



Zelfstandige Luchtdruk Sensormodule

Bachelorscriptie | O. Schutter



8 APRIL 2022
VERSIE: 3

DE HAAGSE
HOGESCHOOL

SCHUTTER, OLIVIER

STUDENTENNUMMER:

EMAIL:

OPLEIDING: MECHATRONICA

1^E DOCENTBEGELEIDER: H. M. MAKKINK MSc

2^E DOCENTBEGELEIDER: V. BARFI MASIHI MSc

STAGECOÖRDINATOR: S. VERSPAANDONK - DE JONG MSc

AFSTUDEERADRES: KUBO INNOVATIONS, HAVENSTRAAT 51 MONSTER

BEDRIJFSBEGELEIDER: N. GROEN MSc

EMAIL:

INLEIDING

De kassenbouwer KUBO levert totaalprojecten. In opdracht van klanten worden standaardkassen of maatwerk gepland, berekend en gebouwd. Het innovatieve product van KUBO, de zogeheten Ultra-Clima® kas, is een semi-hermetisch gesloten kas waar alle lucht wordt aangevoerd, voorbereid en gecontroleerd. Op deze manier wordt het klimaat binnen deze kas nauw geregeld om door de tuinder optimaal te kunnen worden ingesteld. Hiervoor worden filters, ventilatoren, radiatoren en een verwarmingssysteem gebruikt. Dit geheel wordt aangestuurd door een klimaatcomputer, digitaal beheerd door het hoofdkantoor of direct door de klanten zelf. De klimaatcomputer past instellingen toe, maar maakt nog geen autonome beslissingen. De behandelde lucht wordt op overdruk gebracht in grote buizen die door de hele kas lopen. Deze verdelen dit door via gaten over de hele lengte langzaam lucht te laten ontsnappen. De ventilatorsnelheid wordt actief geregeld, maar dynamische informatie over bijvoorbeeld de luchtsnelheid en luchtdruk in de buizen is niet voorhanden.

Om dit regelsysteem te verbeteren is live sensordata nodig. Deze scriptie beschrijft het ontwerpproces van een zelfstandige sensormodule en de bijbehorende infrastructuur voor het verwerken van data die actieve feedback kan geven aan dit systeem. Dit sensorsysteem moet permanent in de kassen kunnen worden geïnstalleerd. Het ontwerp beschrijft een zelfstandig systeem dat sensordata doorstuurt naar de servers van KUBO. Omdat binnen het luchtverversingssysteem de overdruk en de daaruit voortvloeiende luchtsnelheid in de buizen de meest waardevolle informatie is wordt bij deze afstudeerstage de focus gelegd op verkregen meetwaarden van de luchtdruk in de buizen.

Inhoud

Begrippenlijst	5
1 Hoofdstukindeling	7
2 Projectomschrijving	8
2.1 Probleemstelling	8
2.2 Opdrachtomschrijving	8
2.3 Doelstelling	8
3 Ontwerpmethodologie	10
3.1 PvA	10
3.2 Planning	10
11	
3.3 Programma van eisen	11
3.4 Opzet prototype	11
3.5 Aanbevelingen	12
4 Ontwerpanalyse	13
4.1 Systeemeisen	13
4.2 Randvoorwaarden	14
4.2.1 Elektronica	14
4.2.2 Software	15
4.2.3 Uitbreidbaarheid	15
4.2.4 Veiligheid	15
4.2.5 Internet of Things	16
4.3 Deelfuncties	19
4.3.1 Luchtdruksensor	21
4.3.2 Sensorplaatsing	24
4.3.3 Voeding	24
4.3.4 Gegevensoverdracht	26
4.3.5 Besturingsstructuur	36
4.4 Morfologisch overzicht	37
4.5 Concepten	38
4.5.1 Rode concept	39
4.5.2 Blauwe concept	39
4.5.3 Gele concept	39
4.5.4 Groene concept	40
5 Ontwerp	40
5.1 Conceptkeuze	40
5.2 Componenten	41
5.2.1 Luchtdruksensor	41

5.2.2	LPS22HH	41
5.2.3	Sensorplaatsing	42
5.2.4	Voeding	42
5.2.5	Gegevensoverdracht	43
5.2.6	Besturingsstructuur	44
5.3	Firmware.....	44
6	Prototype	45
7	Conclusie	46
8	Bronvermeldingen.....	47
9	Bijlagen	50
Bijlage A:	Aanbevelingen.....	50
Bijlage B:	Competenties	51
Bijlage C:	Planning.....	54
Bijlage D:	Programma van Eisen	55
Bijlage E:	Oorspronkelijke afstudeeropdracht	57

BEGRIPPENLIJST

ACK	Acknowledge, een tegenbericht aan de afzender van een bericht om correcte ontvangst hiervan te bevestigen.
API	Application Programming Interface. De interface of set protocollen waarmee één programma gegevens kan uitwisselen met een ander programma. Zo heeft de database van KUBO een API waarmee gegevens kunnen worden opgevraagd via het internet.
Band	Een frequentieband beschrijft een specifiek onder- en boven limiet van frequenties waarbinnen radiogolven worden gebruikt om informatie over te dragen.
Bandbreedte	De bandbreedte van een protocol is de datacapaciteit van de verbinding. De bandbreedte omvat meerdere kanalen en een kanaal kan meerdere zenders doorgeven.
BLE	Bluetooth Low Energy, een signaaloverdrachtstechniek veelal gebruikt bij door een batterij gevoede apparaten.
Downlink	Een bericht via het netwerk naar een LoRaWAN node. Dit heeft een limiet van tien downlinks per dag.
Gateway	Een apparaat dat toepassing specifieke apparaten verbindt met het internet.
Gedecentraliseerd systeem	Een systeem waarbij de voor bewerkingen benodigde rekenkracht niet op één centrale computer aanwezig is maar is verdeeld over (een aantal van) haar componenten.
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning. Airconditioning systemen, vaak gebruikt in bijvoorbeeld kantoorpanden om een goede luchtkwaliteit te verzekeren.
IC	Integrated Circuit. Een elektronische schakeling waar een niet-geleidende plastic behuizing omheen is gegoten. Deze componenten zijn de basis van gecompliceerde elektronische bewerkingen.
IIoT	Industrial Internet of Things
Impedantie	Inwendige weerstand tegen het vrijelijk vloeien van een medium. Bij elektrotechnisch gebruik betekent dit de lineaire weerstand die ondervonden wordt in een geleider door een dynamische belading.
Interface	De interactie die een gebruiker of ontwikkelaar bij gebruik van een systeem heeft verloopt via de interface van dat systeem.
IoT	Internet of Things
IoT	Internet of Things, het snelgroeiende fenomeen apparaten te voorzien van een internetverbinding voor gegevensoverdracht over het internet, veelal autonoom door het apparaat geïnitieerd.
Kanaal	Een band heeft meerdere kanalen, die elk meerdere zenders kunnen overbrengen.
Latency	De vertraging in signaal propagatie of het overbrengen van gegevens van de verzender naar de ontvanger.
LoRa	Long Range, een radio modulatietechniek gebruikmakende van Spread Spectrum (SS) modulatie, gebaseerd op de Chirp Spread Spectrum (CSS) modulatie. Kenmerken zijn het lage stroomverbruik, het hoge bereik en de lage bandbreedte.
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network, de netwerkinfrastructuur die het gebruik van LoRa faciliteert.
LPWAN	Low Power Wide Area Network. Een techniek voor radiocommunicatie protocollen tussen apparaten (M2M). Kenmerken zijn een groot bereik, laag stroomverbruik en lage implementatiekosten. De techniek mag gebruikt worden om privé netwerken op te zetten.
Microcontroller	Een microcontroller of Micro Controller Unit (MCU) is een apparaat dat wordt gebruikt om elektronica aan te sturen, voorzien van ten minste interne geheugencellen, een Central Processing Unit (CPU) en I/O (aan/uit) aansluitingen.
Microprocessor	Een microprocessor (vergelijkbaar met een CPU, doch niet identiek hetzelfde) is een apparaat dat wordt gebruikt om berekeningen te doen en processen aan te sturen, maar heeft om dit te doen nog externe I/O (aan/uit) aansluitingen en geheugen nodig.
Modulatie	Modulatie is het combineren van een laagfrequent informatiesignaal met een hogere frequentie draaggolf waardoor draadloze overdracht mogelijk wordt gemaakt. Omdat een laagfrequent signaal zich niet goed door de atmosfeer voortplant is deze stap nodig voor goede signaal propagatie.

Node	Hier wordt, bij gebruik i.c.m. LoRaWAN een zogenaamde endnode bedoeld. Dit is een apparaat dat gebruik maakt van het netwerk, vaak batterij gevoed.
Onderdruk	Onderdruk is het tegenovergestelde van overdruk. Hierbij wil lucht het systeem binnendringen.
Open-source	Opensourcesoftware is computerprogrammatuur waarvan de gebruiker de licentie heeft om de broncode te bestuderen, aan te passen, te verbeteren, te verspreiden of te verkopen.
Overdruk	Van overdruk wordt gesproken wanneer de druk in het systeem hoger is dan buiten het systeem. Lucht zal naar buiten willen ontsnappen.
PLC	Programmable Logic Controller, een industriële computer gebruikt voor het aansturen van processen.
PoE	Power over Ethernet, een manier om d.m.v. tussenstations een voedingsspanning te injecteren op ongebruikte strengen van ethernetkabels om apparaten te kunnen plaatsen met een internetverbinding zonder een extra voeding te hoeven installeren.
Propagatie	Propagatie is de voortplanting van radiogolven.
PvE	Programma van Eisen. Hierin worden de eisen aan het ontwerp gedefinieerd.
Sensor	Elektro-mechanisch component, bedoeld om natuurkundige waarden verkregen uit de omgeving te digitaliseren.
Sensormodule	Hiermee wordt hetzelfde bedoeld als met sensornode. Samenstelling van elektronische componenten, hier gebruikt om de op de meetlocatie te installeren sensor en ondersteunende elektronica voor signaaloverdracht aan te duiden.
Sensornode	Hiermee wordt hetzelfde bedoeld als met sensormodule. Samenstelling van elektronische componenten, hier gebruikt om de op de meetlocatie te installeren sensor en ondersteunende elektronica voor signaaloverdracht aan te duiden.
Time On Air	Zendtijd. Het maximaal toegestane gebruik van de vrij beschikbare ISM band is 30 seconden per dag.
Uplink	Een bericht van een LoRaWAN node naar het netwerk.
UTP kabel	Een Unshielded Twisted Pair kabel bestaat uit vier geleider paren die om storingen in de signalen te voorkomen om elkaar heen worden gedraaid.
Wi-Fi	Het populaire draadloze ethernetprotocol, werkend volgens de internationale standaard IEEE 802.11. Producten mogen zonder licentie gebruik maken van de voor Wi-Fi gebruikte radiofrequenties 2,4GHz en 5,0GHz, maar moeten aan voorwaarden voldoen of gecertificeerd te worden.
Zender	Een zender is een smalle frequentieband waar gegevens worden verzonden. Gebruikmakende van frequentiemodulatie voor het coderen van signalen varieert de gebruikte frequentie iets, maar blijft binnen de limieten van de zender

1 HOOFDSTUKINDELING

In dit verslag wordt het ontwerpproces van een zelfstandig luchtdruk sensorsysteem beschreven. Allereerst worden het probleem beschreven, de opdrachtomschrijving vastgelegd en het doel van de afstudeerstage gesteld in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 wordt de structuur van de afstudeerstage behandeld. Hoofdstuk 4 bevat de ontwerpanalyse en gaat in op alle verschillende aspecten van het systeem alvorens hiervoor de mogelijke opties te analyseren en deze samen te voegen tot concepten. Hoofdstuk 5 behandelt het gekozen concept en geeft de details van het eindontwerp. In hoofdstuk 6 staan de met het prototype behaalde resultaten. Hoofdstuk 7 trekt een conclusie over het succes van het "proof of concept" prototype van het gemaakte ontwerp om in hoofdstuk *Bijlage A: Aanbevelingen* suggesties te doen over voortzetting van het ontwerp. *Bijlage B: Competenties* behandelt de voor mijn studie te behalen competenties en een evaluatie van persoonlijke groei. Ook zijn in de bijlagen de *planning*, het *programma van eisen* en de *Oorspronkelijke afstudeeropdracht* te vinden.

2 PROJECTOMSCHRIJVING

2.1 Probleemstelling

Het luchtverdelingssysteem berust op flexibele plastic buizen van enkele tientallen tot 150 meters lang met diameters van gemiddeld één meter. Behandelde lucht (gefilterd, ontvochtigd en verwarmd of gekoeld) wordt hier in geblazen door middel van grote ventilatoren. Deze buizen liggen parallel aan elkaar onder de plantenrijen zoals te zien in *figuur 1* en *figuur 3*. Deze buizen hebben over de gehele lengte gaten in de wanden zodat de lucht er gelijkmatig uit ontsnapt en zijn aan het einde (vrijwel) dicht. Een vereiste voor gelijkmatige luchtverdeling is een constante overdruk in de buizen. Deze werking kan worden verhinderd door buizen die niet recht liggen, scheuren hebben of verstopt zijn. Het waarnemen van dergelijke problemen gebeurt visueel en wordt soms helemaal niet opgemerkt, het luchtverdelingssysteem heeft geen sensoren om deze fouten te detecteren. Door dit gebrek aan informatie is ook de efficiëntie van de ventilatoren in het systeem niet bekend en worden eventuele problemen laat of helemaal niet ontdekt wat leidt tot onnodig energieverbruik en een verlaagde efficiëntie.

2.2 Opdrachtschrijving

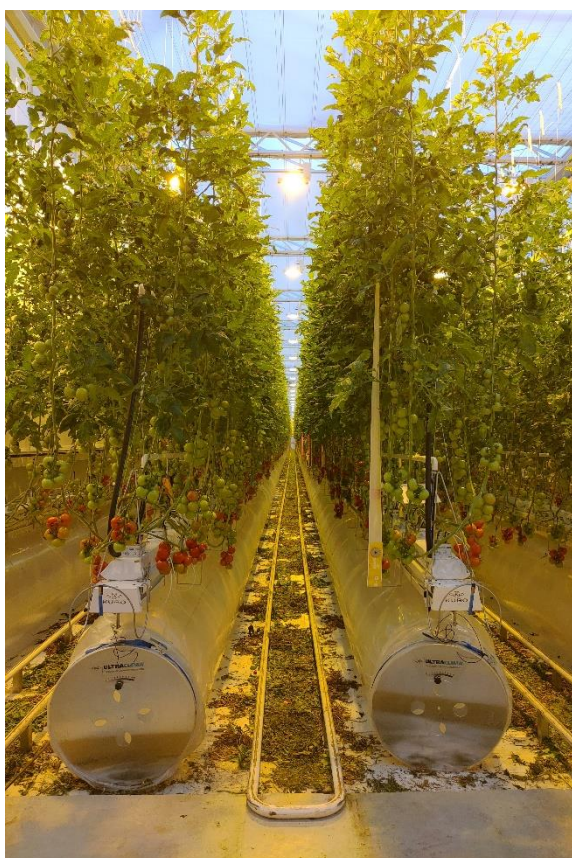
Vanuit KUBO volgt de vraag naar een ontwerp van een sensorsysteem dat deze informatie kan verzamelen. Dit moet data vergaren die voor de klant beschikbaar wordt gesteld via een bestaand product van KUBO, een API voor gegevensverwerking genaamd Pylot. Het systeem moet eenvoudig uit te breiden zijn met sensorunits die overal binnen de kas geplaatst kunnen worden. De wens bestaat om meer sensoren aan het systeem toe te kunnen voegen dan enkel de luchtdruksensor.

