking hiervan is nog in voorbereiding.

5.3.5 Ontwerp- en lay-outoverwegingen

Tijdens de productie en assemblage van PCB-versie 1 werden twee ontwerpfouten vastgesteld. Ten eerste was bij de DS18B20-sensor per ongeluk een pull-up-weerstand van 100 k Ω geplaatst in plaats van de vereiste 10 k Ω . Deze afwijking bleek voort te komen uit een fout in de BOM bij de PCB-fabrikant. Ten tweede waren de SDA- en SCL-lijnen van de SCD41-sensor omgewisseld op de footprint, wat tijdens het overzetten van het netlist-ontwerp naar de layout was misgegaan. Beide fouten zijn inmiddels gecorrigeerd en met succes gevalideerd.

Voor PCB-versie 2 is de lay-out gebaseerd op dezelfde regels als versie 1, maar zijn aanvullende voorzieningen getroffen om toekomstige problemen te voorkomen en flexibiliteit tijdens tests te vergroten. Zo is een extra I²C-terminal toegevoegd voor optionele sensoren, zodat nieuwe

componenten eenvoudig kunnen worden aangesloten zonder de bestaande layout te wijzigen. Daarnaast zijn brugheaders opgenomen om status-LEDs tijdelijk uit te schakelen, zodat tijdens veldtesten onnodig stroomverbruik kan worden voorkomen. Omdat versie 2 nog in productie is, ontbreken functionele testresultaten, maar met deze maatregelen is gewaarborgd dat bekende valkuilen uit versie 1 niet meer optreden en dat de PCB flexibel inzetbaar blijft tijdens de validatiefase.

5.3.6 Stroommetingen en verwachte optimalisaties

De uitgevoerde metingen in PCB-versie 1 tonen dat het gemiddelde stroomverbruik dankzij firmware- en hardwareoptimalisaties is gedaald van circa 150 mA naar 50 mA, wat neerkomt op een reductie van ongeveer 66%. Door zowel het node-verbruik als de stroom tussen batterij en boost-converter te monitoren, kon het conversierendement van de boost-converter op ongeveer 70,2 % worden berekend. Hoewel deze verbetering duidelijk aantoont dat de gekozen aanpassingen effectief zijn, resulteert het huidige verbruik nog steeds in een batterijduur van slechts circa twee dagen, wat voor PCB-versie 1 onvoldoende is. Daarom heeft het verder verlagen van het stroomverbruik, onder andere door het fysiek loskoppelen van sensoren en randapparatuur met load switches wanneer ze niet actief zijn, hoge prioriteit gekregen voor PCB-versie 2.

Voor PCB-versie 2 worden op basis van de integratie van een FDC6329L-loadschakelaar en de geavanceerde slaapstanden van de STM32L071K8U3-MCU aanzienlijke verbeteringen in idle-verbruik verwacht. Sensornodes en randmodules kunnen fysiek van de voeding worden losgekoppeld, terwijl de MCU in een ultra-low-power modus blijft, waardoor het verbruik in rust vrijwel naar nul toe kan gaan. Hierdoor zal het gemiddelde stroomverbruik aanzienlijk onder de 50 mA van versie 1 uitkomen, wat naar verwachting een operationele levensduur van meerdere dagen op een batterijlading mogelijk maakt. Tests van deze optimalisaties worden uitgevoerd zodra de definitieve PCB beschikbaar is.

Hoofdstuk 6

Besluit

In dit onderzoek werd beoogd een betaalbaar, betrouwbaar en energie-efficiënt sensornetwerk voor stedelijke hittestressmonitoring te ontwikkelen, en de verzamelde gegevens efficiënt te verwerken voor grootschalige inzet. De kernvraag luidde: hoe kan een dergelijk sensorsysteem worden ontwikkeld en geoptimaliseerd, en hoe kunnen de meetresultaten via een LoRa-netwerk worden verzameld en geanalyseerd?

Allereerst is vastgesteld dat voor een accurate inschatting van hittestress de parameters luchttemperatuur, relatieve luchtvochtigheid, stralingsintensiteit, licht, CO₂-concentratie en fijnstofniveaus onmisbaar zijn, aangevuld met GPS-coördinaten. Temperatuur en luchtvochtigheid vormen de basis, terwijl luchtkwaliteits- en lichtgegevens het microklimaat op straatniveau verduidelijken. GPS-data maakt ruimtelijke clustering en kaartvisualisatie mogelijk.

Bij de sensorselectie is steeds gezocht naar een optimale balans tussen meetnauwkeurigheid, energieverbruik en kostprijs. Digitale sensoren zoals DHT22 (temperatuur/vochtigheid), DS18B20 (stralingsmetingen), BH1750 (lux), SCD41 (CO₂) en SEN55 (fijnstof) voldeden aan de gestelde criteria, waren relatief goedkoop in bulk en eenvoudig te integreren. De VMA430-GPS leverde voldoende locatieprecisie zonder onnodig stroomverbruik. Deze combinatie bleek in proefopstellingen robuust en low-cost.

Om dataverkeer efficiënt te maken in stedelijke omgevingen is gekozen voor LoRa. In PCB-versie 1 zijn de Dragino LA66-sensormodule en de DLOS8N-gateway toegepast, met Adaptive Data Rate om zendcycli te minimaliseren. De open-source ChirpStack-stack verzorgde gestandaardiseerde verwerking en forwarding naar de Python-backend. In urbane omgevingen met hoge gebouwen en interferenties bleek het bereik van ≥ 2 km per gateway toereikend, mits gunstige opstelling en antennemontage.

PCB-versie 1 vormde de eerste iteratie en leverde een stabiele 5 V-rail, maar het stroomverbruik bleef met circa 50 mA, na optimalisaties, nog te hoog voor een acceptabele batterijlevensduur. Daarom is een tweede iteratie gemaakt. In PCB-versie 2 is de vaste boost-converter vervangen door een buck-boost-topologie om direct een stabiele 3,3 V-rail te genereren, passend bij de STM32L071K8U3-MCU. Tevens zijn load switches toegevoegd om het quiescent-verbruik drastisch te laten dalen wanneer de node in sleepmodus gaat. De RT9426GQW fuel gauge is in deze iteratie ook operationeel voor real-time batterijmonitoring, en de FRAM-opslag is behouden voor tijdelijke datacaching bij signaalverlies. Deze aanpassingen beogen een verdere daling van het stroomverbruik en bieden een solide basis voor langere autonome werking.

De validatie en visualisatie van data is gerealiseerd via een op Flask gebaseerd Python-script dat inkomende payloads decodeert, sensorwaarden in CSV logt en meetrijen samenvoegt tot uniforme JSON-objecten. In het aangepaste VLINDER-dashboard worden deze gegevens dynamisch weergegeven, zodat beleidsmakers en onderzoekers hittestresspatronen op wijk- en straatniveau direct kunnen interpreteren en vergelijken. Zowel real-time analyses via de REST-API als historische trendbeschouwingen verlopen op deze manier probleemloos.

Samenvattend beantwoordt dit project de onderzoeksvraag door in twee iteraties een modulair, low-power sensornetwerk te realiseren dat alle essentiële parameters meet met zorgvuldig gekozen sensoren. Met de wetenschappelijk onderbouwde hardwarekeuzes, de LoRa-infrastructuur en de data-verwerkingspipeline is een robuuste proof-of-concept neergezet voor grootschalige hittestressmonitoring in stedelijke omgevingen. Tegelijkertijd biedt de opzet voldoende ruimte voor verdere schaalvergroting, verfijning van energiemanagement en integratie van geavanceerde analysemethoden in volgende fases.

Literatuurlijst

- [1] U.S. Environmental Protection Agency, “Heat island effect.” <https://www.epa.gov/heatislands>, 2016. Geraadpleegd op 22 april 2025.
- [2] M. Santamouris, *Energy and Climate in the Urban Built Environment*. London, UK: Routledge, 2011.
- [3] World Health Organization, “Climate change and health.” <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/climate-change-and-health>, 2018. Geraadpleegd op 22 april 2025.
- [4] X. Li, L. C. Stringer, and M. Dallimer, “The impacts of urbanisation and climate change on the urban thermal environment in africa,” *Climate*, vol. 10, no. 11, p. 164, 2022.
- [5] B. Obe and T. E. Morakinyo, “A systematic review of urban heat island studies in west africa,” in *SUPTM 2022: 1st Conference on Future Challenges in Sustainable Urban Planning & Territorial Management*, 2022.
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change, “Chapter 9: Africa,” tech. rep., IPCC Working Group II, Sixth Assessment Report, 2022.
- [7] J. J. Kunda, S. N. Gosling, and G. M. Foody, “The effects of extreme heat on human health in tropical africa,” *International Journal of Biometeorology*, vol. 68, pp. 1015–1033, 2024.
- [8] A. A. Thompson, L. Matamale, and S. D. Kharidza, “Impact of climate change on children’s health in limpopo province, south africa,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 9, no. 3, pp. 831–854, 2012.
- [9] C.-Y. Sun, S. Kato, and Z. Gou, “Application of low-cost sensors for urban heat island assessment: A case study in taiwan,” *Sustainability*, vol. 11, no. 10, p. 2759, 2019.
- [10] M. Cho, C. Park, S. Kim, J.-W. Hong, and J. Park, “Quantification of urban heat islands using automatic weather station data and smart-city networks,” *Journal of Climate Change Research*, vol. 14, no. 3, pp. 202–207, 2023.
- [11] D. T. Young, L. Chapman, C. L. Muller, C. Grimmond, and X. Cai, “A low-cost wireless temperature sensor: Evaluation for use in environmental monitoring applications,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 31, no. 4, pp. 938–944, 2014.
- [12] S. Vujovic Smolarski, B. Haddad, L. H. Karky, N. Sebaibi, and M. BOUTOUIL, “Urban heat island: Causes, consequences, and mitigation measures with emphasis on reflective and permeable pavements,” *CivilEng*, vol. 2, pp. 459–484, 06 2021.