2.3 Doelstelling

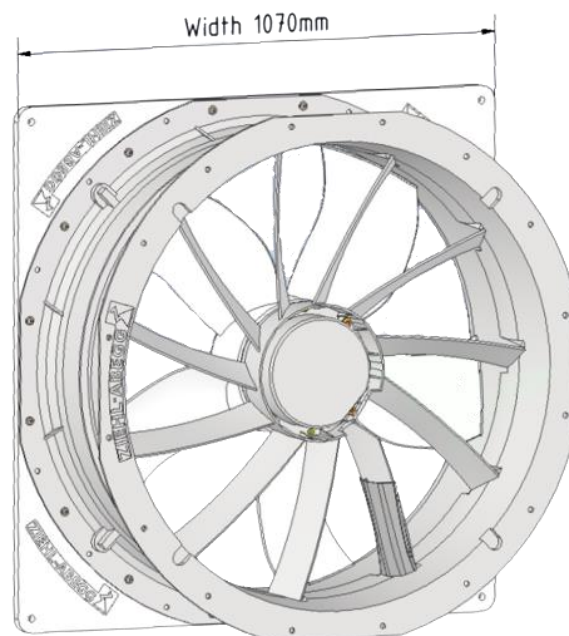
Het doel van deze afstudeerstage is het ontwerpen van een systeem dat op verschillende plaatsen in een kas de luchtdruk kan meten en dit toegankelijk maakt. Ook hoort hier het vervaardigen van een "proof of concept" prototype bij. Het moet als zelfstandig systeem sensordata kunnen uploaden naar de servers van KUBO, waar dit kan worden gevisualiseerd door KUBO's API Pylot. Indien een andere sensor zoals bijvoorbeeld een CO₂ sensor geïntegreerd kan worden gebruikmakende van dezelfde datalogistiek, geeft dat het systeem meer waarde.



Figuur 1: Een pas ingerichte kas. Boven de buizen zijn de jonge planten te zien.



Figuur 3: Tomatenplanten in KUBO's Bluelab.



Figuur 2: De ventilator die de buizen op druk houdt. Iedere buis heeft een eigen ventilator.

3 ONTWERPMETHODOLOGIE

De structuur van dit project is opgedeeld in de stappen behorend bij Methodisch Ontwerpen. Allereerst is een Plan van Aanpak (PvA) geschreven. Hierin zijn een korte analyse van de wensen van KUBO en een projectafbakening opgenomen. Aan de hand hiervan kwam een globale planning tot stand. Vervolgens is een grondige analyse van het gewenste systeem en de daarvoor noodzakelijke deelfuncties uitgevoerd. Voor iedere deelfunctie zijn uitgebreid mogelijke opties onderzocht. Om deze opties te kunnen toetsen aan de wensen van KUBO is een Programma van Eisen (PvE) opgesteld. In dit PvE is uiteengezet aan welke eisen het ontwerp zou moeten voldoen, en in welke mate. Deze eisen zijn gekwantificeerd voor zover mogelijk, aan de hand van de eigenschappen van de opties uit de analysefase. De beste opties zijn vervolgens samengevoegd tot complete concepten van het gewenste systeem. Aan de hand van het PvE zijn afwegingen gemaakt om tot een ontwerpkeuze te komen. Om deze keuze te testen is een prototype gebouwd, wat vervolgens aan de hand van het PvE is beoordeeld. Deze gevolgde structuur komt terug in de globale planning in paragraaf 3.2 en wordt ook gevolgd door de hoofdstukstructuur van dit verslag.

3.1 PvA

Het Plan van Aanpak (PvA) heeft als doel een realistische structuur op te zetten voor het uitvoeren van de opdracht. Het is één van de eerste stappen die gezet wordt. Het PvA stelt verwachtingen, vat de eisen vanuit de opdrachtgever samen en bevat een globale planning.

3.2 Planning

Figuur 4 laat de indeling zien aan de hand waarvan deze afstudeerstage gestructureerd is. Hier is te zien dat de afstudeerstage achttien weken heeft geduurd. De verdeling van de verschillende fases geeft inzicht in de tijdsverdeling binnen dit project. Een gedetailleerde versie van de planning te vinden is in *Bijlage C: Planning*.

Planning		Zelfstandige Luchtdruk Sensormodule																				
Olivier Schutter		2021								2022												
		1	2	3	4	5	6				7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Planning		15/11	22/11	29/11	6/12	13/12	20/12	27/12	3/1	10/1	17/1	24/1	31/1	7/2	14/2	21/2	28/2	7/3	14/3	21/3	28/3	4/4
Project fase	Project description	46	47	48	49	50	51	52	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Analyse																						
Ontwerpen																						
Materialisatie																						
Testen																						
Herzien																						
Presenteren																						

Figuur 4: Planning, globale versie.

3.3 Programma van eisen

Het Programma van Eisen bevat alle voorwaarden waar het eindontwerp op is beoordeeld en is te vinden in *Bijlage D: Programma van Eisen*. Hier wordt per eis de prioriteit van de eigenschap aangegeven volgens het MOSCOW systeem. Dit houdt in dat iedere eis één van de volgende vier weegfactoren toegekend krijgt: Must, Should, Could of Would. Dit systeem wordt veel gebruikt bij productontwikkeling, omdat het een ontwerpproces hanteerbaar houdt en inzicht geeft in de belangrijkste factoren voor een ontwerp. Ook brengt het de optie met zich mee een concept te toetsen op wensen, zonder dat deze cruciaal zijn voor acceptatie. Op deze manier kan het ontwerp voldoen ondanks dat niet aan alle punten worden gehaald.

Het PvE is, waar mogelijk, vastgesteld aan de hand van de realistische situatie in een kas. Voor eisen waaraan geen realistische waarde kan worden toegekend is een schatting gemaakt of zijn de slagingsvoorwaarden beschreven.

3.4 Opzet prototype

Het prototype is een "proof of concept" waarmee de werking van het ontwerp wordt aangetoond. Ook laat dit zien dat het meetsysteem voldoende accuraat en consistent kan meten om ingezet te worden als waardevolle schakel in een feedback-regelsysteem. Het prototype wordt beschouwd als adequaat wanneer deze aan de primaire eisen voldoet zoals gedefinieerd in het Programma van Eisen. Het prototype hoeft niet aan alle eisen te voldoen om te worden geaccepteerd mits dit goed en constructief kan worden onderbouwd. Ook zijn sommige eisen niet te testen zonder implementatie van een

volwaardig systeem. Het prototype van het ontwerp wordt inhoudelijk beschreven in hoofdstuk 6.

3.5 Aanbevelingen

Nadat het ontwerpproces doorlopen is en de stageperiode afgelopen is wordt het ontwerp overhandigd aan KUBO. Om op dit ontwerp en onderzoek door te kunnen bouwen is het belangrijk te weten welke aspecten van het ontwerp voor verbetering vatbaar bleken. Daarom worden in *Bijlage A: Aanbevelingen* punten naar voren gebracht die KUBO in een eventueel vervolgonderzoek kan overwegen ter waardevermeerdering van het gedane onderzoek.

4 ONTWERPANALYSE

Uitgaande van de initiële wens van KUBO en de daarbij horende minimumeisen aan het sensorsysteem kan een globaal deel van het PvE opgesteld worden. Dit wordt in paragraaf 4.1 van dit hoofdstuk besproken waarna in paragraaf 4.2 enkele randvoorwaarden voor het systeem worden beschreven. Het meer specifieke deel van het PvE hangt af van de uiteindelijk gekozen deeloptyes. Daarom wordt het systeem in paragraaf 4.3 opgedeeld in deelfuncties waar voor iedere functie ontwerpopties worden geanalyseerd. In paragraaf 4.3 worden deze opties samengevoegd tot vier systeemconcepten.

4.1 Systeemeisen

De randvoorwaarden waaraan moet worden voldaan en het klimaat waarin het sensorsysteem moet functioneren bepalen voor een groot deel de samenstelling. Dit systeem kan als toepassing van het Internet of Things (IoT) worden gezien omdat de sensorwaarden automatisch via het internet toegankelijk moeten zijn. Buiten deze beginselen prioriteert het PvE in *Bijlage D: Programma van Eisen* bepaalde systeemaspecten. De eisen die hieraan gesteld worden zijn:

- De sensor moet minstens 150 meter van een eventuele centrale processor vandaan kunnen worden geïnstalleerd.
- De sensordata is via het internet beschikbaar en kan worden geüpload naar de servers van KUBO. Dit impliceert dat tenminste één eenvoudige computer of controller nodig is om de analoge sensorsignalen via het internet te versturen.
- Het systeem werkt betrouwbaar en is toe te passen binnen kassen in meerdere gebieden en landen.

Eén belangrijke wens is:

- Andersoortige sensoren zoals bijvoorbeeld CO₂ en luchtvochtigheidssensoren kunnen worden toegevoegd aan de sensormodule.

4.2 Randvoorwaarden

Deze eisen leggen de mogelijkheden aan banden waardoor de volgende uitsluitels en beginvoorwaarden kunnen worden gesteld:

- De sensornodes moeten over elektronica beschikken om het signaal zonder gegevensverlies de afstanden naar een centrale verwerker of gateway te laten overbruggen. Dit ongeacht of voor een gedecentraliseerd systeem of één centrale computer wordt gekozen omdat het uitlezen van analoge sensoren, afhankelijk van het type, niet meer dan een aantal meters kan overbruggen zonder de gemeten waarden te beïnvloeden. Er kan een versterker van het analoge signaal aan de sensormodule worden toegevoegd of het kan eerst worden gedigitaliseerd alvorens over een kabel te worden verstuurd. Bij een draadloos systeem moet het analoge signaal worden omgezet naar radiogolven.
- Er is een omslagpunt in complexiteit tussen een gedecentraliseerd systeem met microcontrollers in iedere sensornode en een systeem dat één centrale processor gebruikt voor de dataverwerking. Dit hangt af van het aantal sensornodes in het systeem. Omdat iedere kas anders is, moet bij deze keuze gewerkt worden met een schatting van het gemiddelde aantal sensormodules. Voor dit systeem wordt de gemiddelde hoeveelheid sensormodules op 300 geschat.
- Bij een gedecentraliseerd systeem, waar alle sensornodes individueel verbinding met het internet maken, kan de bandbreedte van zowel de plaatselijke internetverbinding als de servers van KUBO een knelpunt worden. Voor dit ontwerp worden de prestaties van de servers van KUBO buiten beschouwing gelaten en wordt uitgegaan van een hiervan losstaand sensorsysteem.

4.2.1 Elektronica

De integriteit van het sensorsysteem moet worden gewaarborgd door de staat van de sensormodule te kennen. De sensor moet kunnen worden gekalibreerd om zeker te zijn van de juiste waarden. Indien een component faalt, software- dan wel hardware-matig, moet duidelijk zijn dat opgegeven meetwaarden niet meer betrouwbaar zijn en moet dit worden doorgegeven aan de database zodat de sensormodule kan worden nagekeken. Gebruikte elektronica moet veilig zijn voor gebruik in een kas.

4.2.2 Software

Om de sensordata betrouwbaar op te slaan en via het internet uit te kunnen lezen moet dit worden geüpload naar de servers van KUBO. Andere systemen binnen de kassen van KUBO gebruiken een Application Programming Interface (API) om data aan de gebruiker te presenteren. Het ontwerp hoeft deze API niet te gebruiken maar moet hiermee wel compatibel zijn. De gebruikte software is afhankelijk van de gekozen elektronica en wordt toegelicht in paragraaf **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden..**

4.2.3 Uitbreidbaarheid

Om dit product effectief in te kunnen zetten en binnen een productieomgeving praktische meetwaarden te kunnen vergaren, moet dit systeem robuust kunnen functioneren, onafhankelijk van het aantal of de staat van sommige van de sensormodules in het systeem. Dit wordt bewerkstelligd door het systeem te ontwerpen voor gebruik met een variabel aantal sensormodules. De luchtdruksensormodule is deel van een opzichzelfstaand systeem waar eenvoudig meerdere modules aan toegevoegd kunnen worden. Bij voorkeur beschikken de sensormodules over exact dezelfde software en hardware om het productieproces ervan te vergemakkelijken met enkel kleine verschillen ten bate van identificatie van individuele modules.

4.2.4 Veiligheid

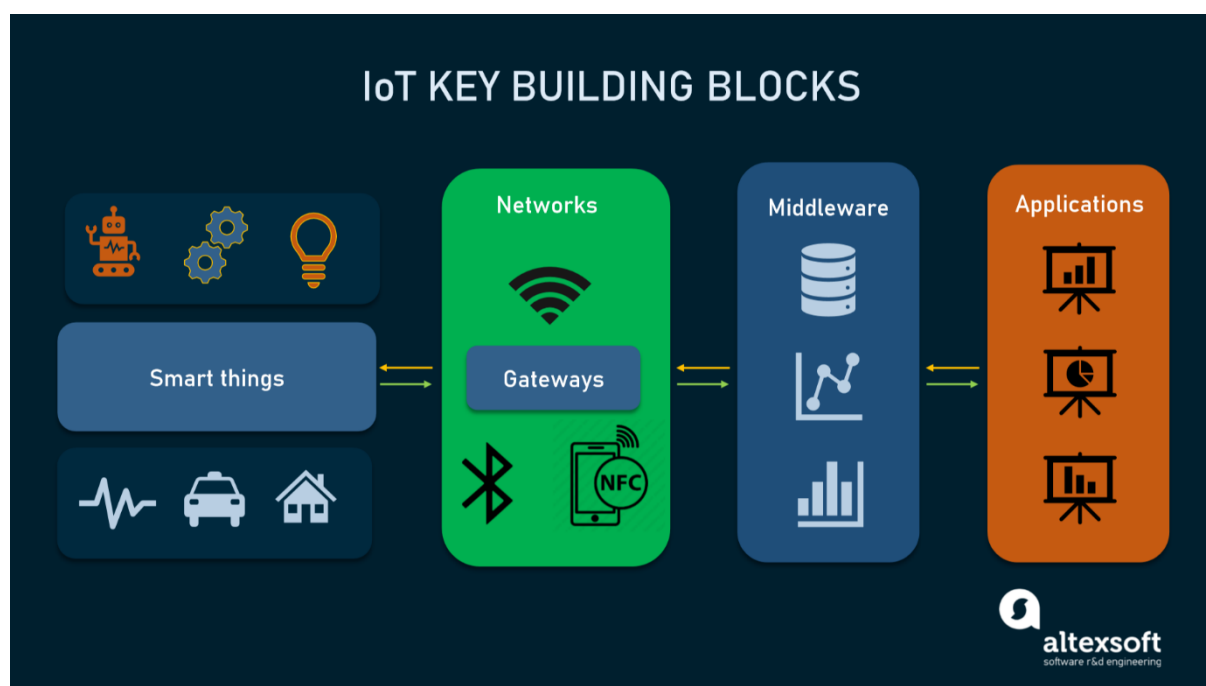
4.2.4.1 Fysiek

De componenten van de sensormodule moeten bestand zijn tegen het klimaat binnen een kas. De verwachte temperaturen, die niet zullen stijgen boven wat voor de mens uit te houden is zullen voor de meeste elektronische componenten geen obstakel zijn. Luchtvochtigheid vormt een groter probleem, omdat dit op korte termijn kortsluiting binnen de componenten kan veroorzaken en op langere termijn de contacten kan doen corroderen. Dit is afhankelijk van de precieze luchtsamenstelling in elke kas apart en binnen het tijdsbestek van deze afstudeerstage kan het effect hiervan niet proefondervindelijk bepaald worden. Het is belangrijk dat bij falen van de sensormodule geen gevaar voor gebruikers bestaat. De behuizing of bedrading mag niet onder stroom komen te staan en er mogen geen schadelijke dampen kunnen vrijkomen.

4.2.4.2 Digitaal

Om de verzamelde gegevens en integriteit van de data te beschermen moet het toegepaste protocol gecertificeerde veiligheidsstandaarden gebruiken. Bij bekabelde gegevensoverdracht is het gevoeligste punt de internetaansluiting of gateway, omdat deze is aangesloten op het internet en dus de veiligheid van het hele systeem moet waarborgen. Bij draadloze gegevensoverdracht moet, buiten met kwetsbaarheid van een gateway of router, rekening gehouden worden met het toepassen van adequate encryptieprotocollen om onderschepping van gegevens te voorkomen. Beveiligingsalgoritmes zijn voor de veiligheid bij vooral draadloze gegevensoverdracht fundamenteel en zijn vaak ingebouwd in de protocollen. Eén methode om integriteit van deze encryptiemethoden te waarborgen is om open-source protocollen te kiezen (Schneier, 1999). Het voordeel hiervan is dat een groter aantal mensen zich heeft gebogen over vrij te gebruiken open-source algoritmes dan bij een geheime en gepatenteerde encryptiemethode van een bedrijf het geval is.

4.2.5 Internet of Things



Figuur 5: Basisstructuur van het Internet of Things (AltexSoft, 2020).

Vanwege de technische vooruitgang worden steeds meer processen geregeld aan de hand van sensordata, een kenmerk van het Internet of Things (IoT). Deze sensoren bevinden zich bij industriële processen zowel in fabrieken als in het open veld. Soms ver van elkaar

zoals bijvoorbeeld bij tankterminals of afgelegen mijnen het geval is. Door consumenten worden IoT apparaten veel gebruikt in bijvoorbeeld smart homes en voertuigen. Apparaten in beide sectoren delen de volgende belangrijke kenmerken.

- De te versturen data is beperkt in grootte en dus kan de sensormodule functioneren met een relatief lage **overdrachtssnelheid**. Afhankelijk van de benodigde frequentie van de communicatie heeft de sensormodule weinig stroom nodig en kan in veel gevallen een deel van de tijd in slaapmodus doorbrengen.
- **Communicatie** verloopt meestal via een router of controller, om een interface te bieden richting de gebruiker of om te worden opgenomen in een database. Meestal wordt direct met een controller verbonden (bijvoorbeeld bij een smart home). Draadloos via Wi-Fi (paragraaf 4.3.4.2.2), Bluetooth (paragraaf 4.3.4.2.1), een ander draadloos communicatieprotocol of via Ethernet kabels (paragraaf 4.3.4.1.1). Soms verbinden de apparaten direct met apparaten van de gebruiker (bijvoorbeeld slimme lampen). In dat geval wordt de interface van het systeem voorzien door product-specifieke software of instellingen op de apparaten van de gebruiker. Soms verbinden de apparaten helemaal niet met de eindgebruiker maar met een router of controller van een derde partij om in een gesloten database te worden opgenomen. In dat geval heeft de gebruiker hier geen toegang en krijgt de data gerapporteerd door de derde partij (bijvoorbeeld een leverancier die juist gebruik van haar machines eist als voorwaarde voor garantie en daarom de machines monitort).
- Afhankelijk van de systeemstructuur (paragraaf 0) wordt **dataverwerking** soms op de module zelf gedaan en wordt dit direct of indirect via de bovengenoemde manier aan de eindgebruiker gepresenteerd. Dit is vaak het geval indien de sensordata ondersteunend werkt aan de hoofdfunctie van een proces dat lokaal wordt geregeld door de gebruiker via een PLC of andersoortige controller. In situaties waarbij de IoT toepassingen in informatie voorzien zonder deel van een proces te zijn wordt sensordata ter plaatse voorbewerkt of in rauwe toestand naar een server gestuurd om daar te worden verwerkt.

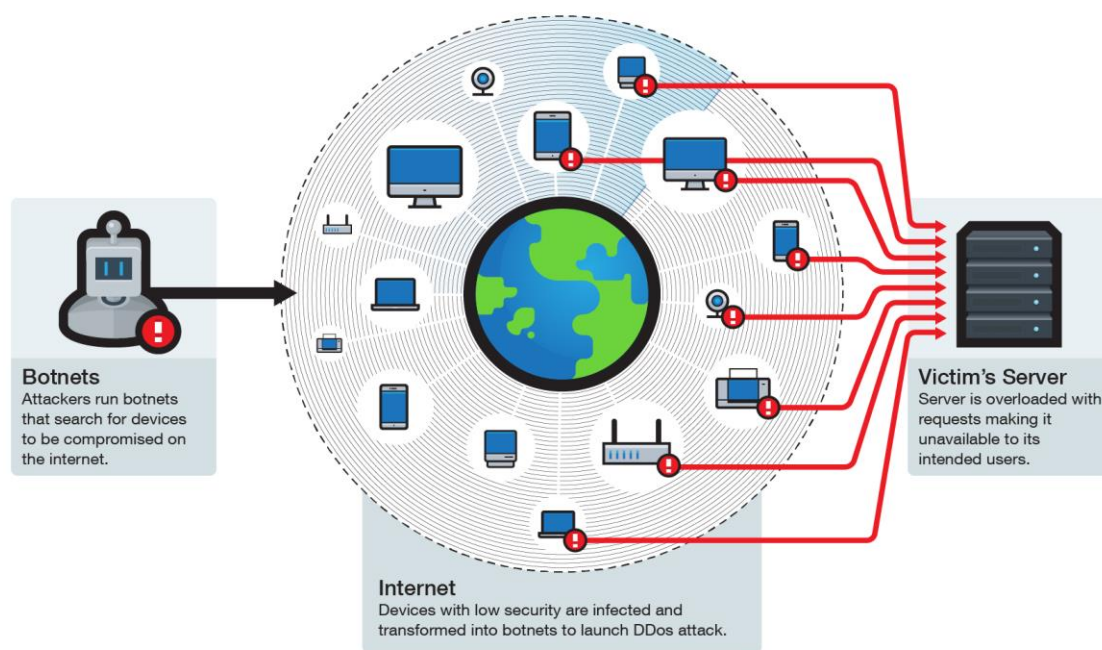
Beide toepassingen hebben specifieke eisen. Zo wil de consument vaak toegang hebben tot zijn sensordata vanaf meerdere apparaten en moet het worden geïntegreerd in zijn bestaande smart home systeem. Voor de industrie is een hoge betrouwbaarheid en veiligheid vaak belangrijker dan een naadloze integratie met bestaande systemen. Voor

beide oplossingen is een lang batterijleven belangrijk indien een plaatselijke stroomvoorziening ontbreekt. LPWAN beschreven in paragraaf 4.3.4.2.4 biedt oplossingen voor de laatste van deze eisen bij apparaten draadloos verbonden met het internet.

4.2.5.1 Veiligheid

Terwijl steeds meer apparaten met het internet verbonden worden blijft de veiligheid als ontwerpfactor vaak achter. Wanneer bestaande producten worden bestudeerd, blijkt dat er bijna altijd veiligheidsproblemen aanwezig zijn. Soms worden apparaten niet beveiligd en worden wachtwoorden niet versleuteld opgeslagen, of worden de op de componenten aanwezige beveiligingsmethoden niet toegepast of niet juist gebruikt (Schouten, 2020).

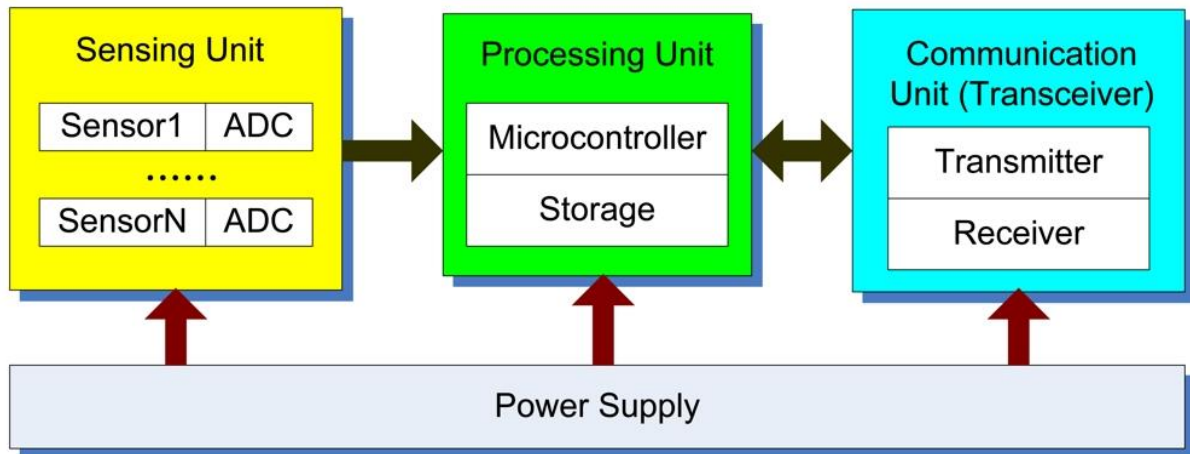
Distributed Denial-of-Service (DDoS) aanvallen worden uitgevoerd door cybercriminelen tegen organisaties door servers te bestoken met een overweldigend aantal gelijktijdige verzoeken. Door gebruik te maken van slecht of niet beveiligde IoT apparaten verbonden met het internet kan een dergelijke aanval worden gecoördineerd door een zogenaamd Botnet te creëren (Vishwakarma & Jain, 2019). Dit is niet het enige gevaar van onbeveiligde IoT apparaten maar geeft een beeld van het gemak waarmee hackers dergelijke apparaten binnendringen. Het beveiligen van IoT apparaten is cruciaal en speelt daarom een belangrijke rol bij het kiezen van een veilige systeemstructuur.



Figuur 6: Werking van een IoT botnet (Dineshh912, 2021).

4.3 Deelfuncties

Om te voldoen aan de globale eisen zoals gesteld in de voorgaande paragrafen en de specifieke eisen uit het PvE moeten alle deelcomponenten van het sensorsysteem worden geanalyseerd. Een zelfstandig functionerend sensorsysteem vereist een aantal overwegingen om aan de vooropgestelde eisen kunnen voldoen. *Figuur 7* geeft de basisstructuur van een draadloos sensornetwerk weer. Bij een bedraad sensornetwerk gelden dezelfde basiscomponenten maar maken de sensoren hier gezamenlijk gebruik van, terwijl bij een draadloos netwerk iedere sensormodule apart over deze componenten beschikt.



Figuur 7: De vier basisc componenten van een sensornetwerk (Xia, 2009).

In *tabel 1* wordt een overzicht van deze basisc componenten voor dit te ontwerpen sensorsysteem gepresenteerd en de relevantie van iedere deelfunctie beschreven. In de hierop volgende sub paragrafen worden verschillende opties voor elk van deze deelfuncties onderzocht.

Tabel 1: Basisoverwegingen voor een zelfstandig sensorsysteem.

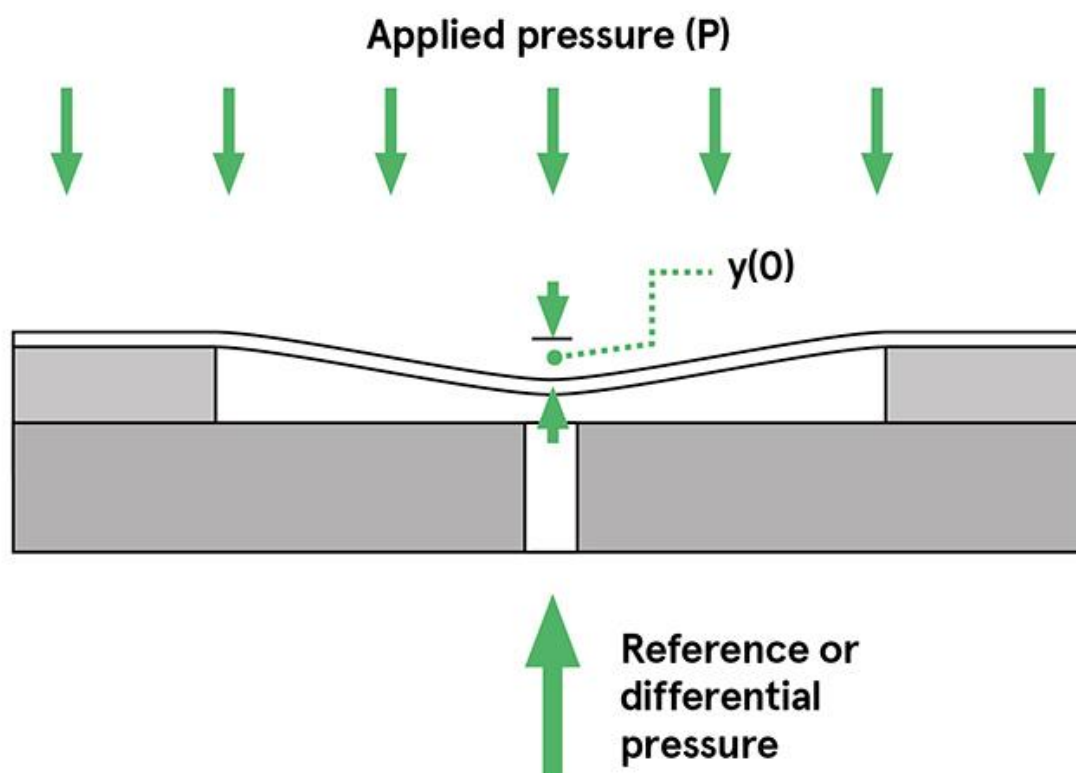
Luchtdruksensor	Om een fysieke grootte te meten is een sensor nodig.
Sensorplaatsing	De sensor verkrijgt waarden uit zijn directe omgeving. Hierom is het belangrijk te analyseren waar precies gemeten moet worden aangezien er verschillende manieren zijn om de gewenste grootte te verkrijgen.
Voeding	Om een zelfstandig, elektronisch systeem te doen functioneren moet een voedingsbron overwogen worden.
Gegevensoverdracht	Om de sensorwaarden centraal te verzamelen en te gebruiken via de servers van KUBO moet de infrastructuur voor het versturen van de sensorwaarden worden overwogen
Besturingsstructuur	Meerdere oplossingen zijn mogelijk voor het implementeren van een sensorsysteem. Het verschil tussen één sensor en een sensorsysteem is de structuur waarin deze is ondergebracht.

4.3.1 Luchtdruksensor

De geschiktheid en precisie van de meetresultaten hangt af van de gebruikte luchtdruksensor. Er zijn vier categorieën druksensoren berustend op verschillende principes die bij dit ontwerp overwogen moeten worden. Andere bestaande principes zijn voor deze toepassing niet relevant (Sick, Sick Keuzehulp Welke Druksensor is Geschikt voor uw ...). In tabel 2 worden de verschillen tussen deze verschillende sensortypes gegeven. Al deze typen luchtdruksensoren werken door het drukverschil over twee kamers te meten, zie figuur 8.

Tabel 2: De verschillende typen luchtdruksensoren die voor dit project zijn overwogen.

Type sensor:	Verkregen meetwaarden:	Aantal aansluitingen:
Barometrisch	De atmosferische druk t.o.v. een vacuüm	Blootgesteld aan de atmosfeer
Absoluut	Druk t.o.v. een vacuüm	Eén aansluiting
Differentieel	Drukverschil tussen twee meetpunten	Twee aansluitingen
Gauge	Druk t.o.v. de atmosferische druk	Eén aansluiting en blootgesteld aan de atmosfeer



Figuur 8: Schematische principewerking van luchtdruksensoren (Avnet Abacus).