- [13] M. Nuruzzaman, "Urban heat island: Causes, effects and mitigation measures -a review," *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, vol. 3, pp. 67–73, 03 2015.
- [14] R. Armah, Z. Ning, Y. Twumasi, J. D. Osei, B. Masasi, M. Anokye, and P. Loh, "Mapping the spatial distribution of urban heat island in scotlandville in the louisiana state of usa using satellite remote sensing," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLVIII-M-5-2024, pp. 9–14, 03 2025.
- [15] M. You, R. Lai, J. Lin, and Z. Zhu, "Quantitative analysis of a spatial distribution and driving factors of the urban heat island effect: A case study of fuzhou central area, china," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, no. 24, 2021.
- [16] G. Guida, K. Richter-Lunn, and M. Bechthold, "Thermal-material priming: The influence of building materials on thermal perception and tolerance in immersive virtual environments," *Building and Environment*, vol. 266, p. 112073, 2024.
- [17] Z. Liu, J. Li, and T. Xi, "A review of thermal comfort evaluation and improvement in urban outdoor spaces," *Buildings*, vol. 13, no. 12, 2023.
- [18] The Guardian, "Botanical gardens most effective green space at cooling urban areas during heatwaves." <https://www.theguardian.com/environment/2024/feb/23/botanical-gardens-most-effective-green-space-at-cooling-streets-in-heatwaves>, Feb. 2024. Geraadpleegd op 23 april 2025.
- [19] N. A. Gezer, "The effects of construction materials on thermal comfort in residential buildings; an analysis using ecotect 5.0," m.s. thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, July 2003.
- [20] M. A. Borg, J. Xiang, O. Anikeeva, D. Pisaniello, A. Hansen, K. Zander, K. Dear, M. R. Sim, and P. Bi, "Occupational heat stress and economic burden: A review of global evidence," *Environmental Research*, vol. 195, p. 110781, apr 2021. Epub 2021 Jan 29.
- [21] M. Morrissey-Basler, G. Brewer, W. Williams, T. Quinn, and D. Casa, "Impact of occupational heat stress on worker productivity and economic cost," *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 64, 09 2021.
- [22] Angeli, Mehta, "Countries slow to wake up to mounting deaths from heat stress." Reuters, Mar. 2024.
- [23] B. Katie, "Heat-related injuries to workers in the americas have soared since 2000, study finds." Business Insider, July 2024.
- [24] World Health Organization, "Heat and health." WHO Fact Sheet, May 2024.
- [25] P. Rupareliya, "Cost analysis for iot deployment for your project." Medium, 2023.
- [26] K. N, S, "Service delivery cost analysis of iot platforms." DiVA Portalen, 2017.
- [27] Sustainability Directory, "What are the costs of sensor deployment?." Energy Sustainability Directory, 2025.

- [28] P. Mathur, R. H. Nielsen, N. R. Prasad, and R. Prasad, “Cost benefit analysis of utilising mobile nodes in wireless sensor networks,” *Wireless Personal Communications*, vol. 83, no. 3, pp. 2333–2346, 2015.
- [29] S. Park and J. Byun, “Design of a mass-customization-based cost-effective internet of things sensor system in smart building spaces,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 12, 08 2016.
- [30] F. Beştepe and S. Özkan Yildirim, “Acceptance of iot-based and sustainability-oriented smart city services: A mixed methods study,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 80, p. 103794, 2022.
- [31] M. Saunila, M. Nasiri, J. Ukko, and L. Gastaldi, “Managing social sustainability with iot implementation: An industry 5.0 perspective,” *Sustainable Development*, 03 2025.
- [32] F. Zeng, C. Pang, and H. Tang, “Sensors on internet of things systems for the sustainable development of smart cities: A systematic literature review,” *Sensors*, vol. 24, p. 2074, 03 2024.
- [33] C. Li and W. Lao, “Internet of things’ sustainability effects: quantile and temporal insights,” *Humanities and Social Sciences Communications*, vol. 12, 03 2025.
- [34] UNFCCC, “Monitoring and evaluation of adaptation at the national and subnational level,” technical paper, UNFCCC, June 2023.
- [35] IPCC, “Summary for policymakers,” tech. rep., Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022.
- [36] UNFCCC, “Adaptation and resilience.” <https://unfccc.int>, 2021.
- [37] B. Kallfelz Sirmacek and R. Vinuesa, “Remote sensing and ai for building climate adaptation applications,” *Results in Engineering*, vol. 15, p. 100524, 07 2022.
- [38] N. Amy, “How ai is arming cities in the battle for climate resilience.” Reuters, May 2024.
- [39] L. Villani, L. Gugliermetti, M. Barucco, and F. Cinquepalmi, “A digital twin framework to improve urban sustainability and resiliency: The case study of venice,” *Land*, vol. 14, p. 83, 01 2025.
- [40] M. Zumwald, B. Knüsel, D. N. Bresch, and R. Knutti, “Mapping urban temperature using crowd-sensing data and machine learning,” *Urban Climate*, vol. 35, p. 100739, 2021.
- [41] L. Karen, “How sensor data can help cities improve public spaces.” Axios, Feb. 2019.
- [42] World Health Organization and World Meteorological Organization, “Heatwaves and health: guidance on warning-system development,” tech. rep., World Health Organization and World Meteorological Organization, 2016.
- [43] UNFCCC, “Too hot to handle.” <https://unfccc.int>, July 2021.
- [44] UNDRR, “Climate action and disaster risk reduction.” <https://undrr.org>, 2019.
- [45] UNDRR, “Evaluation of the sendai framework monitoring system,” executive summary, UNDRR, 2024.
- [46] UNFCCC, “Nap technical guidelines,” tech. rep., UNFCCC, 2024.

- [47] Inmarsat, “Case study: Smart city kigali, rwanda,” case study, Inmarsat, Jan. 2017.
- [48] Clean Air Catalyst, “Airqo: Air quality monitoring system for african cities.” <https://aqmx.org>, 2023.
- [49] J. Jeffy, “Singapore’s first solar energy run sensor network to scale smart nation vision,” *Geospatial World*, Feb. 2023.
- [50] E. Bainomugisha, J. Ssematimba, and D. Okure, “Design considerations for a distributed low-cost air quality sensing system for urban environments in low-resource settings,” *Atmosphere*, vol. 14, p. 354, 02 2023.
- [51] Center for Digital Society, “Case study: Singapore from smart city to smart nation,” tech. rep., UGM CfDS, 2019.
- [52] Campbell Scientific, “Blackglobe-l: Temperature sensor for measuring heat stress.” <https://www.campbellsci.com/blackglobe>, n.d. Geraadpleegd op 22 april 2025.
- [53] Kestrel Instruments, “Kestrel 5400 heat stress tracker.” <https://kestrelinstruments.com/kestrel-5400-heat-stress-tracker>, n.d. Geraadpleegd op 22 april 2025.
- [54] M. Sulzer, A. Christen, and A. Matzarakis, “A low-cost sensor network for real-time thermal stress monitoring and communication in occupational contexts,” *Sensors*, vol. 22, no. 5, p. 1828, 2022.
- [55] N. H. Nguyen, H. X. Nguyen, T. T. B. Le, and C. D. Vu, “Evaluating low-cost commercially available sensors for air quality monitoring and application of sensor calibration methods for improving accuracy,” *Open Journal of Air Pollution*, vol. 10, no. 01, pp. 1–17, 2021.
- [56] “Ergonomics of the thermal environment — assessment of heat stress using the wbgt (wet bulb globe temperature) index,” International Standard ISO 7243:2017, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2017.
- [57] K. Blazejczyk, Y. Epstein, G. Jendritzky, H. Staiger, and B. Tinz, “Comparison of utci to selected thermal indices,” *International Journal of Biometeorology*, vol. 56, no. 3, pp. 515–535, 2012.
- [58] S. Zare, N. Hasheminejad, H. Shirvan, R. Hemmatjo, and S. Ahmadi, “Comparing universal thermal climate index (utci) with selected thermal indices/environmental parameters during 12 months of the year,” *Weather and Climate Extremes*, vol. 19, pp. 49–57, 03 2018.
- [59] M. Zaman, N. Puryear, S. Abdelwahed, and N. Zohrabi, “A review of iot-based smart city development and management,” *Smart Cities*, vol. 7, no. 3, pp. 1462–1501, 2024.
- [60] P. James, J. Jonczyk, L. Smith, N. Harris, T. Komar, D. Bell, and R. Ranjan, “Realizing smart city infrastructure at scale, in the wild: A case study,” *Frontiers in Sustainable Cities*, vol. Volume 4 - 2022, 2022.
- [61] M. Poyyamozi, B. Murugesan, N. Rajamanickam, M. Shorfuzzaman, and Y. Aboelmagd, “Iot—a promising solution to energy management in smart buildings: A systematic review, applications, barriers, and future scope,” *Buildings*, vol. 14, no. 11, 2024.

- [62] Infopulse, “Iot energy management: Benefits, use cases, and challenges.” <https://www.infopulse.com/blog/iot-energy-management>, 2024. Geraadpleegd op 23 april 2025.
- [63] STMicroelectronics, “Stm32 ultra low power microcontrollers.” <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-ultra-low-power-mcus.html>, 2025. Geraadpleegd op 23 april 2025.
- [64] Espressif Systems, “Low power modes – esp32.” <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/api-guides/low-power-mode/index.html>, 2025. Geraadpleegd op 23 april 2025.
- [65] S. Barge and M. Gerardine, “Low power techniques for internet of things implementation: A review,” *Multidisciplinary Reviews*, vol. 7, no. 12, p. 2024306, 2024.
- [66] Telit Cinterion, “Designing cellular iot devices for battery life.” <https://www.telit.com/resources/whitepapers/designing-cellular-iot-devices-for-battery-life/>, 2024. Geraadpleegd op 23 april 2025.
- [67] M. E. Yuksel and H. Fidan, “Energy-aware system design for batteryless lpwan devices in iot applications,” *Ad Hoc Networks*, vol. 122, p. 102625, 2021.
- [68] H. Kaur and A. Buttar, “A review on solar energy harvesting wireless sensor network,” *International Journal of Computer Sciences and Engineering*, vol. 7, pp. 398–404, 02 2019.
- [69] F. Wu, C. Rüdiger, and M. R. Yuce, “Real-time performance of a self-powered environmental iot sensor network system,” *Sensors*, vol. 17, no. 2, 2017.
- [70] D. Urazayev and D. Zorbas, “Using supercapacitors as a sustainable energy storage solution for battery-less iot devices,” 06 2024.
- [71] LoRa Alliance Technical Marketing Workgroup, “White Paper: A Technical Overview of LoRa and LoRaWAN,” Nov. 2015. LoRa Alliance Whitepaper, Version 1.0.
- [72] S. Corporation, “AN1200.22 LoRa Modulation Basics,” tech. rep., Semtech, May 2015. Application Note, Revision 2.0.
- [73] The Things Network, “LoRaWAN Architecture (Star-of-Stars Network Topology).” <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture/>, 2021.
- [74] RAKwireless, “Lorawan, zigbee, wifi, ble, and nb-iot.” News, RAKwireless, <https://news.rakwireless.com/lorawan-vs-zigbee-vs-ble-vs-wifi-vs-nb-iot/>, 2024. Geraadpleegd op 23 april 2025.
- [75] TEKTELIC, “Lorawan vs. nb-iot, sigfox, and lte: Which iot technology is right for you?.” Whitepaper, <https://tektelic.com/expertise/lorawan-vs-nb-iot-sigfox-and-lte-comparison/>, Mar. 2025. Geraadpleegd op 23 april 2025.
- [76] AGC LED, “Comparing lora, zigbee, and nb-iot/cat1 for smart street light.” AGC LED Blog, <https://www.agcled.com/blog/comparing-lora-zigbee-nb-iotcat-smart-street-light.html>, Apr. 2024. Geraadpleegd op 23 april 2025.
- [77] DFRobot, “Lorawan and zigbee, wifi, nb-iot.” DFRobot Blog, <https://www.dfrobot.com/blog-1646.html>, 2023. Geraadpleegd op 23 april 2025.

- [78] Y. Zhao, L. Wang, Z. Liu, Y. Xu, F. Dang, X. Wang, H. Zhao, and X. Miao, “A Comprehensive Evaluation of Bluetooth Low Energy Mesh,” in *Proceedings of the 30th IEEE ICPADS*, pp. 544–551, 2024.
- [79] S. M. Darroudi and C. Gomez, “Bluetooth low energy mesh networks: A survey,” *Sensors*, vol. 17, 06 2017.
- [80] Wi-Fi Alliance, “Wi-fi halow — worth the wait.” Beacon, Wi-Fi Alliance, <https://www.wi-fi.org/beacon/kevin-walsh/wi-fi-halow-worth-the-wait>, n.d. Geraadpleegd op 23 april 2025.
- [81] L. Kane, V. Liu, M. Mckague, and G. Walker, “An experimental field comparison of wi-fi halow and lora for the smart grid,” *Sensors*, vol. 23, p. 7409, 08 2023.
- [82] C. Li, H. Zhang, B. Hao, and J. Li, “A survey on routing protocols for large-scale wireless sensor networks,” *Sensors*, vol. 11, pp. 3498–3526, 03 2011.
- [83] N. M. Freris, H. Kowshik, and P. R. Kumar, “Fundamentals of large sensor networks: Connectivity, capacity, clocks, and computation,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, no. 11, pp. 1828–1846, 2010.
- [84] S. Nourildean, M. Hassib, and Y. Mohammed, “Internet of things based wireless sensor network: a review,” *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 27, pp. 246–261, 07 2022.
- [85] A. Heidari, Z. Amiri, M. A. J. Jamali, and N. Jafari, “Assessment of reliability and availability of wireless sensor networks in industrial applications by considering permanent faults,” *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, vol. 36, no. 27, p. e8252, 2024.
- [86] V. Tomat, A. P. Ramallo-González, and A. F. Skarmeta Gómez, “A comprehensive survey about thermal comfort under the iot paradigm: Is crowdsensing the new horizon?,” *Sensors (Basel)*, vol. 20, p. 4647, aug 2020.
- [87] W. Song and J. K. Calautit, “Inclusive comfort: A review of techniques for monitoring thermal comfort among individuals with the inability to provide accurate subjective feedback,” *Building and Environment*, vol. 257, p. 111463, 03 2024.
- [88] C. Chillón Geck, H. Alsaad, C. Voelker, and K. Smarsly, “Personalized low-cost thermal comfort monitoring using iot technologies,” *Indoor Environments*, vol. 1, p. 100048, 09 2024.
- [89] O. Veisi, A. Attarhay Tehrani, B. Gharaei, D. Du, and A. Shakibamanesh, “Towards universal thermal climate index prediction via machine learning approaches,” 04 2025.
- [90] P. Bröde, D. Fiala, and B. Kampmann, “Application of statistical learning algorithms in thermal stress assessment in comparison with the expert judgment inherent to the universal thermal climate index (utci),” *Atmosphere*, vol. 15, no. 6, 2024.
- [91] S. Ogata, M. Takegami, T. Ozaki, T. Nakashima, D. Onozuka, S. Murata, Y. Nakaoku, K. Suzuki, A. Hagihara, T. Noguchi, K. Iihara, K. Kitazume, T. Morioka, S. Yamazaki, T. Yoshida, Y. Yamagata, and K. Nishimura, “Heatstroke predictions by machine learning, weather information, and an all-population registry for 12-hour heatstroke alerts,” *Nature Communications*, vol. 12, p. 4575, 07 2021.

- [92] S. N. Ssebyala, T. M. Kintu, D. J. Muganzi, C. Dresser, M. R. Demetres, Y. Lai, K. Mercy, C. Li, F. Wang, S. Setoguchi, L. A. Celi, and A. K. Ghosh, “Use of machine learning tools to predict health risks from climate-sensitive extreme weather events: A scoping review,” *PLOS Climate*, vol. 3, pp. 1–14, 01 2024.
- [93] InfluxData, “Get started with grafana and influxdb.” <https://grafana.com/docs/grafana/latest/getting-started/get-started-grafana-influxdb/>, 2025. Geraadpleegd op 23 april 2025.
- [94] ThingsBoard, “Thingsboard — open-source IoT platform.” <https://thingsboard.io/>, 2025. Geraadpleegd op 23 april 2025.
- [95] Divyakohli, “Data analytics for IoT with python.” Medium, <https://medium.com/@divyakohli70/data-analytics-for-iot-with-python-b1b770bca3bd>, 2023. Geraadpleegd op 23 april 2025.
- [96] OpenRemote, “100% open source IoT device management platform.” <https://openremote.io/>, 2025. Geraadpleegd op 23 april 2025.
- [97] M. Technology, “RN2483 LoRa Technology Transceiver Module Data Sheet,” Tech. Rep. DS50002346C, Microchip Technology Inc., 2017.
- [98] Dragino, “LA66 LoRaWAN Module User Manual.” <https://www.dragino.com/products/lora/item/23-la66-lorawan-module.html>, 2023.
- [99] M. Technology, “WLR089U0 Low Power LoRa Sub-GHz Module Data Sheet,” Tech. Rep. DS70005435B, Microchip Technology Inc., 2021.
- [100] Dragino, “DLOS8N Outdoor LoRaWAN Gateway – Product Info.” <https://www.dragino.com/products/lora-lorawan-gateway/item/225-dlos8n.html>, 2021.
- [101] Dragino, “LG01v2 Single Channel LoRa Gateway – Product Info.” <https://www.dragino.com/products/lora-lorawan-gateway/item/244-lg01v2.html>, 2020.
- [102] C. P. O. Brocaar), “ChirpStack LoRaWAN Network Server (Documentation).” <https://www.chirpstack.io>, 2023.
- [103] T. T. Industries, “The Things Stack LoRaWAN Network Server.” <https://www.thethingsindustries.com/stack/>, 2023.
- [104] LoRa Alliance, “LoRaWAN Backend Interfaces 1.1 Specification,” Tech. Rep. TS002-1.1.0, LoRa Alliance, 2020.
- [105] L. Aosong Electronics Co., “Digital-output relative humidity & temperature sensor module dht22 (am2302) datasheet,” 2018.
- [106] L. Aosong Electronics Co., “Am2320 digital temperature and humidity sensor product manual,” 2016.
- [107] S. AG, “Datasheet sht3x-dis (sht31/sht35 humidity and temperature sensor),” 2022.
- [108] M. Integrated, “Ds18b20 programmable resolution 1-wire digital thermometer datasheet,” 2019.