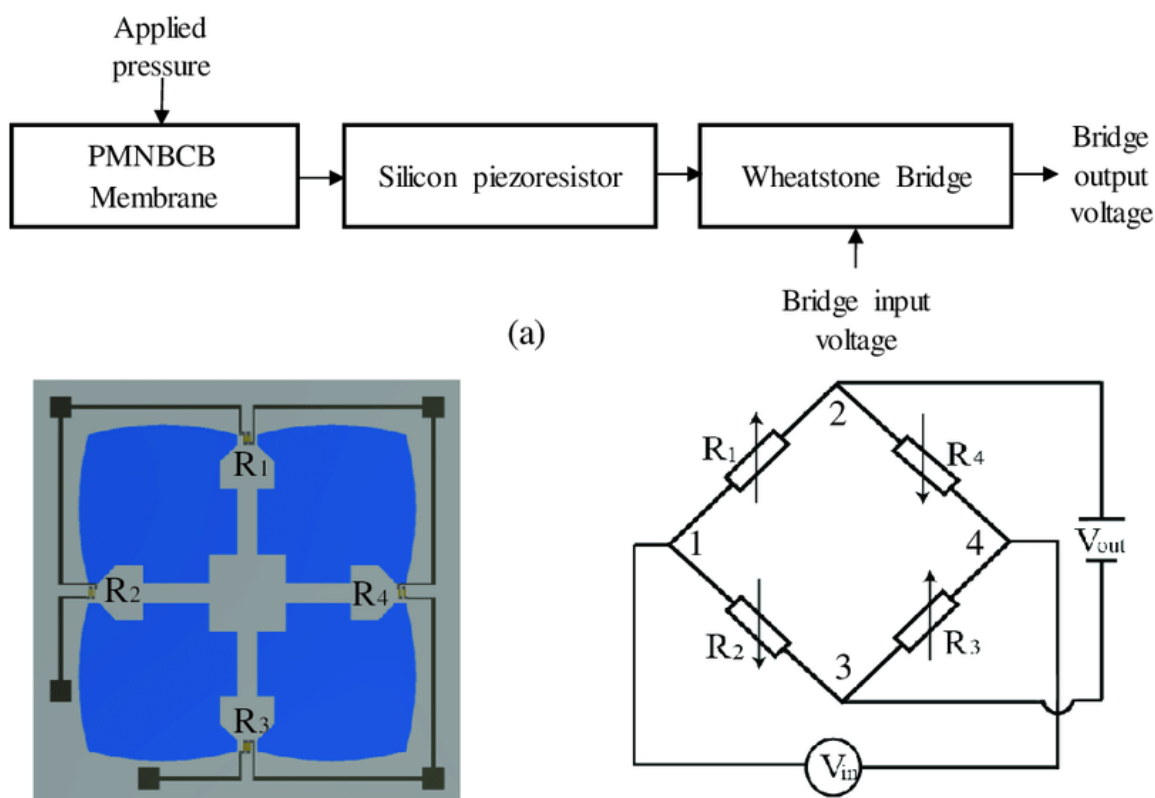
TYPEN SENSOREN

Verschillende druksensoren hebben verschillende toepassingen waar het meetbereik op wordt toegespitst. Zo hebben druksensoren voor industriële processen waar met hoge druk gewerkt wordt vaak een heel hoog meetbereik. Sensoren gebruikt in bijvoorbeeld een luchtconditioneringssysteem (HVAC) hebben daarentegen een meetbereik dicht bij de standaard atmosfeer. Het meetbereik bestaat uit de minimale en maximale waarden waarbinnen de sensor accurate waarden produceert en moet zorgvuldig worden gekozen voor het proces dat gemeten wordt. Luchtdruk op het aardoppervlak is afhankelijk van de hoogte waarop het meetpunt zich bevindt met een lagere druk hoger in de atmosfeer. De zogenaamde standaard atmosfeer wordt soms gebruikt als referentiedruk en is ongeveer gelijk aan de atmosferische druk op zeeniveau (Tuppie, 2017). Deze is gesteld op 1013,25 hPa of 101325 Pa. Voor de drukmetingen binnen dit systeem wordt met relatief geringe drukverschillen gewerkt. Er wordt aangenomen dat de atmosferische druk in de hele kas hetzelfde is. Sensorwaarden van verschillende meetpunten kunnen worden vergeleken aangenomen dat het ijkpunt gelijk is voor alle sensoren. Hierbij heeft het geen invloed of barometrische, absolute, differentiële of gauge sensoren gebruikt zijn mits deze consistent gebruikt worden binnen het systeem.

WERKING LUCHTDRIKSENSOR

De werking van druksensoren berust op de beweging van een membraan. Over dit membraan wordt een drukverschil aangebracht zodat de uitslag van het membraan een indicatie is van het drukverschil tussen twee kamers, zie *figuur 8*. Deze uitslag wordt gemeten met behulp van een Wheatstone brug (Tran et al., 2018), zie *figuur 9*. Bij een absolute sensor is één van deze kamers een vacuüm. Bij een differentieelsensor worden beide kamers blootgesteld aan druk op een verschillende plek binnen het systeem en bij een barometrische sensor wordt één kamer blootgesteld aan de atmosfeer terwijl een andere op het te meten proces is aangesloten.

Het meetbereik, nodig om de drukverschillen binnen het luchtverversingssysteem van KUBO te kunnen registreren is experimenteel bepaald ongeveer 0Pa tot 200Pa bovenop de atmosferische druk.



Figuur 9: Membraan van een resistieve druksensor. Wanneer dit membraan uitslaat onder invloed van een druk veranderen de waarden van de weerstanden zodat V_{out} een indicatie geeft van de uitgeoefende druk. (Tran et al., 2018).

4.3.2 Sensorplaatsing

Bij het kiezen voor een luchtdruksensor moet rekening gehouden worden met de plaatsing van de sensormodule. Zo kunnen alleen barometrische en absolute sensoren zonder aanpassingen binnenin de buis geplaatst worden, omdat deze een inwendig referentiepunt hebben. De andere typen sensoren zouden door middel van een slang aan de buitenlucht verbonden moeten zijn om een drukverschil te kunnen meten. De sensor wordt dan aan de buitenkant van de buis bevestigd met een slang die de buis ingaat. Deze sensorplaatsing vereist een meer ingrijpende installatie en maakt de oplossing minder mobiel en drastischer.

4.3.3 Voeding

Sensoren werken door een kleine spanning of stroom te introduceren en de invloed van de sensor hierop af te lezen. Deze vervorming van het signaal geeft de meetwaarden volgens het ijkmodel van de sensor. Dit betekent dat voor iedere meting een kleine

hoeveelheid elektrisch vermogen nodig is. Ook is vermogen nodig voor het versturen van de gegevens via het internet. Afhankelijk van de systeemstructuur gaat mogelijk ook vermogen verloren bij het omzetten van de sensorwaarden naar een digitaal signaal voor overdracht naar een centrale computer. Over het algemeen kan gesteld worden dat stroomverbruik van het sensorsysteem direct afhankelijk is van de frequentie waarmee gemeten en verstuurd wordt.

4.3.3.1 Kabel

Bij een bekabeld systeem is inwendige weerstand een probleem wat zorgt voor stroomverliezen. Des te langer de kabel, des te groter deze invloed. Verder kan door interferentie met metalen objecten of andere elektromagnetische bronnen de voeding instabiel worden. Met behulp van elektronica aan beide uiteinden van de kabel kan dit gestabiliseerd worden. Omdat de lengte van alle kabels niet hetzelfde is moet deze elektronica deze stabilisatie dynamisch uitvoeren of voor iedere kabel apart bepalen.

4.3.3.2 Batterij

Een batterij kan een sensornode voor een lange tijd voeden. Afhankelijk van de meetfrequentie en het verbruik van randelektronica kan een batterij jaren mee gaan alvorens deze te moeten vervangen.

4.3.3.3 Energy Harvesting (EH)

Met technieken om stroom op te wekken door de energie aanwezig in de omgeving is een batterij overbodig. Deze techniek is nog niet ver ontwikkeld maar is een goed alternatief voor een batterij. *Tabel 3* laat verschillende te gebruiken bronnen van energie zien (Sharma & Sharma, 2021), met een indicatie van de potentiële energieopbrengst per bron (Al Haj Hassan et al., 2014). Sommige methodes gebruiken reeds deze energiebronnen zoals bijvoorbeeld zonnepanelen en waterturbines. Deze bronnen zijn in een kas niet overal aanwezig en de energievormen die meestal stabiel aanwezig zijn (bijvoorbeeld thermische energie en atmosferische energie) zijn nog niet voldoende onderzocht om bruikbare energie omzettingmethoden te ontwikkelen.

Tabel 3: Bronnen van energie voor IoT EH oplossingen (Sharma & Sharma, 2021) en potentiële energie opbrengst per energiebron (Al Haj Hassan et al., 2014).

Energievorm:	Energiebron:	Potentiële energieopbrengst:
Licht energie	Zonne energie	0,1μW - 1MW
Kinetische energie	Vibraties, beweging	10μW - 100W
Thermische energie	Menselijk lichaam, industrie, verwarming	0,1μW - 1mW
Atmosferische energie	Luchtdruk, zwaartekracht	0,1μW - 1MW
Radio energie	Antennes, radio frequentie spectrum	0,1μW - 1mW
Bio/chemische energie	Diffusie, radio-isotopen	-
Hydro energie	Kinetische energie uit water	-

4.3.4 Gegevensoverdracht

De infrastructuur om meetwaarden van de sensor naar de database van KUBO te sturen hangt samen met de besturingsstructuur, zie paragraaf 0. Afhankelijk van deze structuur is ofwel een bedraad ofwel een draadloos communicatieprotocol van toepassing. In deze paragraaf worden toepasselijke opties voor ieder van deze mogelijkheden geanalyseerd.

4.3.4.1 Bedraad

Bij bedrade verbindingen wordt data overgedragen door dit te coderen in elektrische signalen (Encoding Methods). Hoe deze signalen de gegevens vertegenwoordigen hangt af van het overdrachtsprotocol en of dat digitaal of analoog gegevens overdraagt. Bij analoge signalen wordt de informatie voorgesteld door meerdere spanningsniveaus en bij digitale signalen door spanning met enkel twee niveaus (Park), waarbij de laatste methode minder gevoelig is voor storing door interferentie. Dit is een probleem waarbij nabije elektromagnetische bronnen zoals andere voedingskabels en apparatuur vervormingen in de data veroorzaken. Zonder signaalversterkers (analoog) of repeaters (digitaal) hebben bedrade verbindingen beperkingen in de overbrugbare afstand (Mitchell, 2019) vanwege de lengte-afhankelijke interne weerstand.

Een voordeel is dat gegevens niet kunnen worden onderschept zonder fysiek bij het systeem te kunnen komen. Ook kan de sensormodule via de kabels worden gevoed zodat er geen batterij nodig is. Zo kunnen rauwe gegevens worden overgedragen, zonder deze te hoeven voorbewerken omwille van efficiënt batterijgebruik. Hierdoor kunnen de sensormodules eenvoudiger worden. Kabels kunnen daarentegen fysiek in de weg liggen. Ze zijn kwetsbaar voor beschadigingen, vereisen ingrijpende installatie en moeten redelijk permanent worden weggewerkt omwille van de veiligheid.

4.3.4.1.1 Ethernet

Ethernet is een voorkeursprotocol voor bedrade gegevensoverdracht over grotere afstanden. Dit deels omdat de componenten die het protocol ondersteunen zoals kabels en switches ruim voorhanden zijn en omdat de overdrachtssnelheid hoog is en een lage latency heeft (Mens, 2021). Data wordt volgens het Ethernet protocol digitaal gecodeerd (Encoding Methods). Met Ethernet kabels worden vaak UTP (Unshielded Twisted Pair) kabels bedoeld (Jarno, 2021).

4.3.4.1.2 Coax

Coax kabels worden gebruikt voor data overdracht en worden gekenmerkt door duurzaamheid en gemakkelijke installatie. De overdrachtscapaciteit van de kabel is 10Mbps, ongeveer 80 keer zo hoog als dat van UTP kabels (*Everything you need to know about coaxial cable*). Het is de voorloper van UTP kabels als standaard voor het Ethernet protocol (Crijns, 2011).

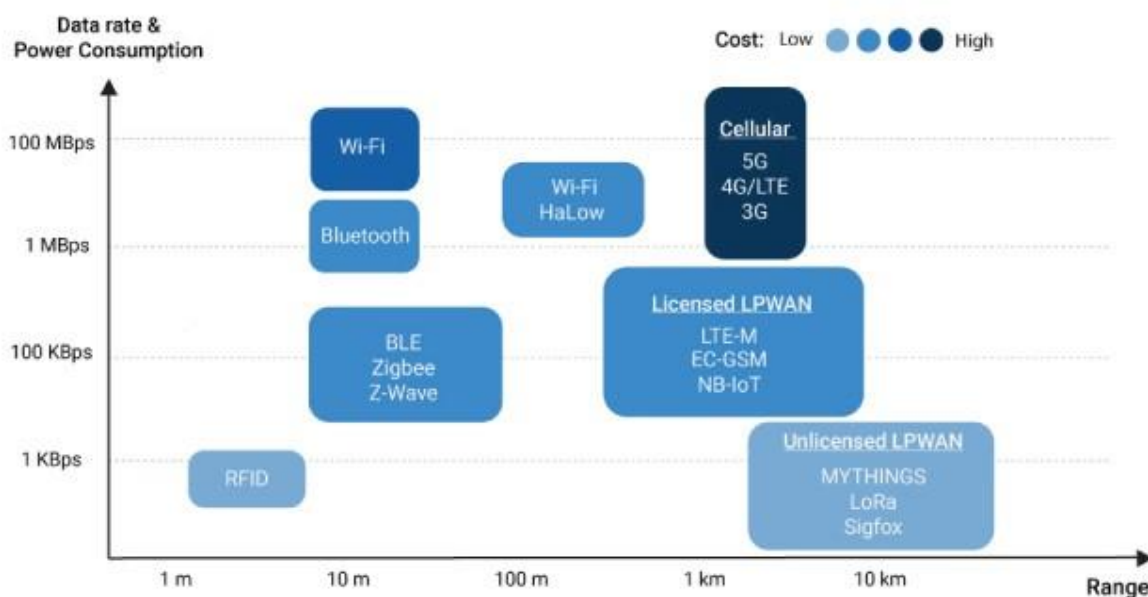
4.3.4.2 Draadloos

Een draadloze verbinding tussen sensornode en centrale gateway lost de fysieke problemen met een kabel op. Deze sensornode is overal te plaatsen en heeft een minieme impact op de omgeving. Daarentegen moet de sensor ter plaatse worden uitgelezen, waarna de data direct via een draadloos protocol verzonden wordt. Dit vereist geavanceerde elektronica voor iedere sensormodule. Signalen kunnen door derden worden onderschept waardoor de encryptiemogelijkheden behorende bij het communicatieprotocol cruciaal zijn. Om de problemen met kabels compleet te voorkomen ligt gebruik van een draadloze module met batterij voor de hand. Hierom moet het communicatieprotocol relatief energiezuinig werken.

In *tabel 4* is een overzicht gegeven waar de voor dit ontwerp overwogen draadloze communicatieprotocollen met elkaar vergeleken worden op punten belangrijk binnen deze scope. Een slechte score op één punt betekent geen slechte toepasselijkheid binnen de scope, maar wel dat deze op dit punt onderdoet voor de andere protocollen. In *figuur 10* worden enkele binnen deze scope belangrijke aspecten van meerdere draadloze communicatieprotocollen gevisualiseerd. De overdrachtssnelheid en vermogensefficiëntie van een groter aantal protocollen dan voor dit systeem toepasselijk worden hier uitgezet tegenover het bereik.

Tabel 4: Vergelijking tussen de in dit hoofdstuk besproken draadloze communicatieprotocollen op punten belangrijk binnen deze scope (Wireless Logic Benelux, 2021).

	BLe	Wi-fi	Zigbee	Narrowband IoT	LoRaWAN
Typisch bereik:	10m	100m	50m	1-50km	2-50km
Privé netwerk mogelijk:	√	√	√	x	√
Geen licentie nodig:	√	√	√	x	√
Laag stroomverbruik:	√	x	x	√	√
Hoge bandbreedte:	x	√	√	√	x
Mesh netwerk mogelijk:	√	√	√	x	√



Figuur 10: Overdrachtssnelheid en stroomverbruik van verschillende draadloze communicatieprotocollen uitgezet tegenover het bereik. De kleur is een indicatie van de implementatiekosten (BehrTech, 2021).

	100 bps		10K bps		40K bps	
1 m	BLE4 / Zigbee	0.15	BLE4 / Zigbee	7.5	Zigbee	30
	BLE Mesh	0.15	BLE Mesh	7.5	Bluetooth	25
	Bluetooth	25	Bluetooth	25	WiFi	50
	WiFi	50	WiFi	50	LoRA	20
	LoRA	0.5	LoRA	10		
50 m	Zigbee	20	Zigbee	30	WiFi	200
	WiFi	100	WiFi	100	NB-IoT, LTE-M	200
	LoRa	0.5	LoRa	20	LTE, 5G Cellular	200
	Sigfox	0.5	NB-IoT, LTE-M	30		
	NB-IoT, LTE-M	1.0	LTE, 5G Cellular	150		
	LTE, 5G Cellular	100				
1 km	LoRa	30	NB-IoT, LTE-M	100	NB-IoT, LTE-M	400
	Sigfox	30	LTE, 5G Cellular	200	LTE, 5G Cellular	400
	NB-IoT, LTE-M	20				
	LTE, 5G Cellular	120				

Figuur 11: Een overzicht waarin typisch energieverbruik voor verschillende protocollen bij verschillende bandbreedtes wordt weergegeven. Alle waarden zijn in mW (Voler systems).