- [109] Y. N. GmbH, “M222 platinum rtd temperature sensor (pt100/pt1000) datasheet (din en iec 60751),” 2024.
- [110] L. ROHM Co., “Bh1750fvi ambient light sensor ic (16-bit digital output) datasheet,” 2011.
- [111] T. A. O. S. T. Inc., “Tsl2560, tsl2561 light-to-digital converter datasheet,” 2009.
- [112] V. Semiconductors, “Veml7700 high accuracy ambient light sensor with i²c interface datasheet,” 2024.
- [113] V. NV, “Vma430 gps module (u-blox neo-7m) user manual,” 2019.
- [114] u-blox AG, “Neo-6 (u-blox 6 gps module) data sheet,” 2011.
- [115] u-blox AG, “Neo-m8 (u-blox m8 gnss module) data sheet,” 2022.
- [116] S. AG, “Scd4x co₂ sensor module (scd40/scd41) datasheet,” 2022.
- [117] S. AB, “Senseair s8 low power co₂ sensor specification,” 2024.
- [118] L. Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., “Mh-z19b ndir co₂ module datasheet,” 2017.
- [119] S. AG, “Environmental sensor node sen5x datasheet,” 2022.
- [120] L. Plantower Technology Co., “Pms5003 digital universal particle concentration sensor data manual,” 2016.
- [121] L. Nova Fitness Co., “Sds011 laser pm2.5 sensor specification,” 2015.
- [122] Arduino, “Arduino UNO R3 Datasheet,” 2025.
- [123] Arduino, “Arduino Nano Datasheet,” 2025.
- [124] Arduino, “Arduino Nano Every Datasheet,” 2025.
- [125] E. Systems, “ESP32-WROOM-32 Datasheet,” 2025.
- [126] E. Systems, “ESP32-WROVER-E and ESP32-WROVER-IE Datasheet,” 2024.
- [127] E. Systems, “ESP32-S3 Series Datasheet,” 2025.
- [128] STMicroelectronics, “STM32F103x8/xB Datasheet,” 2023.
- [129] STMicroelectronics, “STM32U575xx Datasheet,” 2024.
- [130] STMicroelectronics, “STM32L476xx Datasheet,” 2024.
- [131] M. T. Inc., “I²c serial eeprom family data sheet,” tech. rep., Microchip Technology Inc., 2007.
- [132] F. S. Limited, “Memory fram 4 m (512k ×8) bit spi (mb85rs4mt) data sheet,” tech. rep., Fujitsu Semiconductor Limited, 2018.
- [133] I. Everspin Technologies, “256k ×16 mram memory (mr2a16a) data sheet,” tech. rep., Everspin Technologies, Inc., 2018.
- [134] R. T. Corporation, “Rt9426 system-side single-cell fuel gauge data sheet,” tech. rep., Richtek Technology Corporation, 2024.

- [135] STMicroelectronics, “Stc3100 battery monitor ic with coulomb counter/gas gauge data sheet,” tech. rep., STMicroelectronics, 2009.
- [136] B. Mesuere, “VLINDER API and dashboard.” <https://github.com/bmesuere/vlinder>, 2022. GitHub repository, version 1.3.0, Aug. 18, 2022.
- [137] STMicroelectronics, “DS10690 Rev. 7: STM32L071x8 STM32L071xB STM32L071xZ — Access line ultra-low-power 32-bit MCU Arm®-based Cortex®-M0+, up to 192 KB Flash, 20 KB SRAM, 6 KB EEPROM, ADC.” Datasheet, STMicroelectronics, Nov. 2019. Rev. 7.
- [138] Fujitsu Semiconductor, “MB85RC256V 256-Kbit Ferroelectric RAM (FRAM) Datasheet.” <https://www.fujitsu.com/uk/Images/MB85RC256V-20171207.pdf>, 2015. Accessed: May 2025.
- [139] Texas Instruments, “TPS61202 Low Input Voltage Synchronous Boost Converter With 1.3-A Switches Datasheet.” <https://www.ti.com/lit/ds/slvs577>, 2024. Rev. E; Accessed: May 2025.
- [140] Texas Instruments, “SLVSGO6B: TPS631010 and TPS631011 1.5A Output Current, Buck-Boost Converters in Small Wafer Chip Scale Package.” Datasheet, Texas Instruments, Dec. 2022. Revised January 2025 (Rev. B).
- [141] Texas Instruments, “BQ24210 800-mA Single-Cell Li-Ion Battery Charger Datasheet.” <https://www.ti.com/lit/gpn/BQ24210>, 2023. Accessed: May 2025.
- [142] Richtek Technology Corporation, “RT9426 System Side Single Cell Fuel Gauge Datasheet.” https://www.richtek.com/assets/product_file/RT9426/DS9426-02.pdf, 2025. Accessed : May2025.
- [143] onsemi, “FDC6329L/D: Integrated Load Switch, Rev. 5.” Datasheet, onsemi, Oct. 2024. Publication Order Number: FDC6329L/D.

Bijlage A

Bijlage - LoRa-componenten

A.1 Vergelijking van sensor node modules

In Tabel A.1 wordt een overzicht gegeven van vijf gangbare LoRa-sensornodemodules, met aandacht voor zend- en ontvangstkenmerken en energieverbruik [97], [98], [99].

Tabel A.1: Vergelijking van LoRa sensor node modules

Module	Freq. (MHz)	P_{TX} (dBm)	Sens. (dBm)
Dragino LoRa Shield	433/868/915	+20	-148
WLR089U0	863-928	+18,6	-136
RN2483	433/868	+14	-146
RN2903	915	+18,5	-146
LA66 LoRaWAN Module	150-960	+22	-148

Dragino LoRa Shield

Het Dragino LA66 LoRa Shield is gebaseerd op de Semtech SX1276/78-transceiver en biedt een maximaal zendvermogen van 20 dBm met een gevoeligheid tot -148 dBm, wat neerkomt op een theoretisch linkbudget van 168 dB. Door het Arduino Shield-formaat is snelle prototyping mogelijk. Het stroomverbruik in ontvangstmodus is 10.3 mA en de minimale slaapstroom is 0.2 mA [98].

WLR089U0

De WLR089U0-module integreert een ARM Cortex-M0+-microcontroller met een Semtech LoRa-transceiver in een compacte SMT-behuizing ($17 \times 13,5$ mm). Het ondersteunt een frequentiebereik van 863 MHz-928 MHz, levert maximaal 18.6 dBm en kent een sleep-stroom van minder dan 2 μ A [99].

Microchip RN2483 en RN2903

De RN2483 (433/868 MHz) en RN2903 (915 MHz) modules bevatten een on-board LoRaWAN-stack en bieden een eenvoudige UART-interface. De maximale zendvermogens bedragen respectievelijk 14 dBm en 18.5 dBm, met gevoelheden tot -146 dBm. Beide modules beschikken over een sleep-stroom van circa 1.6 μ A [97].

LA66 LoRaWAN Module

De LA66-module is uitgerust met een geïntegreerde LoRaWAN v1.0.3-stack, een TCXO en wereldwijde OTAA-sleutels. Met een maximaal zendvermogen van 22 dBm en een gevoeligheid tot -148 dBm bereikt hij een theoretisch linkbudget van 170 dB. De sleep-stroom blijft onder $4\text{ }\mu\text{A}$ [98].

A.2 Vergelijking van LoRa-gateways

Twee representatieve gateways worden vergeleken in Tabel A.2: de DLOS8N (multi-channel LoRaWAN) en de LG01v2 (single-channel, peer-to-peer) [100], [101].

Kenmerk	DLOS8N	LG01v2
LoRa-concentrator	SX1302 + $2\times$ SX1250 (10 ch, -140 dBm)	Enkelkanaalsmodule
CPU	AR9331 @ 400 MHz	Cortex-A7 @ 1.2 GHz
Backhaul	RJ45 (PoE), WiFi, USB, mini-PCIE	RJ45, WiFi
Voeding	12–24 V DC / PoE	5 V DC @ 2 A
Omgeving	IP65, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\dots+85\text{ }^{\circ}\text{C}$	Indoor, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\dots+65\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tabel A.2: Overzicht van de technische specificaties.

De DLOS8N is geschikt voor robuuste, outdoor LoRaWAN-implementaties; de LG01v2 biedt een betaalbare indooroplossing voor peer-to-peer-toepassingen.

A.3 LoRaWAN-serveropties

LoRaWAN-servers zijn in te delen in open source, commerciële SaaS-oplossingen en cloudprovider-integraties. Hieronder worden twee gangbare platforms beknopt gepresenteerd:

ChirpStack

Een modulair, zelf-te-hosten netwerkserverplatform met Gateway Bridge, Network Server, Application Server en optionele Join Server. Het biedt multitenancy, een uitgebreide webinterface, REST- en gRPC-API's en integraties met PostgreSQL, MQTT en diverse cloudservices [102].

The Things Stack (Community Edition)

De opvolger van TTN v3, waarin Network Server en Application Server in een enkele stack zijn verenigd. Beschikbaar als gratis editie met basis ADR, apparaat- en gatewaybeheer via open API's, en ondersteund door een wereldwijde community [103].

A.4 LoRaWAN Application Server

Een LoRaWAN Application Server biedt een webgebaseerd portaal waarmee eindgebruikers sensordata kunnen visualiseren, analyseren en beheren. Typische functionaliteiten omvatten:

- Data-dashboards en grafieken voor real-time en historische data.
- Instellingen voor waarschuwingen en notificaties op basis van drempelwaarden.

- Beheer van apparaten, applicatiesleutels en gebruikersrechten.
- API-toegang (REST/MQTT) voor integratie met externe systemen.