MESH EN STER NETWERKEN

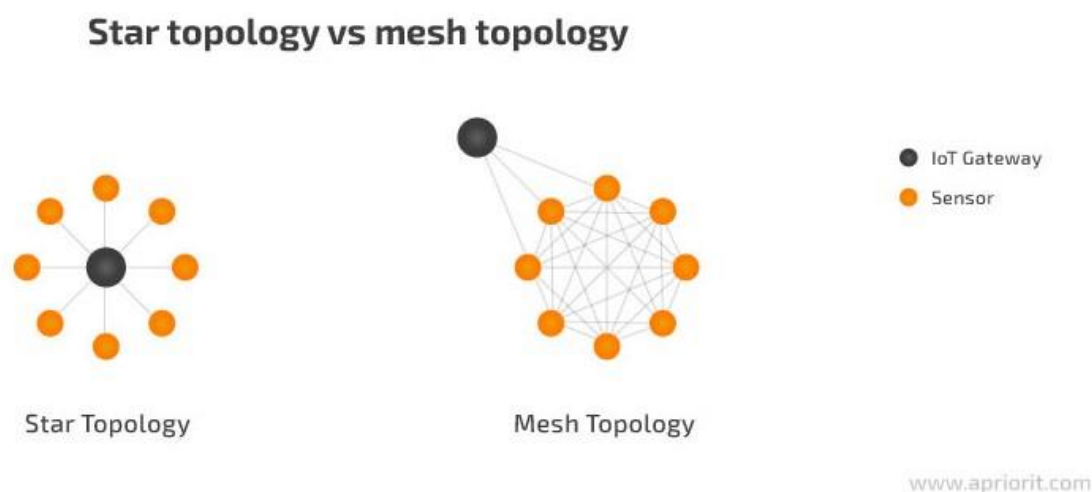
Om grotere afstanden te kunnen overbruggen of blokkades van het draadloze signaal zoals muren of objecten te omzeilen wordt door sommige communicatieprotocollen (binnen deze scope: Wi-Fi, Zigbee) het opzetten van een speciaal lokaal netwerk ondersteund. Apparaten worden dan onderling via het protocol met meer apparaten dan enkel de gateway verbonden om het gemeenschappelijke bereik te vergroten door de verbinding te delen. Hierdoor kan een apparaat dat buiten bereik is van de gateway, maar binnen bereik van een ander apparaat, een bericht doorgeven zodat dit alsnog de gateway bereikt. Deze netwerken kunnen verschillende structuren gebruiken. De hiervoor genoemde verbidingsstructuur heet een mesh netwerk. Het verschil tussen een gebruikelijk ster netwerk en een mesh netwerk is weergegeven in *figuur 12*. Hiervan bestaan ook hybride versies, waar een combinatie van de twee netwerken gebruikt wordt, vaak in clusters. Een groot nadeel van mesh netwerken voor draadloze systemen is dat nodes continu aan moeten staan om gegevens door te geven.

INTERFERENTIE

Bij draadloze gegevensoverdracht is het mogelijk dat er meerdere apparaten tegelijkertijd radiosignalen produceren op dezelfde frequentie. Dit hoeven geen datasignalen te zijn, maar kunnen ook een magnetron of een autoalarm zijn (Jupiter Networks, 2018). Dit kan resulteren in een slechte, trage of falende verbinding. Veel protocollen versturen data dan opnieuw, indien blijkt dat dit eerder niet gelukt is. Er zijn meerdere, protocol afhankelijke methodes om interferentie te voorkomen.

ENCRYPTIE

Veiligheid is bij het IoT zeer belangrijk. Omdat alles via het internet verbonden is moet beveiliging ingebouwd zijn in het protocol. Zie voor verdere analyse paragraaf 4.2.4.2.



Figuur 12: De opbouw van een mesh netwerk vergeleken met een ster netwerk (Kukoba, 2020).

4.3.4.2.1 Bluetooth Low Energy

Bluetooth Low energy of BLE is een adaptatie van Bluetooth bedoeld om het batterijleven van een product te verlengen. BLE heeft een lagere overdrachtssnelheid dan Bluetooth waardoor dit vaak toegepast wordt bij draadloze apparaten die weinig data verzenden. Een toestel kan wachten op een signaal om uit een slaaptoestand te worden gehaald (Ray, 2021) waardoor deze maanden tot jaren kan functioneren op één batterij. Het bereik van BLE is vergelijkbaar met dat van Bluetooth maar kan worden gebruikt binnen een netwerk zoals beschreven in paragraaf 4.3.4.2.

4.3.4.2.2 Wi-Fi

Wi-Fi, oorspronkelijk uitgebracht onder de technische naam IEEE 802.11b is een populair protocol om draadloos verbinding met het internet te maken. Het draadloze netwerk heeft een hoge overdrachtssnelheid en functioneert op de 2.4GHz en 5GHz banden afhankelijk van de versie van het protocol (Munck, 2022). Nadelen zijn dat Wi-Fi storingsgevoelig is, een relatief hoog stroomverbruik heeft en een klein bereik.

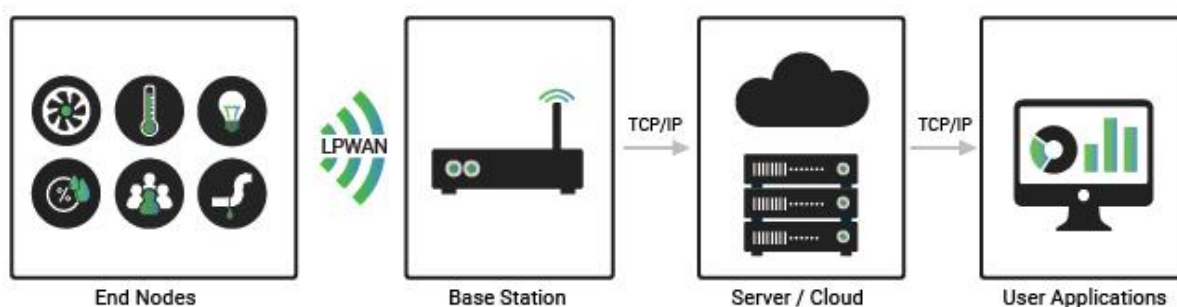
4.3.4.2.3 Zigbee

Zigbee is een populair korte afstand protocol, veel gebruikt bij smart home oplossingen vanwege een relatief hoge bandbreedte en het voordeel dat het zich uitstekend leent voor mesh netwerken. Hierdoor worden het bereik en de robuustheid van de verbinding verbeterd, indien meerdere sensormodules binnen bereik van elkaar zijn. Het nadeel is dat de modules hiervoor continu aan moeten staan, wat ten koste gaat van de batterijcapaciteit.

4.3.4.2.4 LPWAN

LPWAN staat voor Low Power Wide Area Network. Dit is een verzameling technologieën die gebruik maken van radiosignalen om kleine hoeveelheden data te versturen met een lage bandbreedte, met typische toepassingen in de IoT. Radiosignalen worden, net als bij Wi-Fi en Zigbee omgezet naar het Ethernet protocol door gateways om de gegevens naar servers te sturen. Een LPWAN netwerk heeft echter een groter bereik dan deze protocollen, en wordt enkel geëvenaard door de dekking van cellulaire netwerken zoals 3G, 4G of 5G (zie *figuur 10*).

Sommige LPWAN netwerken waaronder LoRaWAN werken op de ISM (Industrial, Scientific and Medical) band. Dit is vrij te gebruiken bandbreedte, met in ieder land verschillende limieten, zoals te zien in *tabel 5*. Mede de lage, sub-GHz frequenties zorgen voor een betere signaalpropagatie dan bij de voor o.a. Wi-Fi gebruikte 2,4GHz band en dus voor een groter bereik. NB-IoT is een LPWAN netwerk dat communiceert via cellulaire (mobiele telefonie) infrastructuur waar licenties op van toepassing zijn. Volgens onderzoekers zou dit protocol ook gebruikt kunnen worden in de gratis ISM band om het meer toegankelijk te maken maar dit is niet geïmplementeerd (Manzoor et al., 2020).



Figuur 13 : LPWAN netwerken functioneren met een gateway, net als andere IoT protocollen. Het base station vertaalt de radiosignalen naar bijvoorbeeld het Ethernet protocol, Wi-Fi of 3G om dit naar de servers te sturen (Behrtech, 2021). Het verschil zit in de communicatieprotocollen en diens eigenschappen, voor LPWAN zijn de belangrijkste een groot bereik, laag stroomverbruik en lage implementatiekosten. De LPWAN protocollen die zonder licentie werken staan het opzetten van een privé netwerk toe.

Tabel 5: Zogenaamde Industrial, Scientific and Medical (ISM) Sub-GHz band, vrij te gebruiken radiofrequenties per land (Farnell element14, 2018)

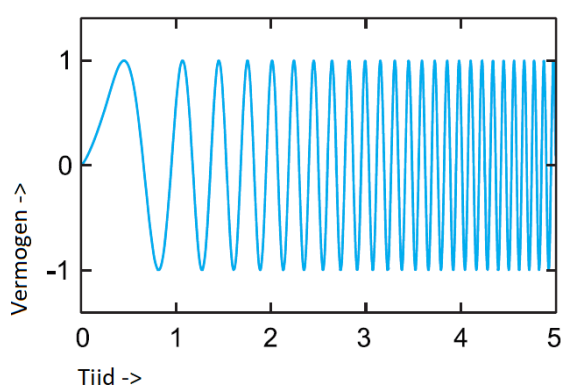
ISM Allocation Applicable for IEEE 802.11AH	
Country	Band Limits (MHz)
China	755 - 787
Europe	863 - 868
Japan	916.5 - 927.5
Korea	917.5 - 923.5
Singapore	866 - 869 & 920 - 925
USA	902 - 928

4.3.4.2.5 NarrowBand IoT

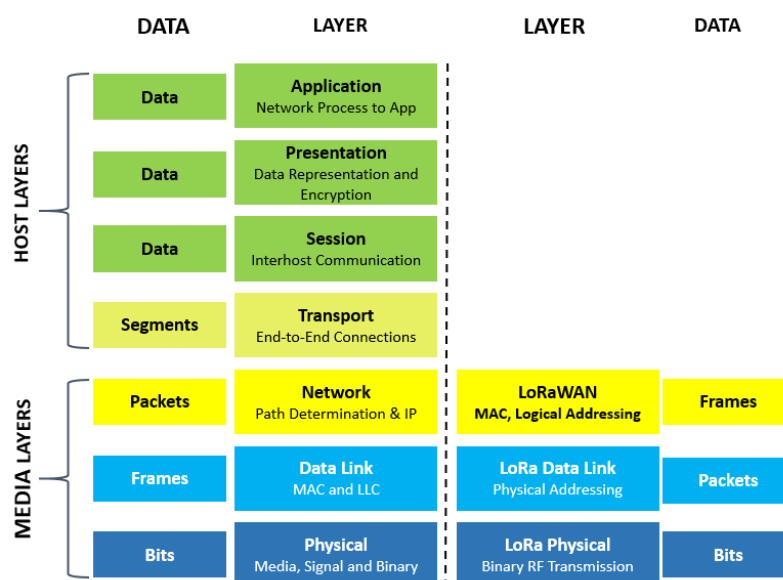
Narrowband IoT of NB-IoT is een cellulair LPWAN. Dit betekent dat dezelfde infrastructuur wordt gebruikt voor mobiele telefonie als voor het overdragen van gegevens via NB-IoT. Dit protocol is toegespitst op applicaties met lage bandbreedte en kleine hoeveelheden data, heeft een uitstekend bereik en vanwege het cellulaire netwerk vrijwel wereldwijde dekking. Daarom leent het zich goed voor sensormodules. Nadelen zijn dat een privé netwerk opzetten niet mogelijk is en gebruikmaken van de infrastructuur licentiekosten met zich mee brengt. In *figuur 10* wordt dit protocol onder "Licensed LPWAN" geschaard.

4.3.4.2.5.1 LoRaWAN

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) is een infrastructuur gebouwd rond het LoRa (Long Range) protocol. LoRa is een zogenaamd spread spectrum protocol afgeleid van de bestaande Chirp Spread Spectrum (CSS) modulatietechniek, zie *figuur 14* en functioneert in vaste bandbreedte kanalen van 125KHz of 500KHz. Dit protocol biedt een groot fysiek bereik, de mogelijkheid tot het creëren van privé netwerken en hierdoor het zelf beheren van de toepassing en veiligheid. LoRaWAN is dankzij het lage stroomverbruik een aantrekkelijke optie voor veel toepassingen van sensormodules in het IoT domein. Het is belangrijk om de fysieke implementatie LoRa en de implementatie LoRaWAN uit elkaar te houden. LoRa is de techniek waarmee bits worden verstuurd, LoRaWAN is de netwerklaag waarmee apparaten worden geadresseerd en berichten worden gecodeerd, gedefinieerd door het OSI zeven-laags Network Model te zien in *figuur 15*.



Figuur 14: CSS (LoRa Developer Portal).



Figuur 15: Het zeven-laags OSI Network Model (LoRa Developer Portal).

NETWERK

Om LoRaWAN te ondersteunen en een netwerk te faciliteren waarmee zowel consumenten als bedrijven eenvoudig gebruik kunnen maken van de ISM band heeft het in Nederland ontstane collectief The Things Network (TTN) een open-source LoRaWAN infrastructuur opgezet. Gebruikers kunnen apparaten instellen als gateway waar ieder apparaat mee kan verbinden, om zo gezamenlijk landelijke dekking te bereiken. Het gebruik van dit netwerk is gratis en vrij binnen de hierna beschreven limieten. Voor commercieel gebruik is het raadzaam een privé LoRaWAN netwerk op te zetten met eigen gateways. Dit om niet afhankelijk te zijn van de infrastructuur van The Things Network omwille van veiligheid, betrouwbaarheid en een directe verbinding met eigen servers (IOT Factory, 2021).

LIMIETEN

LoRa functioneert op de vrij te gebruiken ISM-band en om deze beschikbaar te houden zijn er significante limieten gesteld waaraan apparaten zich moeten houden. Deze betreffen onder andere een totale maximale zendtijd van 30 seconden per etmaal (Time On Air), een maximum aantal downlinks (berichten van de server naar de sensornode) van tien per dag en een maximum zendvermogen. Dit is de reden dat men met LoRaWAN standaard zonder aankomstbevestiging (ACK) werkt.

INTERFERENTIE

Bij het ontwerpen van een netwerk waarbij een grote hoeveelheid sensornodes periodiek berichten versturen moet rekening gehouden worden met het in paragraaf 4.3.4.2 genoemde probleem van interferentie. Met LoRaWAN zijn er meerdere opties om dit te voorkomen en zo een lokaal netwerk met meerdere sensormodules te ondersteunen. Zo wordt voor een zending willekeurig een kanaal gekozen. Ook worden de te versturen data en Time On Air zo klein mogelijk gehouden om de kans op botsingen te verkleinen. In een netwerk waar meerdere nodes via één enkele gateway data versturen bestaat de kans dat de zendingen exact gelijktijdig plaatsvinden en niet verwerkt worden. Bij het ontwerpen van een netwerk met een groot aantal modules moeten daarom de transmissies van iedere module worden gecoördineerd. Er vindt veel onderzoek plaats naar bijvoorbeeld het dynamisch plannen van zendtijd tussen nodes (Polonelli et al., 2019) en andere methoden om interferentie te voorkomen (Reynders et al., 2016). Deze methoden zijn soms functioneel maar nog niet gestandaardiseerd.