Voor de implementatie van een Application Server bestaan er twee hoofdopties:

Zelf ontwikkelen

Ontwikkel een webapplicatie met front-end frameworks en back-end services, waardoor volledige controle over functionaliteit, ontwerp en beveiliging mogelijk is.

Gebruik van templates of SaaS

Maak gebruik van bestaande open-source dashboardoplossingen of commerciële SaaS-platformen zoals The Things Stack Console [104].

Bijlage B

Bijlage - Sensoren

In deze bijlage worden de verschillende typen sensoren besproken die gebruikt kunnen worden binnen het onderzoeksproject. Elke sensor wordt apart behandeld.

Temperatuur- en relatieve luchtvochtigheidssensoren

Drie gangbare sensortypen DHT22, AM2320 en SHT31/SHT35 worden kort vergeleken in Tabel B.1 [105], [106], [107].

Tabel B.1: Vergelijking temperatuur- en vochtigheidssensoren

Sensor	Temp. bereik (°C)	RH bereik (%)	Nauwkeurigheid (°C; % RH)	Max. sampling (Hz)
DHT22	-40...+80	0-100	±0,5; ±2-5	0,5
AM2320	-40...+80	0-100	±0,5; ±3	≈ 1
SHT31/SHT35	-40...+125	0-100	±0,3; ±1,5	≥ 10

De DHT22 is goedkoop maar relatief traag en minder stabiel bij snelle wisselingen. De AM2320 levert iets snellere sampling en betere robuustheid voor een bescheiden meerprijs. De SHT31/SHT35 biedt de hoogste nauwkeurigheid en updatefrequentie, tegen hogere kosten.

Temperatuursensoren voor stralingsmetingen

Twee gebruikelijke sensoren DS18B20 en PT100/PT1000 worden vergeleken in Tabel B.2 [108], [109].

Tabel B.2: Vergelijking temperatuursensoren voor stralingsmetingen

Sensor	Temp. bereik (°C)	Nauwkeurigheid (°C)	Max. sampling (Hz)
DS18B20	-55...+125	±0,5	≤ 1
PT100/PT1000	-200...+850	±0,1	≥ 10

De DS18B20 is goedkoop, eenvoudig te bedraden en waterdicht leverbaar, maar kent een lage samplingsnelheid en beperkte absolute nauwkeurigheid. De PT100/PT1000 biedt daarentegen hoge lineariteit en nauwkeurigheid bij hogere samplingsfrequenties, maar vereist extra meetbruggen, versterking en kalibratie en is complexer in bedrading.

Lux-sensoren

Drie gangbare lux-sensoren BH1750, TSL2561 en VEML7700 worden kort vergeleken in Tabel B.3 [110], [111], [112].

Tabel B.3: Vergelijking lux-sensoren

Sensor	Bereik (lux)	Resolutie (lux)
BH1750	1–65.535	1
TSL2561	0,1–40.000	0,1
VEML7700	0–120.000	0,0036

De BH1750 beschikt over een ingebouwde ADC en optische voorschakeloptiek, waardoor hij direct inzetbaar is binnen- en buitenshuis. De TSL2561 maakt onderscheid tussen IR- en zichtbaar licht en biedt een breed dynamisch bereik, wat hem geschikt maakt voor daglichtmetingen. De VEML7700 valt op door zeer laag ruststroomverbruik, maar vertoont minder lineariteit boven circa 7.500 lux.

GPS-modules

Drie gangbare modules VMA-430, u-blox NEO-6M en NEO-M8N worden kort vergeleken in Tabel B.4 [113], [114], [115].

Tabel B.4: Vergelijking GPS-modules

Module	Protocollen	Acc. (m)	Cold start (s)	Stroom (mA)
VMA-430	GPS, GLONASS, Galileo, SBAS	$\pm 2,5$	≈ 27	≈ 28
NEO-6M	GPS, SBAS	$\pm 2,5$	≈ 35	≈ 45
NEO-M8N	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou	$\pm 2,5$	≤ 10	≈ 24

De VMA-430 is compact en multi-GNSS, maar kent een relatief trage fixtijd. De NEO-6M is wijdverbreid en betaalbaar, maar biedt alleen GPS. De NEO-M8N onderscheidt zich door een zeer snelle fix en breed multi-GNSS-support, tegen iets hogere kosten en afmetingen.

CO₂-sensoren

Drie veelgebruikte CO₂-sensoren SCD41, Senseair S8 en MH-Z19B worden kort vergeleken in Tabel B.5 [116], [117], [118].

Tabel B.5: Vergelijking CO₂-sensoren

Sensor	Bereik (ppm)	Nauwkeurigheid
SCD41	400–5 000	$\pm(30 \text{ ppm} + 3 \% \text{ meting})$
Senseair S8	350–2 000	$\pm(30 \text{ ppm} + 3 \% \text{ meting})$
MH-Z19B	0–5 000	$\pm(50 \text{ ppm} + 5 \% \text{ meting})$

De SCD41 biedt compacte NDIR-detectie met ingebouwde temperatuur- en vochtcompensatie tegen hogere kosten. De Senseair S8 is robuust en beproefd, maar vereist een hogere voedingsspanning. De MH-Z19B is goedkoop en populair voor hobbyprojecten.

Fijnstofsensoren

Drie gangbare fijnstofsensoren SEN5x, Plantower PMS5003 en Nova SDS011 worden kort vergeleken in Tabel B.6 [119], [120], [121].

Tabel B.6: Vergelijking fijnstofsensoren

Sensor	Bereik (PM in $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Update-rate (Hz)
SEN5x	PM1.0, PM2.5, PM4, PM10	≤ 1
PMS5003	PM2.5, PM10	≤ 1
SDS011	PM2.5, PM10	≤ 1

De SEN5x levert betrouwbare real-time data met geïntegreerde temperatuur- en vochtcompensatie via I²C, maar heeft een relatief hoge kostprijs. De Plantower PMS5003 is goedkoop en breed inzetbaar via UART. De Nova SDS011 is robuust bij hoge deeltjesconcentraties via UART, maar presteert minder accuraat in zeer schone lucht en vereist externe T/RH-correctie.

Bijlage C

Bijlage - Microcontrollers

Arduino Drie Arduino-varianten Uno, Nano en Nano Every worden kort vergeleken in Tabel C.1 [123], [122], [124].

Tabel C.1: Vergelijking Arduino-varianten

Parameter	Uno	Nano	Nano Every
Core	ATmega328P, 16 MHz	ATmega328P, 16 MHz	ATmega4809, 20 MHz
Flash / SRAM	32 KB / 2 KB	32 KB / 2 KB	48 KB / 6 KB
Digitale / Analoge I/O	14 / 6	14 / 8	20 / 8
Voeding	5 V	5 V	5 V
Ecosysteem	Zeer groot	Groot	Matig

De Uno is ideaal voor instaprojecten dankzij het uitgebreide ecosysteem. De Nano biedt een compact formaat bij gelijkwaardige specificaties, terwijl de Nano Every extra rekenkracht en geheugen levert ten koste van iets hoger stroomverbruik en minder community-ondersteuning.

ESP32 Drie ESP32-modules WROOM-32, WROVER en S3 zijn samengevat in Tabel C.2 [126], [125], [127].

Tabel C.2: Vergelijking ESP32-modules

Parameter	WROOM-32	WROVER	S3
Core	Dual LX6, 240 MHz	Dual LX6, 240 MHz	Dual LX7-achtig, 240 MHz
Flash	4 MB	4–8 MB	2–8 MB
PSRAM	–	4 MB	Optioneel
Wi-Fi / Bluetooth	Ja / Ja	Ja / Ja	Ja / Ja
USB-OTG	Nee	Nee	Ja

De WROOM-32 is de standaardmodule zonder extern geheugen. De WROVER voegt 4 MB PSRAM toe voor intensievere toepassingen. De S3 biedt USB-OTG en AI-gerichte instructies.

STM32 Drie STM32-series F, U en L zijn vergeleken in Tabel C.3 [128], [130], [129].

De F-serie is geschikt voor veeleisende embedded toepassingen. De U-serie voor ultra-low-power IoT. De L-serie combineert lage stroom en redelijke prestaties voor draagbare toepassingen.

Samenvatting Vergelijking van Arduino, ESP32 en STM32 op hoofdlijnen in Tabel C.4.

Tabel C.3: Vergelijking STM32-series			
Parameter	STM32F	STM32U	STM32L
Core	M3/M4/M7, 32–480 MHz	M0+/M3, ≤ 80 MHz	M0/M3, ≤ 80 MHz
Flash	≤ 2 MB	≤ 512 KB	≤ 1 MB
SRAM	≤ 512 KB	≤ 128 KB	≤ 256 KB
Stopcurrent	≈ 1 μ A	$\approx 0,14$ μ A	$\approx 0,1$ μ A
Use-case	High-performance	Ultra low-power	Low-power

Tabel C.4: Algemene vergelijking microcontroller-platforms			
Parameter	Arduino	ESP32	STM32
Architectuur	8-bit AVR	32-bit Xtensa LX6	32-bit Cortex-M
Kloksnelheid	16–20 MHz	240 MHz	32–480 MHz
Flash / SRAM	32–48 KB / 2–6 KB	4–8 MB / 520 KB	0,5–2 MB / 0,1–0,5 MB
Connectiviteit	–	Wi-Fi / BT	UART, SPI, I ² C, CAN
Stroomverbruik (actief)	50 mA	80–240 mA	50 μ A–mA
Ecosysteem	Zeer groot	Groot	Professioneel
Complexiteit	Laag	Middel	Hoog
Kosten	Laag	Gemiddeld	Gemiddeld–hoog

Bijlage D

Bijlage - Extra componenten

Memory Drie geheugentypes EEPROM, FRAM en MRAM worden samengevat in Tabel D.1 [131], [132], [133].