BEREIK

Bij een slechte verbinding met veel ruis door het overbruggen van een grote afstand is een korte zending met veel informatie meer gevoelig voor corruptie dan een korter, langzamer bericht. Bij LoRa kan dit worden aangepast door middel van zogenaamde

Spreading Factors (SF). In *tabel 6* worden de verschillende mogelijke Spreading Factors gegeven voor een zending (uplink) in de 125KHz band. Hier wordt ook aangegeven dat wanneer een signaal meer wordt uitgespreid om een groter bereik te hebben, Time On Air (TOA) oploopt. Vanwege het vrije karakter van de ISM band en de daaropvolgende TOA restrictie is het wenselijk om de SF zo klein mogelijk te houden om je zendtijd zo goed mogelijk te gebruiken en daarom is het streven de SF altijd zo klein mogelijk te houden (LoRa Developer Portal). Er kan een voor LoRaWAN beschikbare zogenaamde Adaptive Data Rate worden gebruikt waarbij het netwerk stationaire nodes een geschikte SF toewijst voor vervolgzendingen.

Tabel 6: De Spreading Factor van een uplink in de 125KHz band, de bit rate, het gemiddelde bereik voor een dergelijk signaal en de daarvoor nodige Time On Air (TOA). SF12 kan ook gebruikt worden, maar alleen voor downlink berichten in de 500KHz band (LoRa Developer Portal).

Spreading Factor (For UL at 125 KHz)	Bit Rate	Range (Depends on Terrain)	Time on Air for an 11-byte payload
SF10	980 bps	8 km	371 ms
SF9	1760 bps	6 km	185 ms
SF8	3125 bps	4 km	103 ms
SF7	5470 bps	2 km	61 ms

4.3.5 Besturingsstructuur

Om de waarden verkregen door een sensor **uit te lezen**, te **digitaliseren** en vervolgens via het **internet** beschikbaar te maken is een microcontroller of PLC nodig. Deze drie functies hoeven niet op hetzelfde apparaat te worden uitgevoerd. Het systeem kan centraal, deels gedecentraliseerd of compleet gedecentraliseerd worden vervuld. Deze opties hebben een grote impact op de complexiteit. Welke optie het meest efficiënt is hangt af van de hoeveelheid sensormodules in het systeem dat voor iedere toepassing anders zal zijn. In de volgende drie paragrafen worden deze drie functies op verschillende apparaten uitgevoerd, de paragrafen volgen de structuur van de drie opties in het Morfologisch overzicht van *figuur 16*.

4.3.5.1 Gecentraliseerd

Bij deze systeemstructuur worden meerdere sensoren op afstand uitgelezen door één centrale computer. De drie hiervoor genoemde functies worden dus alle drie op één centrale computer uitgevoerd. Hierbij is de randelektronica, de elektronica aan het einde van de kabel bij de sensor zo eenvoudig mogelijk. Dit brengt een simpele systeemstructuur met zich mee maar ook fysieke uitdagingen. Sensoren hebben een analoge werking en moeten analoog worden uitgelezen. Bij sommige sensoren worden de sensorwaarden op het IC (Integrated Circuit) omgezet naar digitale signalen. Dit is een minder storingsgevoelige manier van dataoverdracht, doch met de te overbruggen afstand brengt de kabel een aanzienlijke inwendige weerstand met zich mee die het uitlezen van sensoren bemoeilijkt. Dit systeem is bedraad en wordt dus centraal beheert om de sensormodules zo eenvoudig mogelijk te houden, met als nadeel dat door de hele kas heen kabels gelegd moeten worden.

4.3.5.2 Deels gedecentraliseerd

Bij deze systeemstructuur worden de eerste twee functies, het uitlezen van de sensor en het digitaliseren van de gegevens uitgevoerd door elektronica geïntegreerd in de sensormodule. Dit brengt verhoogde complexiteit van het ontwerp van de module met zich mee, maar kan een kleinere fysieke voetafdruk hebben. Het systeem kan namelijk draadloos werken, maar ook met kabel. Omdat de gegevens al op de sensormodule zijn verwerkt is enkel een (centrale) gateway nodig die de gegevens van alle sensormodules doorstuurt naar de servers.

4.3.5.3 Gedecentraliseerd

Bij een gedecentraliseerd systeem opereert iedere sensormodule onafhankelijk en wordt de data direct op de sensormodule verwerkt. Dit systeem is het meest flexibel omdat extra sensoren toevoegen weinig aanpassingen vereist. Maar het is ook het meest kostbaar omdat iedere sensormodule afzonderlijk een directe of indirecte draadloze of bedrade verbinding met het internet nodig heeft. Voor deze verbinding is extra hardware evenals capabele software nodig wat iedere sensormodule complexer maakt. Zowel de bedrade versie (via Ethernet) als de draadloze versie (via Wi-Fi) vereist een eigen voeding, aangezien deze protocollen niet zijn bedoeld voor energieoverdracht. Wel bestaat er een Power over Ethernet (PoE) injector die voeding van de sensormodule mogelijk maakt, gebruikmakende van de aanwezige Ethernet kabel, zie paragraaf 4.3.3.1. De gedecentraliseerde systeemstructuur heeft als grootste voordeel diens flexibele inzetbaarheid, uitbreidbaarheid en de onafhankelijkheid van de verschillende sensormodules.

4.4 Morfologisch overzicht

In *figuur 16* is een Morfologisch overzicht weergegeven. Dit is een visuele representatie van de deelfuncties van een sensorsysteem zoals beschreven in paragraaf 4.3 met voor iedere deelfunctie de in de paragrafen hiervoor besproken opties. Het eindontwerp gebruikt voor iedere deelfunctie één optie, de structuur van de deelfuncties en opties in het Morfologisch overzicht is hetzelfde als de opbouw van de voorgaande paragraaf.

Morfologisch overzicht								
Deelfunctie:	Optie:							
Luchtdruksensor	Absolute sensor		Barometrische sensor		Differentiële sensor		Gauge sensor	
Sensorplaatsing	Binnen de buis		Direct buiten op de buis					
Voeding	Kabel		Batterij		Energy Harvesting			
Gegevensoverdracht	Bedraad		Draadloos					
	Ethernet	Coax	Ble	WiFi	Zigbee	NB-IoT	LoRaWAN	
Besturingsstructuur	Sensoren direct verbonden met één centrale computer		Onafhankelijke modules met één centrale gateway		Iedere module een eigen internetverbinding			

Figuur 16: Morfologisch overzicht met verschillende opties voor de systeemstructuur.

4.5 Concepten

Concepten									
Deelfunctie:	Optie:								
Luchtdruksensor	Absolute sensor	Barometrische sensor		Differentiële sensor		Gauge sensor			
Sensorplaatsing	Binnen de buis	Direct buiten op de buis							
Voeding	Kabel	Batterij		Energy Harvesting					
Gegevensoverdracht	Bedraad		Draadloos						
	Ethernet	Coax	Ble	WiFi	Zigbee	NB-IoT	LoRaWAN		
Besturingsstructuur	Sensoren direct verbonden met één centrale computer		Onafhankelijke modules met één centrale gateway		Iedere module een eigen internetverbinding				
	Rode concept		Blauwe concept		Gele concept		Groene concept		

Figuur 17: Door middel van gekleurde lijnen is de samenstelling van drie concepten weergegeven in de opties van het Morfologisch overzicht.

Een zelfstandig functionerend sensorsysteem dat data vergaard en doorstuurt naar een database heeft de deelfuncties in de kolom "Deelfuncties" in *figuur 16*. Voor iedere deelfunctie zijn binnen de globale eisen zoals gegeven in paragraaf 4.1 en de specifieke eisen zoals gegeven in *Bijlage D: Programma van Eisen* verschillende opties gedefinieerd zoals te zien in *figuur 16*. Combinaties van deze opties worden in paragraaf 4.5 samengevoegd tot vier concepten. In het daarop volgende hoofdstuk wordt iedere optie geanalyseerd zodat uiteindelijk het beste concept kan worden gekozen.

4.5.1 Rode concept

Wat betreft systeemstructuur is dit concept het eenvoudigst. Het bestaat uit barometrische sensoren die in de buizen worden aangebracht. Door middel van kabels worden de sensoren gevoed en worden de sensoren centraal door één PLC uitgelezen. De sensoren worden vergezeld van een stukje elektronica om juiste signaaloverdracht naar de PLC te verzekeren. Hiervandaan wordt de data via het Ethernet naar de servers van KUBO gestuurd.

4.5.2 Blauwe concept

Dit concept vereist enige autonomie en dus redelijk geavanceerde elektronica ter plaatse van de sensoren. De modules beschikken namelijk over microcontrollers om de sensoren uit te lezen en de data te verwerken. Ze worden gevoed vanaf een batterij en de data wordt draadloos via een radiomodule gebruikmakende van LoRaWAN verstuurd naar een centrale gateway. Vanwege het geheel ontbreken van draden bij dit concept is installatie van de sensormodules eenvoudig en kan de gehele module in de buis worden geplaatst. De sensor moet dan een barometrische luchtdruksensor zijn. De centrale gateway verstuurt de data via het Ethernet naar de servers. Een LoRaWAN gateway is een generiek, ruim verkrijgbaar product. Omdat het vervangen van een batterij binnenin de buizen geen kleine ingreep is moet de sensormodule zo energiezuinig mogelijk zijn om de noodzaak hiertoe zelden voor te laten komen.

4.5.3 Gele concept

Deze sensormodule wordt buiten de buis geplaatst. Op deze manier kan een differentiële luchtdruksensor worden gebruikt door een slang met een diameter van niet meer dan een centimeter door een gat in de wand van de buis naar binnen te brengen.

Deze sensor meet dan het drukverschil tussen de atmosferische druk buiten de buis en de druk binnenin de buis. Met eenvoudige elektronica kunnen de ongebruikte strengen van een Ethernet kabel (zie paragraaf 4.3.4.1.1) gebruikt worden om de sensormodule te voeden waardoor deze vrijwel direct op een normale router kan worden aangesloten met een UTP kabel. Indien een Ethernet switch met een Power over Ethernet (PoE) functie gebruikt wordt kunnen hier meerdere sensormodules op worden aangesloten en kan de switch door één kabel met de router worden verbonden om een grote hoeveelheid kabels te voorkomen die allemaal naar de router toe lopen.

4.5.4 Groene concept

Het groene concept verschilt weinig van het blauwe concept. De manier waarop beide concepten gegevens versturen verschilt. Zo ligt bij het blauwe concept meer de focus op het overbruggen van grote afstanden op een energiezuinige manier, terwijl het groene concept het voorkomen van interferentie prioriteert. Bij het installeren van een omvangrijk sensorsysteem binnen een grote metalen kooi (de kas) kunnen problemen ontstaan met het draadloos versturen van gegevens. Vooral wanneer de kas in compartimenten is opgedeeld bestaat de kans te maken te hebben met een zogenaamde Kooi van Faraday (Geertsma, 2014) die het versturen van radiogolven bemoeilijkt. Het bij dit concept gekozen communicatieprotocol, Zigbee, is toegespitst op het overkomen van interferentie en blokkades door tussen verschillende aangesloten apparaten een zogenaamd mesh netwerk te vormen. Dit zorgt voor een robuustere gegevensoverdracht. De werking van een dergelijk netwerk wordt beschreven in paragraaf 4.3.4.2.

5 ONTWERP

5.1 Conceptkeuze

Voor dit ontwerp is het IoT concept gekozen dat beschreven is in paragraaf 4.5.2 als het blauwe concept. De belangrijkste factor in de keuze voor dit concept was de draadloze functionaliteit. Ook is het doordat iedere sensormodule los staat een modulair systeem zonder zogenoemd "single point of failure". Modules kunnen eenvoudig apart vervangen worden. Het ontwerp wordt gestructureerd aan de hand van dezelfde deelfuncties als in paragraaf 4.3. Per deelfunctie is verantwoord wat de voordelen van de gekozen optie zijn voor het systeem en hoe dit bijdraagt aan het voldoen aan het PvE.

In onderstaande tabel is de invloed van iedere gekozen optie op iedere andere gekozen optie uiteengezet, de eerste rij en de eerste kolom zijn aan elkaar gelijk. De manier waarop dit moet worden gelezen is als volgt. Het kopje van de kolom geeft het onderwerp. De correlerende rij geeft de invloed of randvoorwaarden die dat component uitoefent op de deelfunctie in kop van de kolom. Zo zorgt bijvoorbeeld de gekozen besturingsstructuur wat betreft de sensorplaatsing ervoor dat alles in één compacte behuizing in de buis kan worden geplaatst. En kan de gekozen luchtdruksensor ter plaatse worden uitgelezen vanwege de keuze voor één microcontroller in iedere sensormodule.

	Luchtdruksensor	Sensorplaatsing	Voeding	Gegevensoverdracht	Besturingsstructuur
Luchtdruksensor	<i>Barometrisch</i>	Eenvoudige installatie	Sensor verbruikt in slaapmodus heel weinig stroom	-	Gehele sensormodule in de buis
Sensorplaatsing	Moet tenminste één sensormodule als barometrisch ijkpunt buiten de buis zijn	<i>Binnen in de buis</i>	Batterij nodig	Gegevensoverdracht draadloos	Gehele sensormodule in de buis
Voeding	Energiezuinige modus gebruiken	-	<i>Batterij</i>	Communicatie moet zo kort mogelijk zijn	Moet energiezuinig werken
Gegevensoverdracht	-	Weghouden bij storingsbronnen zoals metaal of stroombronnen	Batterij met genoeg capaciteit voor één jaar nodig	<i>LoRaWAN</i>	Gegevens moeten zo compact mogelijk worden weergegeven
Besturingsstructuur	Ter plaatste uitlezen én programmeren dus geen extra elektronica nodig	Alles in één compacte behuizing in de buis	Kan batterijniveau en temperatuur uitlezen	-	<i>Microcontrollerunit</i>

5.2 Componenten

5.2.1 Luchtdruksensor

Om de impact van installatie op de buizen miniem te houden en het sensorsysteem flexibel is een barometrische sensor gekozen. Deze wordt direct in de buis geplaatst, boven de grond omdat hier water zich kan verzamelen. Omdat barometrische luchtdruk niet constant is maar fluctueert met weer en hoogte, heeft de sensor geen ingebouwde constante ijkwaarde. Om de overdruk binnen de buis te bepalen is dus tenminste één extra sensormodule nodig in het systeem. Deze moet buiten de buizen op dezelfde hoogte als de andere sensormodules worden gemonteerd om de sensoren in de buizen van een ijkwaarde te kunnen voorzien.

5.2.2 LPS22HH

Omdat relatieve precisie een belangrijke eis was, is gekozen voor deze zeer precieze LPS22HH luchtdruksensor van ST. Met een relatieve precisie ofwel resolutie van 0,025hPa of 2,5Pa

voldoet deze aan de gestelde eisen. Dit stukje elektronica van ST kan in slaapstand gebracht worden en in "one-shot" modus uitgelezen worden. Dit is de meest energiezuinige stand. De luchtdrukwaarden kunnen, ook in slaapstand door de MCU via I2C uitgelezen worden. Er is een minder nauwkeurige sensor van dezelfde familie, de LPS33HW, die voorzien is van een gel coating en is bestand tegen luchtvochtigheid. Deze voldoet met een relatieve precisie van 10Pa niet aan de eisen. Indien een dergelijke precisie voldoende blijkt en de luchtvochtigheid een grote impact heeft op de levensduur en meetwaarden van de LPS22HH is dit een mogelijke vervanger. De vergelijkbare sensor van Bosch, de BMP384, heeft een soortgelijke gel coating en een relatieve precisie van 9Pa wat dit een goede tweede vervanger maakt.

Volgens de datasheet is het stroomverbruik van de LPS22HH in power-down mode waarin hij het grootste deel van de tijd zal verkeren 0,9 μ A. In werkende modus is dat 12 μ A.