Tabel D.1: Vergelijking geheugenopties

Parameter	EEPROM	FRAM	MRAM
Technologie	Flash-achtig	Ferro-elektrisch	Magnetoresistief
Schrijfcycli	10^5 – 10^6	$> 10^{15}$	$> 10^{15}$
Schrijfsnelheid	1–4 ms/byte	< 100 ns/byte	< 35 ns/byte
Interface	I ² C/SPI	I ² C/SPI	SPI
Kosten	Laag	Gemiddeld	Hoog

De EEPROM is goedkoop en betrouwbaar voor eenvoudige datalogging maar kent beperkte snelheid en schrijfcycli. FRAM biedt vrijwel ongelimiteerde cyclustolerantie en zeer snelle schrijfacties tegen gemiddelde kosten. MRAM combineert duurzaamheid en lage latentie tegen hogere kostprijs en beperkte beschikbaarheid.

Battery monitoring / Fuel Gauge Twee fuel gauge ICs RT9426GQW en STC3100 worden vergeleken in Tabel D.2 [134], [135].

Tabel D.2: Vergelijking Fuel Gauge ICs

Parameter	RT9426GQW	STC3100
Coulomb counting	Ja	Ja
Spanning/nauwkeurigheid	$\pm 1\%$	$\pm 2\%$
Temperatuurscompensatie	Ja	Ja
Interface	I ² C	I ² C
Voedingsspanning	2,7–5,5 V	2,7–4,5 V
Kosten	Gemiddeld	Laag

De RT9426GQW integreert een coulomb counter met hoge nauwkeurigheid en temperatuurcompensatie in een compacte QFN-24 behuizing. De STC3100 biedt eenvoudige I²C-uitlezing via een ingebouwde ADC voor spanning en temperatuur.

Bijlage E

Bijlage - LoRa-componenten

LoRa Sensor Node

De geselecteerde LoRa-sensornode is de Dragino LA66 LoRaWAN Shield (Tabel E.1). Deze module ondersteunt zowel LoRaWAN v1.0.3 als een open-source peer-to-peer LoRa-protocol en bevat een TCXO voor gestabiliseerde RF-prestaties bij extreme temperaturen. De RF-antenne wordt via een SMA-connector aangesloten en de communicatie met een externe microcontroller verloopt via UART met AT-commando's. Dezelfde interface wordt gebruikt voor firmware-upgrades. Elke module bevat een unieke, wereldwijde OTAA-sleutel voor automatische registratie in een LoRaWAN-netwerk. Het frequentiebereik beslaat 150-960 MHz, met een maximaal uitgangsvermogen van +22 dBm en een gevoeligheid van -148 dBm [98].

Tabel E.1: Technische specificaties van de Dragino LA66 LoRaWAN Shield

Parameter	Value
CPU	32-bit, 48 MHz
Flashgeheugen	256 KB
RAM	64 KB
werkingsspanning	3,3 V
Slaapstroomverbruik	$\leq 4 \mu\text{A}$
Tx-stroom @ +17 dBm / +22 dBm	$\leq 90 \text{ mA}$ / 108 mA
Rx-stroom	$\leq 9 \text{ mA}$
Operationeel temperatuurbereik	$-40^\circ\text{C} \dots +85^\circ\text{C}$
Opslagtemperatuurbereik	$-55^\circ\text{C} \dots +125^\circ\text{C}$
RF-gevoeligheid	-148 dBm

LoRa Gateway

De geselecteerde gateway is de Dragino DLOS8N Outdoor LoRaWAN Gateway (Tabel E.2), een open-source Embedded Linux-platform voor het koppelen van LoRa-netwerken aan een IP-backbone via Ethernet (PoE), WiFi of optioneel 3G/4G. De DLOS8N ondersteunt zowel de Semtech UDP Packet Forwarder als LoRaWAN Station en maakt gebruik van een SX1302-concentrator met twee SX1250 front-ends voor multi-channel forwarding. Beheer is mogelijk via een web-GUI of SSH, terwijl de IP65-gecertificeerde behuizing met bliksembescherming en ingebouwde GPS betrouwbaarheid in veeleisende buitenomgevingen garandeert [100].

LoRaWAN Server

Tabel E.2: Technische specificaties van de Dragino DLOS8N Gateway

Parameter	Specificatie
LoRa-concentrator	SX1302 + 2× SX1250 (10 kanalen, −140 dBm)
Processor & geheugen	AR9331 @ 400 MHz, 64 MB RAM, 16 MB Flash
Backhaul	10/100 M RJ45 (PoE), WiFi 802.11b/g/n, USB 2.0,
Packet forwarding	Semtech UDP Forwarder, LoRaWAN Station
Beheerinterface	Web-GUI, SSH
Voeding	12–24 VDC, 2 A; IEEE 802.3af PoE
Behuizing & omgeving	IP65, bliksembescherming, −20...+85 °C, GPS

De gekozen LoRaWAN-server is ChirpStack. ChirpStack is een modulair, open-source netwerkserver-stack, opgebouwd uit de ChirpStack Gateway Bridge, Network Server en Application Server. De Gateway Bridge ontvangt inkomende UDP-pakketten van LoRa-gateways en vertaalt deze naar MQTT-berichten of HTTP POST-berichten voor de Network Server. De Network Server voert deduplicatie van uplink-berichten uit, verwerkt LoRaWAN-protocolfuncties zoals OTAA en ABP, past ADR toe en plant downlink-transmissies. De Application Server verzorgt de decoding van device-payloads, apparaatbeheer en integraties via HTTP- en gRPC-API's naar externe systemen. ChirpStack ondersteunt meerdere tenants, metrics-monitoring via Prometheus en Grafana, en is ontworpen voor horizontale schaalbaarheid en hoge beschikbaarheid in productieomgevingen. Dankzij de MIT-licentie is ChirpStack vrij te gebruiken voor zowel test- als productiedoeleinden, en het ondersteunt alle LoRaWAN-versies en regionale parameters voor wereldwijde implementaties [102].

Bijlage F

Bijlage - Sensoren PCB v1/v2

De volgende sensoren zijn geselecteerd voor PCB versie 1:

Temperatuur- en Relatieve Luchtvochtigheidssensor: DHT22

De DHT22 is een digitale sensor voor temperatuur en relatieve luchtvochtigheid, met een meetbereik van $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ tot $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ voor temperatuur en $0\text{--}100\text{ \%RH}$ voor luchtvochtigheid. De sensor communiceert via een single-businterface en kent een resolutie van $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en $0,1\text{ \%RH}$, met een nauwkeurigheid van $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en $\pm 2\text{ \%RH}$ [105].

Temperatuursensor voor stralingsmetingen: DS18B20

De DS18B20 is een 1-Wire digitale thermometer met programmeerbare resolutie van 9 tot 12 bits, een meetbereik van $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ tot $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ en een nauwkeurigheid van $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ tussen $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ en $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Elke DS18B20 beschikt over een uniek 64-bits serienummer, wat het mogelijk maakt om meerdere sensoren op een databus te koppelen [108].

Lux-sensor: BH1750 De BH1750 is een I²C-gebaseerde omgevingslichtsensor met 16-bits direct-naar-lux conversie en optioneel instelbare meettijd voor optimale nauwkeurigheid. De sensor vereist geen externe componenten en ondersteunt standaard- en fast-mode I²C-communicatie [110].

GPS-module: VMA430 De VMA430 is een outdoor GPS/GLONASS-module gebaseerd op de u-blox NEO-7M chipset. De module ondersteunt tot 56 kanalen, werkt op $3,3\text{--}5\text{ V}$ en biedt een TTL-UART-interface met een standaard baudrate van 9600 bps en een PPS-uitgang voor tijdssynchronisatie [113].

CO₂-sensor: SCD41 De Sensirion SCD41 is een compacte PASens® NDIR CO₂-sensor met een meetbereik van $400\text{--}5000\text{ ppm}$, gekoppeld aan een geïntegreerde temperatuur- en vochtmeting. De sensor communiceert via I²C, heeft automatische zelfkalibratie en verbruikt gemiddeld $0,4\text{ mA}$ bij 5 V in 1 meting per 5 minuten [116].

Fijnstofsensor: SEN55 De Sensirion SEN55 is een all-in-one luchtkwaliteitsmodule die PM₁, PM_{2,5}, PM₄ en PM₁₀, VOC-index, NO_x-index, relatieve luchtvochtigheid en temperatuur meet. De sensor levert volledig gekalibreerde meetwaarden via I²C en voldoet aan RESET® en WELL Building Standard™-vereisten [119].

Bijlage G

Bijlage - Microcontroller PCB v1

De geselecteerde microcontroller is de Arduino Nano Every, geïntroduceerd in 2019 als een pin-compatibele evolutie van de klassieke Arduino Nano, en voorzien van verbeterde geheugen- en verwerkingscapaciteiten. Het bord integreert een Microchip ATmega4809 AVR-microcontroller, voorzien van 48 kB flashgeheugen, 6 kB SRAM en 256 B EEPROM voor programmaopslag en dataverwerking. De voedingsspanning bedraagt 5 V en de microcontroller draait op een kloksnelheid van 20 MHz [124].

Het bord biedt 20 digitale I/O-pinnen en acht analoge ingangen met 10-bit ADC-resolutie, waardoor veelzijdige sensoraansturing mogelijk is. Communicatie met randapparatuur wordt ondersteund via UART, SPI en I²C-interfaces, en de USB-connectiviteit wordt verzorgd door een ATSAMD11D14A Arm Cortex-M0+ co-processor, die fungeert als USB-naar-seriële brug. De onboard spanningsregelaar levert zowel 5 V als 3,3 V uitgangen, waarbij de maximale stroom 20 mA per I/O-pin en 100 mA op de 3,3 V-uitgang bedraagt [124].

Bijlage H

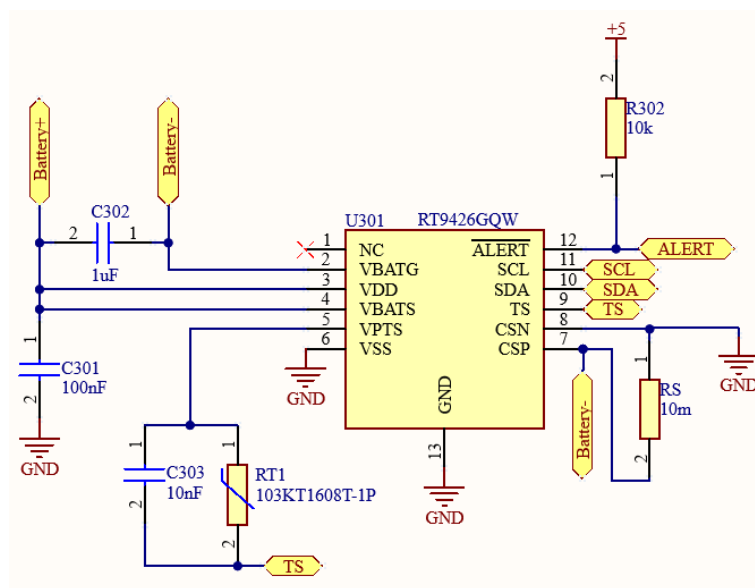
Bijlage - Overige belangrijke componenten PCB v1

Non-volatile geheugen: MB85RC256VPNF-G-JNERE1 De MB85RC256VPNF-G-JNERE1 is een 256-Kbit ($32\,768 \times 8$) FRAM-chip met een I²C-interface tot 1 MHz, geschikt voor voeding tussen 2,7 V en 5,5 V, met een duurzaamheid van meer dan 10^{15} schrijfcycli en een gegevensretentie van minstens 10 jaar bij kamertemperatuur [138]. Het actieve stroomverbruik bedraagt typisch ≈ 3 mA, terwijl de standby-stroom ≈ 1 μ A is.

Boost-converter: TPS61202DRCT De TPS61202DRCT is een synchrone boost-converter van Texas Instruments, ontworpen voor ingangsspanningen vanaf 0,3 V tot 5,5 V met een vaste uitgangsspanning van 5 V en interne schakelaars van 1,3 A [139]. De converter werkt op 1,25 MHz, heeft een quiescent-stroom van ongeveer 55 μ A en behaalt piekefficiënties tot 95%.

Battery Charger: BQ24210DQCR De BQ24210DQCR is een lineaire laad-IC voor enkelcelig Li-Ion/Li-Polymeer batterijen met een programmeerbare laadstroom tot 800 mA en een vaste laadeindspanning van 4,2 V [141]. Het integreert pre-charge, constant current en constant voltage fasen, beschikt over thermische regeling en bescherming tegen overspanning.

Battery Monitor / Fuel Gauge: RT9426GQW De RT9426GQW is een fuel gauge IC van Richtek dat de State of Charge (SOC), State of Health (SOH), Full Charge Capacity, Time To Empty en Cycle Count berekent volgens het Voltage Gauge with Current Sensing (VGCS) algoritme [142]. Het ondersteunt een voedingsspanning van 2,5 V tot 5,5 V en communiceert via I²C. De spanningsnauwkeurigheid is $\pm 7,5$ mV, de stroommeting $\pm 1\%$. Figuur H.1 toont aan hoe deze wordt aangesloten.



Figuur H.1: Aansluitingsschema Battery Monitor

Bijlage I

Bijlage - Berekeningen PCB v1

Berekening Batterijlader (BQ24210DQCR)

- **Laadstroominstelling via I_{SET} .** Volgens de datasheet geldt

$$R_{ISET} = \frac{K_{ISET}}{I_{LADEN}}, \quad K_{ISET} = 390. \quad (I.1)$$

Voor een gewenste laadstroom $I_{LADEN} \approx 0,57$ A nemen we $R_{ISET} = 680 \Omega$, hetgeen resulteert in $I_{LADEN} = \frac{390}{680} \approx 0,574$ A.

- **Load-mode uitschakeling.** De BQ24210 ondersteunt “load mode”, waarbij de batterij het VBUS-netwerk van stroom kan voorzien. Om onbedoelde terugvoeding te voorkomen is de EN-pin permanent verbonden met PG (power-good). Hierdoor wordt load mode automatisch uitgeschakeld zodra er geen externe voeding op VBUS aanwezig is. Voor testdoeleinden is een jumper voorzien tussen EN en GND om load mode handmatig te activeren.
- **Dynamisch power-management (VDPM-pin).** Wanneer VDPM onverbonden blijft, regelt de BQ24210 de ingangsspanning net boven de batterijspanning. Dit zorgt ervoor dat de batterij opgeladen wordt bij stromen I_{SET} , zonder dat de ingangsspanning te ver boven de celspanning uitstijgt.
- **Thermistor voor temperatuurdetectie.** Een externe 103AT-4 NTC-thermistor (datasheet: $R_{25} = 4911 \Omega$) monitort de batterijtemperatuur. De weerstand van de bijbehorende RT1-netwerkweerstand berekenen we als:

$$R_{T1} = \frac{1}{\beta^{-1}} R_{25} - R_{25}, \quad \beta^{-1}(0 - 25 \text{ °C}) = 0,186 \quad (I.2)$$

$$R_{T1} = \frac{1}{0,186} \times 4911 \Omega - 4911 \Omega \approx 21,492 \text{ k}\Omega. \quad (I.3)$$

We kiezen de dichtstbijzijnde 1%-standaardwaarde 21,5 k Ω .

Berekening Boost-Converter (TPS61202DRCT)

1. **Minimale inductantie.**

Voor een maximale stroomrimpel $\Delta I_L = 1,0 \text{ A}$ en een aanstuurtijd $t_{\text{on}} = 0,5 \text{ }\mu\text{s}$ geldt:

$$L_{\text{min}} = \frac{V_{\text{in}} t_{\text{on}}}{\Delta I_L} = V_{\text{in}} \times \frac{0,5 \text{ }\mu\text{s}}{1 \text{ A}} = 2,75 \text{ }\mu\text{H}. \quad (\text{I.4})$$

We kiezen een standaardspoel van $L = 3,3 \text{ }\mu\text{H}$.

2. Maximale spoelstroom.

$$I_{L,\text{max}} = \frac{V_{\text{out}} I_{\text{out}}}{\eta V_{\text{in,max}}} + \frac{V_{\text{in,max}} (V_{\text{out}} - V_{\text{in,max}})}{2 V_{\text{out}} f_s L}, \quad (\text{I.5})$$

met $f_s = 1,5 \text{ MHz}$, $V_{\text{in,max}} = 4,2 \text{ V}$, $V_{\text{out}} = 5,0 \text{ V}$, $I_{\text{out}} = 0,6 \text{ A}$ en $\eta \approx 0,8$. Invullen geeft

$$I_{L,\text{max}} \approx 0,893 + 0,081 = 0,974 \text{ A}.$$

Kies een spoel met $I_{\text{sat}} \geq 1 \text{ A}$.

3. Uitgangscapaciteit.

Volgens de datasheet is $C_{\text{out}} 5 \times L$. Met $L = 3,3 \text{ }\mu\text{H}$ volgt

$$C_{\text{out}} 5 \times 3,3 \text{ }\mu\text{H} = 16,5 \text{ }\mu\text{F}. \quad (\text{I.6})$$

We selecteren daarom een $22 \text{ }\mu\text{F}$ keramische condensator.

4. Dimensionering van de UVLO-spanningsdeler.

$$R_4 = R_5 \left(\frac{V_{\text{in,min}}}{V_{\text{UVLO}}} - 1 \right), \quad V_{\text{in,min}} = \left(\frac{R_4}{R_5} + 1 \right) V_{\text{UVLO}}. \quad (\text{I.7})$$

Met $V_{\text{UVLO}} = 0,25 \text{ V}$ en $R_5 = 249 \text{ k}\Omega$ volgt:

$$R_4 = 249 \text{ k}\Omega \times \left(\frac{2,52}{0,25} - 1 \right) \approx 2,26 \text{ M}\Omega, \quad (\text{I.8})$$

en ter controle:

$$V_{\text{in,min}} = \left(\frac{2,26}{0,249} + 1 \right) \times 0,25 \approx 2,52 \text{ V}. \quad (\text{I.9})$$