5.2.3 Sensorplaatsing

De gekozen sensor maakt de impact van installatie op de buis gering. Hier is geen speciale kennis en weinig gereedschap voor nodig. De sensormodule moet op de gewenste plek in de buis geplaatst worden, weg van de grond om vocht te voorkomen. De sensormodules kunnen ook op andere plekken gehangen worden waar men de luchtdruk wil meten, of er kunnen sensoren aan het platform worden toegevoegd om bijvoorbeeld luchtdruk en CO2 binnen de buizen te meten. Bij de plaatsing moet enige afstand worden gehouden van bronnen van mogelijke interferentie zoals stalen constructies of (hoog)spanningsbronnen omwille van juiste gegevensoverdracht.

5.2.4 Voeding

Omdat een compleet draadloze oplossing gekozen is vereist de sensormodule een batterij. Om te voldoen aan de eisen moet deze voldoende capaciteit hebben om de sensormodule tenminste één jaar van energie te voorzien. Voor de veiligheid is het ook gewenst dat de batterij een beveiligingssysteem en een inwendige temperatuursensor bezit.

De gekozen besturingsstructuur en gegevensoverdracht protocol zijn energiezuinige oplossingen. De MCU zal het grootste deel van de tijd in slaapmodus doorbrengen. Het gegevensoverdracht protocol LoRaWAN is toegespitst op zeer laag stroomverbruik. Het ontbreken van kabels in het systeem en het voornamelijk in slaapstand zijn van de sensormodule maken dit een erg energiezuinig systeem.

In tabel 7 wordt een schatting gegeven van typisch stroomverbruik bij een voedingsspanning van 3,6V. Met een TOA van 60ms (zie tabel 6) levert dat een stroomverbruik op als volgt:

$$TOA = 60ms$$

$$Frequentie zending = 15 * 60s * 1000ms = 900.000ms$$

$$Aantal zendingen per etmaal = \frac{4}{uur} * 24 = 96$$

$$Vermogen tijdens gegevensoverdracht = P_{Tx} = I * V = 11mA * 3,6V = 40mW$$

$$Vermogen in slaapmodus = P_{sleep} = 0,3mA * 3,6V = 1mW$$

$$Vermogensverbruik per uur = (1 - TOA) * P_{sleep} + TOA * P_{Tx} = 0,94 * 0,001 + 0,06 * 0,04 = 2,4mWh$$

$$Benodigde batterijcapaciteit = \frac{3,6V}{2,4mWh} * jaar = 5,9Ah$$

Het gebruikte stroomverbruik van de componenten betreft schattingen. Het is zeer goed mogelijk dat het daadwerkelijke stroomverbruik anders is. Volgens deze schatting desalniettemin is een 6Ah batterij nodig om de module voor een jaar te voeden.

Tabel 7: Typisch stroomverbruik. Schatting op basis van waarden uit de datasheets.

	Typisch verbruik bij 3,6V in slaap modus:	Typisch verbruik bij 3,6V tijdens zenden:	Eenheid:
LoRaWAN	-	9	mA
STM32WL55JC	0,28	1,85	mA
LPS22HH	0,9	12	µA
Totaal:	~0,3	~11mA	mA

5.2.5 Gegevensoverdracht

Als gegevensoverdracht protocol is gekozen voor LoRaWAN. Dit is uitstekend geschikt vanwege het lage stroomverbruik. LoRaWAN is uitvoerig geanalyseerd in paragraaf 4.3.4.2.5.1. Het bereik van het protocol is een belangrijke factor. LoRaWAN voldoet hier zeker aan, en kan nog meer energie besparen door met minder vermogen te zenden.

Volgens figuur 11 is typisch verbruik van LoRaWAN voor zendingen met een bereik van 1km 30mW. Bij een voedingsspanning van 3,6V is dat ongeveer 9mA.

5.2.6 Besturingsstructuur

Als microprocessor is gekozen voor een STM32 MCU met een zeer laag stroomverbruik en een ingebouwde Sub-GHz radio. Deze MCU is uitermate geschikt om te gebruiken voor een batterij gevoede IoT oplossing.

5.2.6.1 STM32WL55JC

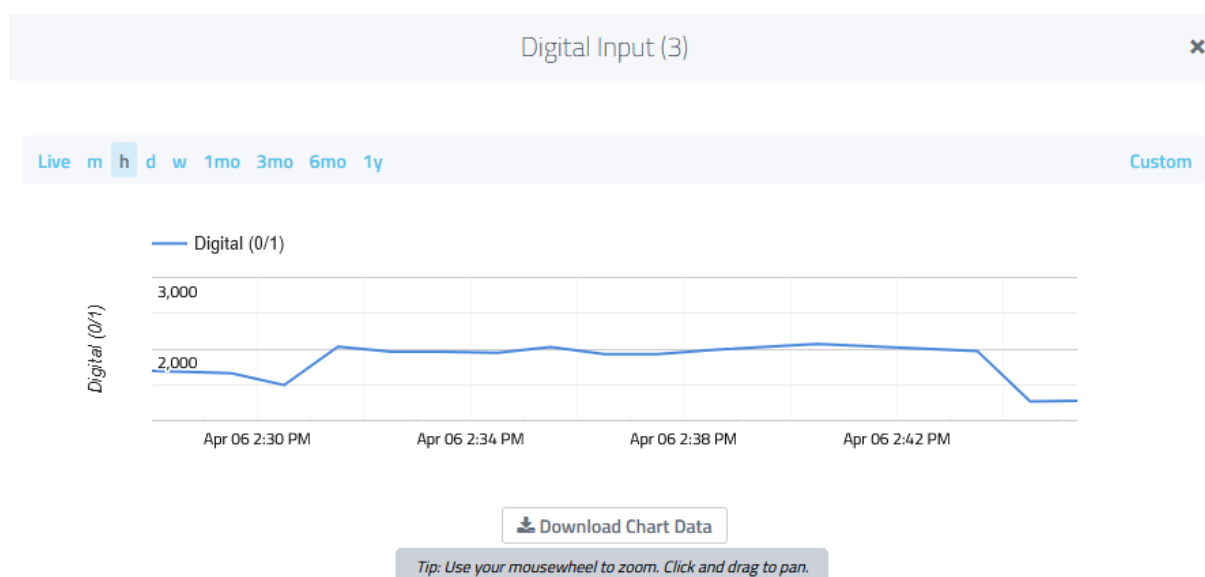
Volgens de datasheet gebruikt de STM32WL55JC in RUN mode maximaal 1.85mA. In stop mode met een lopende timer is dit 0,28mA. Dit geeft een indicatie van het gemiddelde stroomgebruik, exact verbruik is niet eenvoudig te berekenen.

5.3 Firmware

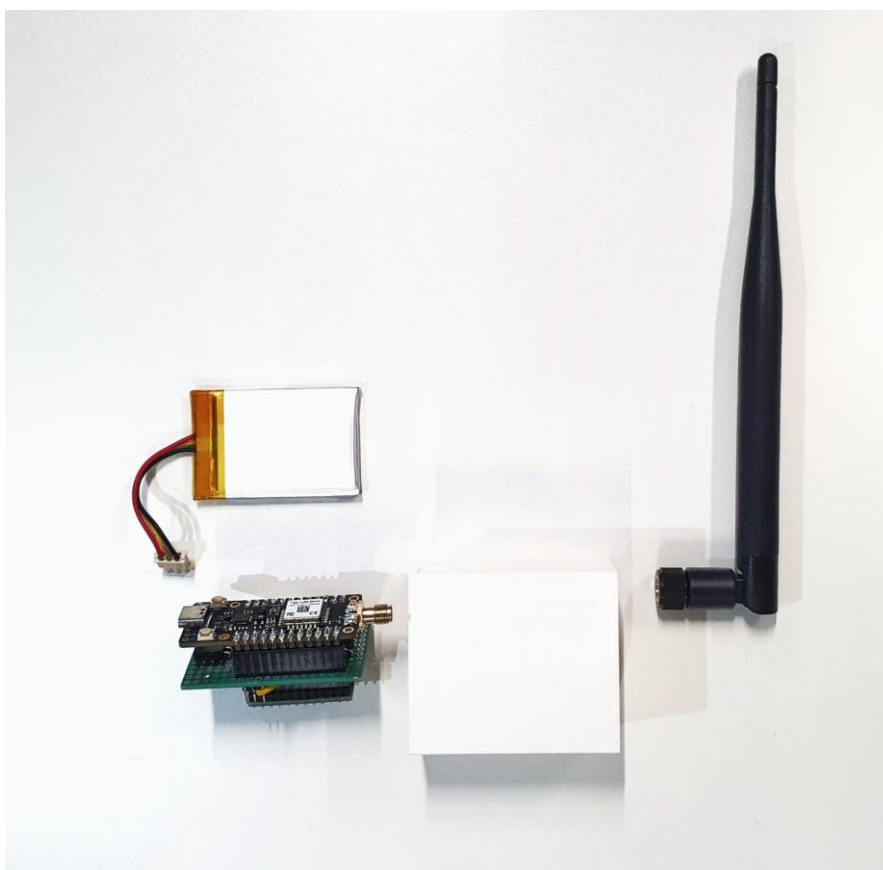
Gebruikmakende van de firmware aangeleverd door de fabrikant is de STM32 snel in staat om zijn functie te vervullen. Met voorbeeldsoftware en code generation door STM32CubeMX kunnen door middel van een Graphical User Interface (GUI) meerdere instellingen veranderd worden. Er is veel winst te behalen in energie efficiëntie door deze firmware juist aan te passen. Om er het beste gebruik van te maken moet de firmware goed begrepen worden en moeten alle energiebesparende functies worden ingeschakeld.

6 PROTOTYPE

Om de principewerking van het ontwerp aan te tonen is een prototype gemaakt, te zien in *figuur 19*. Dit verzond gebruikmakende van een 1200mAh batterij iedere 15minuten luchtdruk sensordata. In *figuur 18* is een deel van deze data te zien. Omdat de STM32WL55JC MCU op een PCB moet worden gesoldeerd, is voor het prototype een LoRa-E5-Mini bordje van Seeed Studio gebruikt, met de aansluitingen van de MCU naar buiten geleid. De LoRa-E5-Mini gebruikt de LoRa-E5 radiomodule waar de STM32WL55JC in is verwerkt.



Figuur 18: Representatie van testdata verkregen door het prototype.



Figuur 19: De componenten van het prototype. Door een gesoldeerd PCB'tje verbonden.

7 CONCLUSIE

Om een conclusie te trekken moet worden gekeken naar de adequatie van het prototype. Het vervult de functies, maar er is nog geen functioneel, te produceren ontwerp. Achteraf gezien was de STM32WL55JC ingewikkeld om te programmeren, en zonder de benodigde kennis was dit erg ingewikkeld. Wel is deze erg geschikt voor de toepassing, en indien een PCB zou worden geproduceerd met deze componenten erop is het een zeer geschikt product.

BRONVERMELDINGEN

- Al Haj Hassan, H., Nuaymi, L., & Pelov, A. (2014, February 6). *Renewable Energy in Cellular Networks: A survey*. IEEE Xplore. Retrieved April 3, 2022, from <https://ieeexplore.ieee.org/document/6731020/>
- AltexSoft. (2020, August 12). *IOT architecture: The pathway from physical signals to business decisions*. AltexSoft. Retrieved April 7, 2022, from <https://www.altexsoft.com/blog/iot-architecture-layers-components/>
- Avnet Abacus. (n.d.). *What are the different pressure sensing elements?* Avnet. Retrieved April 5, 2022, from <https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/pressure-sensing-elements/>
- Avnet. (n.d.). *Types of pressure sensors: A comprehensive overview*. Pressure Sensors: The Design Engineer's Guide. Retrieved November 22, 2021, from <https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/types>
- Baselier, J. (2020, March 14). *Lora & Lorawan*. Jarno Baselier. Retrieved February 14, 2022, from <https://jarnobaselier.nl/lora-lorawan/>
- BehrTech. (2021, September 7). *6 leading types of IOT wireless technologies and their best use cases*. BehrTech. Retrieved April 4, 2022, from <https://behrtech.com/blog/6-leading-types-of-iot-wireless-tech-and-their-best-use-cases/>
- BTEC Cisco. (n.d.). *Encoding Methods*. Encoding methods. Retrieved March 30, 2022, from <http://units.folder101.com/cisco/sem1/Notes/ch7-technologies/encoding.htm>
- Crijns, K. (2011, November 25). *Hoe Werkt Ethernet?* Hardware Info. Retrieved April 6, 2022, from <https://nl.hardware.info/artikel/2424/3/hoe-werkt-ethernet-ethernet>
- Dineshh912. (2021, March 7). *Botnet detection on IOT devices*. GitHub. Retrieved April 3, 2022, from <https://github.com/dineshh912/IoT-botnet-attack-detection>
- Domein HBO Engineering. (2016, January). *Bacheloropleidingen Engineering - Vereniging Hogescholen*. Domein HBO-Engineering. Retrieved April 6, 2022, from https://www.vereniginghogescholen.nl/system/profiles/documents/000/000/033/original/domeinprofiel.bachelor_of_engineering.2016.pdf?1463570795
- RS Pro. (n.d.). *Everything you need to know about coaxial cable*. Everything You Need To Know About Coaxial Cable | RS Components. Retrieved April 6, 2022, from <https://uk.rs-online.com/web/generalDisplay.html?id=ideas-and-advice%2Fcoaxial-cable-guide>
- Farnell element14. (2018, April 15). *Sub-ghz: An emerging WLAN alternative for IoT applications*. Farnell. Retrieved April 7, 2022, from <https://nl.farnell.com/sub-ghz-emerging-wlan-alternative-for-iot>
- Geertsma, P. (2014, July 22). *Wat is de Kooi van Faraday of de Faraday cage?* Technisch Werken. Retrieved April 6, 2022, from <https://www.technischwerken.nl/kennisbank/techniek-kennis/wat-is-de-kooi-van-faraday-of-de-faraday-cage/>
- IOT Factory. (2021, June 25). *Beste Lorawan Netwerk servers*. IOT Factory. Retrieved February 14, 2022, from <http://iotfactory.eu/nl/producten/software-platform/beste-lorawan-netwerk-servers/>
- IOT Factory. (2021, June 26). *Privé Lorawan-Netwerk*. IOT Factory. Retrieved February 16, 2022, from <https://iotfactory.eu/nl/producten/prime-lorawan-netwerk/>
- Jarno. (2021, March 18). *What is an UTP cable?* Netwerkkabel.eu. Retrieved March 30, 2022, from <https://www.netwerkkabel.eu/en/blogs/blog/what-is-an-utp-cable/>
- Juniper Networks. (2018, October 5). *Understanding wireless interference*. Juniper Networks. Retrieved April 7, 2022, from https://www.juniper.net/documentation/en_US/junos-space-apps/network-director4.0/topics/concept/wireless-interference.html