Bijlage J

Bijlage - werking firmware PCB v1

1. **Initialisatie van sensoren en randapparatuur (30 s).** Direct na het opstarten wordt een sequentiële initialisatie uitgevoerd voor alle aangesloten sensoren, waaronder de DHT22, DS18B20, BH1750, SCD41, SEN55 en de GPS-module (VMA430). Vanwege de lange acquisition time van de GPS-module wordt een wachttijd van circa 30 seconden gehanteerd om een eerste locatiefix te kunnen ontvangen. Gedurende deze fase wordt tevens gecontroleerd of de LoRa-transceiver (Dragino LA66) erin slaagt om een verbinding met de gateway tot stand te brengen. Zolang er geen succesvolle netwerkverbinding is, wordt de meetroutine uitgesteld.
2. **Verbindingstoetsing met de LoRa-gateway.** De firmware blijft in een polling-lus totdat de LA66-transceiver een bevestiging ontvangt dat er een Route-to-Network (RTN) mogelijk is. Pas nadat de transceiver een join of een succesvolle heartbeat met de gateway heeft uitgevoerd, wordt overgegaan tot het meten van sensorwaarden. Dit garandeert dat alle gemeten data direct via LoRaWAN kan worden doorgestuurd zonder buffer-ophoping.
3. **Sequentiële metingen en verzenden via LoRa (per sensor een bericht).** Aangezien LoRaWAN slechts zeer beperkte payloadlengtes toestaat, wordt elke individuele sensorsignaalmeting apart verwerkt en verzonden. De volgorde is als volgt:
 - (a) Uitvoeren van een DHT22-metingscyclus (temperatuur en relatieve luchtvochtigheid), converteren van de meetresultaten naar het juiste dataformaat, en direct verzenden van dit enkele datapakket via de LA66-transceiver.
 - (b) Wachten 5 s om radio-duty-cycle beperkingen na te leven en piekstromen te spreiden.
 - (c) De DS18B20 uitlezen (strainingsmeting), omzetten naar ASCII-payload en verzenden.
 - (d) Op dezelfde wijze achtereenvolgens de BH1750 (lichtintensiteit), SCD41 (CO₂-concentratie) en SEN55 (fijnstof, temperatuur, luchtvochtigheid) meten en elk resultaat afzonderlijk verzenden.
 - (e) Tot slot ontvangt de PCB de GPS-locatiewaarden en stuurt deze eveneens als afzonderlijk LoRa-pakket.

Na iedere afzonderlijke verzendactie wordt de bijbehorende sensormodule, indien mogelijk, uitgeschakeld of in een low-power modus gezet om onnodig quiescent-verbruik te voorkomen. Zo schakelt de firmware na het uitlezen de SEN55- en GPS-modules uit, en wordt

de SCD41-sensor in single-shot-modus aangestuurd om na de meting automatisch in een slaapstand te gaan.

4. **Slaapfase (5 minuten).** Wanneer alle sensoren eenmaal zijn uitgelezen en alle bijbehorende metingen zijn verzonden, zet de firmware de Arduino in de laagste sleep-modus. De microcontroller verbruikt in deze stand slechts enkele tientallen microampères, terwijl de sensoren volledig uitgeschakeld blijven. Deze rustperiode bedraagt vijf minuten, waarna de MCU zichzelf via de interne Watchdog of een timerwaaksignaal wekt.
5. **Herstart van de meetcyclus.** Na vijf minuten activeert de firmware de voedingslijnen van de GPS- en SEN55-modules en wacht circa 30 seconden om opnieuw een GPS-fix te verkrijgen en de SEN55 klaar te maken voor fijnstofmetingen. Vervolgens herhaalt de firmware stap 3 (sequentiële metingen en verzending) en gaat na het voltooiën van alle sensoren terug in de slaapfase.

Door deze opzet – met gestructureerde initialisatie, strikte netwerktoetsing, sequentiële sensormetingen en periodieke slaapfasen – is PCB-versie 1 in staat om op een energiezuinige manier data te verzamelen en te versturen. De individuele verzending van elke sensormeting minimaliseert payload-complicaties, terwijl het uitschakelen van modules direct na meting het quiescent-verbruik tot een minimum beperkt. Deze werkwijze heeft als doelstelling om de operationele levensduur op een batterij van 1800 mA h (of later 5000 mA h) zo lang mogelijk te rekken, zonder verlies van databetrouwbaarheid en netwerkindegriteit.

Bijlage K

Bijlage - Microcontroller PCB v2

De geselecteerde microcontroller is de STM32L071K8U3 van STMicroelectronics, geïntroduceerd in 2015 als onderdeel van de ultra-low-power STM32L0-serie met een 32-bit ARM Cortex-M0+ [137]. De MCU beschikt over 192 kB Flash-geheugen met ECC, 20 kB SRAM en 6 kB data-EEPROM, waarmee zowel programma's als variabelen betrouwbaar worden opgeslagen. De voedingsspanning varieert van 1.65 V tot 3.6 V, en de maximale kloksnelheid bedraagt 32 MHz.

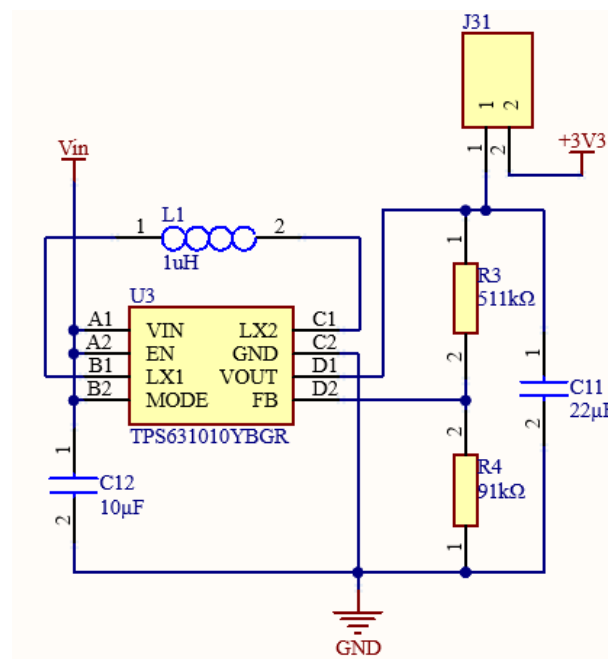
Voor de interfacing zijn tot 84 digitale I/O-pinnen beschikbaar, evenals een 12-bit ADC met maximaal 16 kanalen en twee ultra-low-power comparatoren. Communicatie met randapparatuur verloopt via vier USART-kanalen, een low-power UART, twee SPI-buslijnen en drie I²C-buslijnen.

Verder biedt de MCU elf timers waaronder 16-bit, ultra-low-power timers, een SysTick en een RTC en geïntegreerde vermogens- en beveiligingsfuncties zoals brown-out- en power-down detectors, wat bijdraagt aan de betrouwbaarheid in energiebeperkte toepassingen.

Bijlage L

Bijlage - Overige belangrijke componenten PCB v2

Buck-boost-converter: TPS631010 De TPS631010 van Texas Instruments [140] vervangt in deze versie de oorspronkelijke boost-converter. Dankzij de buck-boost-architectuur levert hij een stabiel 3.3 V uitgangsvermogen wat aansluit op de voedingsbehoefte van de STM32L-series. Figuur L.1 toont het gebruikte aansluitschema volgens de datasheet.



Figuur L.1: Aansluitschema Buck-Boost: TPS631010

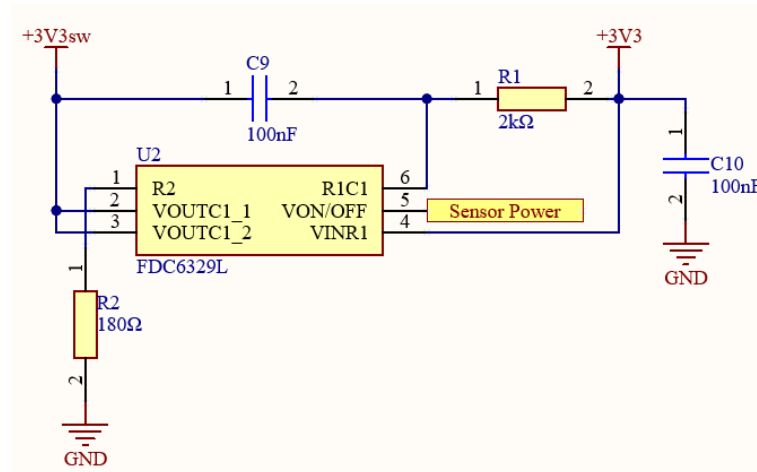
Battery Charger: BQ24210DQCR Het laadcircuit is identiek aan die in versie 1 en wordt verzorgd door de BQ24210DQCR. Functies zoals laadstroominstelling, dynamisch power-management en temperatuurmonitoring blijven ongewijzigd.

Battery Monitor / Fuel Gauge: RT9426GQW In deze revisie is de RT9426GQW fuel gauge geïntegreerd. Hierdoor is real-time monitoring van batterijspanning, -stroom en -temperatuur mogelijk, wat de veiligheid en betrouwbaarheid verhoogt.

Loadschakelaar: FDC6329L

In PCB versie 1 bleek dat de sensornode in rusttoestand nog ruim 50 mA bleef gebruiken, zelfs wanneer het systeem geen actieve taken uitvoerde. Om dit quiescent-verbruik te verlagen, is in versie 2 de geïntegreerde loadschakelaar FDC6329L toegepast [143]. Deze schakelt de voedingslijn naar de sensoren af wanneer de ON/OFF-ingang laag is en zorgt bij een hoge ingang automatisch voor een spanningsdoorlaat van 2.5 V tot 8 V, met een typische spanningsval V_{DROP} van slechts 0.20 V bij 2.8 A belastingsstroom. Hierdoor kan het ruststroomverbruik worden teruggebracht tot onder de 5 mA die als ontwerpdoel is gesteld.

Figuur L.2 toont het aansluitingsschema zoals voorgeschreven in de datasheet, inclusief de benodigde aansturingsweerstand en een ontkoppelcondensator voor stabilisatie van de gate-driver.



Figuur L.2: Aansluitschema Load Switch: FDC6329L