- Klinefelter, A., Roberts, N., Shakhsher, Y., Gonzalez, P., Shrivastava, A., Roy, A. R., Craig, K., Faisal, M., Boley, J., Calhoun, B., Wentzloff, D., Akella, D., Zhang, Y., & Oh, S. (2015, March 19). *Unshielded Twisted Pair 21.3 a 6.45μw self-powered IOT SOC with integrated energy-harvesting power management and ULP asymmetric radios*. IEEE Xplore. Retrieved April 6, 2022, from <https://ieeexplore.ieee.org/document/7063087/>
- Kukoba, A. (2020, April 23). *Connecting IOT devices with Mesh Networking: Pros, Cons, and existing solutions*. Apriorit. Retrieved April 4, 2022, from <https://www.apriorit.com/dev-blog/673-mobile-mesh-networking-for-iot>
- ~~Kukoba, A. (2020, April 23). *Connecting IOT devices with Mesh Networking: Pros, Cons, and existing solutions*. Apriorit. Retrieved February 17, 2022, from <https://www.apriorit.com/dev-blog/673-mobile-mesh-networking-for-iot>~~
- LoRa Alliance. (2020, November 17). *Lorawan® is secure (but implementation matters)*. LoRa Alliance®. Retrieved February 14, 2022, from https://loro-alliance.org/resource_hub/lorawan-is-secure-but-implementation-matters/
- LoRa Developer Portal. (n.d.). *Understanding ADR: Developer portal*. LoRa Developer Portal. Retrieved April 7, 2022, from <https://loro-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/>
- Manzoor, B., Al-Hourani, A., Al Homssi, B., Magowe, K., Kandeepan, S., & Chavez, K. G. (2020, October 30). *Evaluating coverage performance of Nb-IOT in the ISM-band - researchgate*. IEEE Xplore. Retrieved April 7, 2022, from https://www.researchgate.net/publication/342763495_Evaluating_Coverage_Performance_of_NB-IoT_in_the_ISM-band
- Mens, R. (2021, October 25). *Longer ethernet cable - the best options*. LazyAdmin. Retrieved February 15, 2022, from <https://lazyadmin.nl/home-network/longer-ethernet-cables/>
- Mitchell, B. (2019, October 14). *What attenuation and amplification do to computer networks*. Lifewire. Retrieved March 30, 2022, from <https://www.lifewire.com/attenuation-and-amplification-817892>
- Moreno-Cruz, F., Toral-López, V., Escobar-Molero, A., Ruíz, V. U., Rivadeneyra, A., & Morales, D. P. (2020). Trench: Ultra-low power wireless communication protocol for IOT and Energy Harvesting. *Sensors*, 20(21), 21. <https://doi.org/10.3390/s20216156>
- Munck, M. de. (2022, January 3). *Alles wat je wilt weten over WIFI*. Internetvergelijk. Retrieved April 3, 2022, from <https://www.internetvergelijk.nl/info/wat-is-wifi/>
- Noh, S.-K., Kim, K.-S., & Ji, Y.-K. (2013). Design of a room monitoring system for wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 9(8), 189840. <https://doi.org/10.1155/2013/189840>
- Overview of IOT Networks. IOT Factory. (2021, June 26). Retrieved December 3, 2021, from <http://iotfactory.eu/iot-knowledge-center/overview-of-iot-networks/>
- Park, K. (n.d.). *Digital vs. analog transmission - purdue university*. Retrieved February 15, 2022, from <https://www.cs.purdue.edu/homes/park/cs422-datatrans-2.pdf>
- Polonelli, T., Brunelli, D., Marzocchi, A., & Benini, L. (2019). Slotted Aloha on Lorawan-Design, analysis, and deployment. *Sensors*, 19(4), 838. <https://doi.org/10.3390/s19040838>
- Ray, B. (2021, August 19). *Bluetooth vs. Bluetooth Low Energy: What's the difference? [2021 update]: Blog: Link labs*. Link Labs Blog. Retrieved February 17, 2022, from <https://www.link-labs.com/blog/bluetooth-vs-bluetooth-low-energy>
- Reynders, B., Meert, W., & Pollin, S. (2016). Range and coexistence analysis of long range unlicensed communication. *2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT)*. <https://doi.org/10.1109/ict.2016.7500415>
- Reynders, B., Meert, W., & Pollin, S. (2016). Range and coexistence analysis of long range unlicensed communication. *2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT)*. <https://doi.org/10.1109/ict.2016.7500415>

- Rosenberger, S. (2013, January 10). *Cable length for analog sensors*. Automation Insights. Retrieved April 1, 2022, from <https://automation-insights.blog/2013/01/10/cable-length-for-analog-sensors/>
- Schneier, B. (1999, September 15). *Open Source and Security*. Schneier on security. Retrieved February 14, 2022, from <https://www.schneier.com/cryptography/archives/1999/0915.html#OpenSourceandSecurity>
- Schouten, C. (2020, September 16). *Bringing shadow IOT devices into the light on Corporate Networks*. IoT For All. Retrieved April 3, 2022, from <https://www.iotforall.com/bringing-shadow-iot-devices-into-the-light-on-corporate-networks>
- Sharma, A., & Sharma, P. (2021, January 14). *Chapter: Energy Harvesting Technology for IOT Edge Applications*. IntechOpen. Retrieved April 3, 2022, from <https://www.intechopen.com/chapters/72195>
- Shepard, J. (2021, May 18). *How does mioty compare with other flavors of Lpwan?* Microcontroller Tips. Retrieved February 16, 2022, from <https://www.microcontrollertips.com/how-does-mioty-compare-with-other-flavors-of-lpwan/>
- Sick Sensor Intelligence (n.d.). *Sick Keuzehulp: Welke Druksensor is Geschikt voor uw Applicatie?* Retrieved March 29, 2022, from <https://cdn.sick.com/media/content/h03/h6a/9716202176542.pdf>
- Tran, A. V., Zhang, X., & Zhu, B. (2018, June 24). *Mechanical structural design of a piezoresistive pressure ...* MDPI. Retrieved March 11, 2022, from <http://dx.doi.org/10.3390/s18072023>
- Tuppie. (2017, January 27). *Wat is Luchtdruk? Duidelijke Uitleg*. Weerbericht, weerhistorie, vakantieweer en veel weereducatie. Retrieved March 29, 2022, from <https://www.meteolink.nl/educatief/luchtdruk/>
- Vishwakarma, R., & Jain, A. K. (2019, July 29). *A survey of ddos attacking techniques and defence mechanisms in the IOT network*. SpringerLink. Retrieved April 3, 2022, from <https://link.springer.com/article/10.1007/s11235-019-00599-z>
- Voler systems. (n.d.). *Comparison of IoT Wireless Standards*. Voler systems. Retrieved April 7, 2022, from <https://www.volersystems.com/guide-wireless-technology>
- Wireless Logic Benelux. (2021, March 30). *Vergelijk IOT Netwerken*. Wireless Logic. Retrieved April 4, 2022, from <https://www.wirelesslogic.com/nl/iot-oplossingen/vergelijk-iot-netwerken/>
- Wireless Logic. (2021, March 30). *Low power wide area networks (LPWAN) - welke oplossing past Bij U?* Wireless Logic. Retrieved April 3, 2022, from <https://www.wirelesslogic.com/nl/iot-oplossingen/low-power-wide-area-networks-lpwan/>
- Xia, F. (2009). *Wireless Sensor Technologies and Applications*. *Sensors*, 9(11), 8824–8830. <https://doi.org/10.3390/s91108824>

8 BIJLAGEN

Bijlage A: AANBEVELINGEN

SENSOREN TOEVOEGEN

Bij het kiezen van de besturingsstructuur van het systeem is rekening gehouden met het toevoegen van extra sensoren. Door het gebruik van een capabele microcontroller zijn hier meerdere communicatieprotocollen voor beschikbaar waaronder I2C, UART en SPI.

Tijdens het werk aan het prototype werd de nieuwe luchtdruksensor LPS28DFW gepresenteerd door ST, de fabrikant van de nu gebruikte LPS22HH. Deze is in tegenstelling tot de huidige sensor water- en vochtbestendig, met een betere relatieve precisie dan de huidige sensor.

ENERGIEVOORZIENING

Een technologie die nog in de kinderschoenen staat, maar een grote impact kan hebben op (draadloze) IoT oplossingen is Energy Harvesting (EH). Op grotere schaal wordt deze techniek al toegepast in de vorm van wind-, water- en zonne-energie opwekking. Op kleinere schaal wordt het ontwikkeld voor toepassingen waar het vervangen van een batterij ingewikkeld is. Om ons heen is voldoende energie aanwezig voor veel toepassingen, de uitdaging is dit efficiënt om te zetten in bruikbare energie. Dergelijke oplossingen worden voor IoT apparaten ontwikkeld om te voldoen aan eisen als een kleine voetafdruk, een lage investering en sporadische werking. Een voorbeeld van een product voor het optimaliseren van energieopwekking bij kleine apparaten wordt gegeven door het Nederlandse bedrijf Nowi. Hun oplossing zorgt voor een optimale energieopbrengst onder realistische, suboptimale omstandigheden uit bronnen zoals zonlicht, voor het voeden van zowel weinig gebruikte als energie hongerige apparaten. Andere mogelijke bronnen van energie worden besproken in paragraaf 4.3.3.3. Innovatieve oplossingen waarbij deze EH technologie geïntegreerd wordt in de microcontroller zullen de toekomst van IoT meer duurzaam maken (Klinefelter et al., 2015).

SOFTWARE

Voor het ontwikkelen van het prototype is gebruik gemaakt van firmware van ST. De implementatie ervan is gefocust op functionaliteit en niet op efficiëntie. Bij verdere ontwikkeling van dit ontwerp is ruime winst te behalen op het gebied van de levensduur van de batterij door de firmware implementatie te stroomlijnen.

Bijlage B: COMPETENTIES

Competenties worden voor de studie HBO Engineering gezien als waardeoordelen van de aanpak van verschillende projectaspecten. Bij de studie Mechatronica horen de competentieniveaus zoals gegeven in *figuur 20*. Dit betekent dat aan deze niveaus wordt voldaan bij het afronden van de studie. In *figuur 21* is de verwachting bij de initiële afstudeeropdracht (zie 0

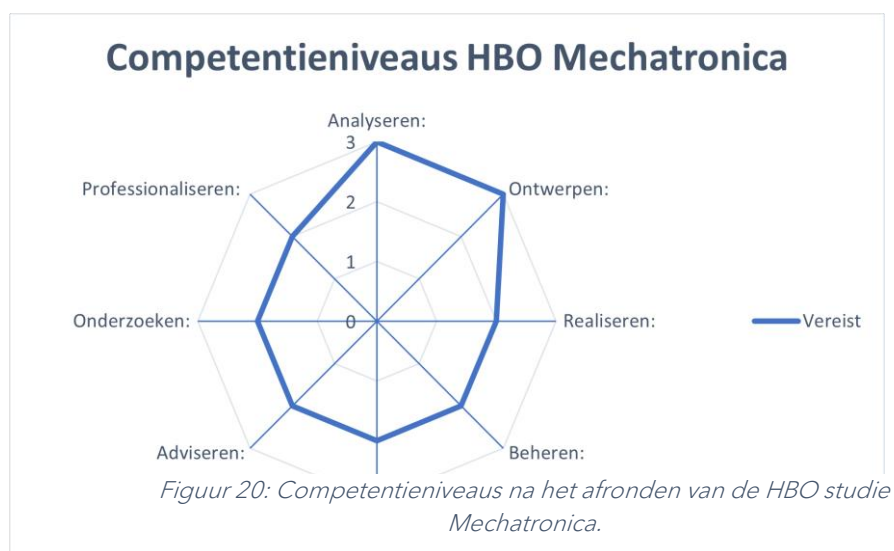
Onderwerp	Aspect	Waarde/nauwkeurigheid	M S C W	Aantekeningen
Prestaties	Precisie luchtdruk	3Pa	x	
	Precisie dataoverdracht	90%	x	Er mag maximaal 10% van de gegevens verloren gaan
	Sensormodule uitbreidbaar met andere sensoren	-	x	Bijvoorbeeld CO2 sensor. Meet- en updatefrequentie onafhankelijk.
Omgeving	Functioneren in vochtige omgeving	Niet gespecificeerd	x	
	Product heeft geen invloed op luchtkwaliteit		x	
Levensduur	Batterij	1 jaar	x	Batterij gevoed
	Sensor	3 jaar	x	
	Elektronica	5 jaar	x	
Onderhoud	Batterij eenvoudig te vervangen	-	x	
	Batterij te vervangen zonder sensormodule te verwijderen	-	x	
	Sensor te onderhouden zonder sensormodule te verwijderen	-	x	
Produktiekosten	Stuksprijs bij grote order	<15 euro per module	x	
	Componenten	-	x	
Seriegrootte	Goed te vermeerderen		x	
Afmetingen en gewicht	Klein genoeg om luchtstroom niet te belemmeren	10cmx15cmx20cm	x	
Vorm, kleur, finishing	Lucht- en waterdampdicht	-	x	

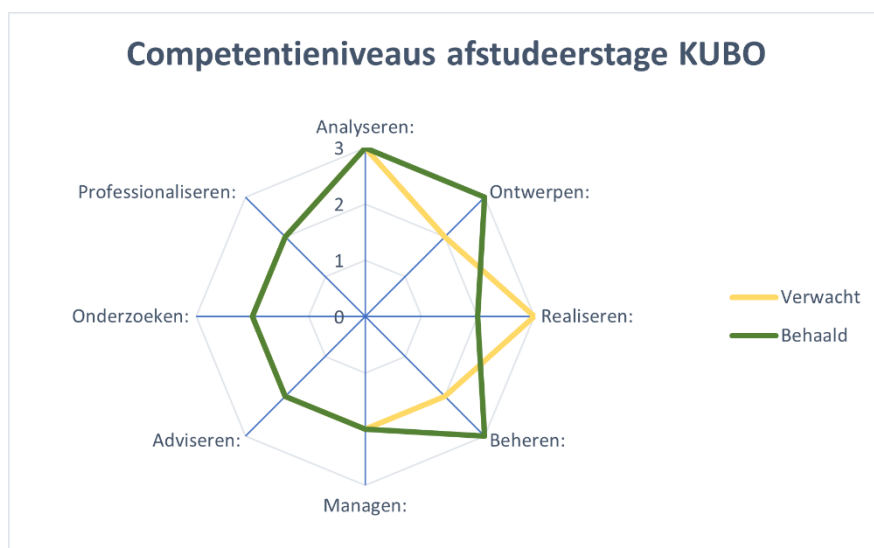
Materialen	Behuizing	-	x	Moet duurzaam zijn en tenminste even lang meegaan als de sensor
Bedrijfszekerheid	Status werking sensormodule ten alle tijden duidelijk	Moet duidelijk zijn in de database of een sensor langere tijd offline is	x	
	Met vaste regelmaat sensorwaarden verzenden	Elke 15 minuten	x	
Opslag	Sensordata	Periodiek centraal opslaan	x	
Testen	Testprogramma start automatisch bij opstarten	-	x	
Veiligheid	Geen stroom op behuizing bij defect	-	x	
	Geen lekkende stoffen bij defect	-	x	
	Defect in sensormodule propageert niet naar centrale computer	-	x	
Installatie, ingebruiksstelling	Gegevensoverdracht	tot 150 meter	x	
	Gegevensoverdracht niet beïnvloed door omstandigheden	-	x	Met uitzondering van nabijheid van storingsbronnen zoals hoogspanningscomponenten

Oorspronkelijke afstudeeropdracht) uitgezet tegen de achteraf gezien behaalde competenties. In *tabel 9* wordt de verantwoording bij ieder van deze competentieniveaus gegeven. De drie competentieniveaus indiceren verschillende mate van diepgang. In *tabel 8* worden de verschillen tussen de niveaus toegelicht.

PERSOONLIJKE LEERDOELEN

Vóór deze afstudeerstage stelde ik de persoonlijke leerdoelen meer functionele voortgang te maken en een efficiënte planning bij te houden. Als doel stelde ik een functioneel prototype af te leveren en functionaliteit te prioriteren over zogenaamde “best-practices”. Ik wilde in met disciplines werken en desalniettemin productiviteit behouden. Het evalueren van het projectverloop in het licht van deze voornemens laat zeker enige voortgang zien. Maar ook worden enige onvolmaaktheden blootgelegd. Het bouwen van een prototype was zeer tijdrovend omdat met voor mij nog onbekende componenten werd gewerkt. De keuze voor deze componenten was gemaakt omwille van een efficiënt eindontwerp, maar voor ontwikkeling verder dan een prototype was te weinig tijd. Wel zijn er zeer veel opties onderzocht en is het eindontwerp voor de toepassing erg geschikt. Het eindontwerp is discipline-overschrijdend en deze disciplines (elektronica, software, sensortechniek) werken goed samen.





Figuur 21: Competentieniveaus verbeterd tijdens deze afstudeerstage.

Tabel 8: Competentieniveaus voor HBO Engineering studies (Domein HBO Engineering, 2016).

Niveau		Aard van de taak	Aard van de context	Mate van zelfstandigheid
0	Instroomniveau (havo-5 / mbo-4 eindniveau)			
1		Eenvoudig, gestructureerd, past bekende methoden direct toe volgens bestaande normen	Bekend, eenvoudig, monodisciplinair	Sturende begeleiding
2		Complex, gestructureerd, past bekende methoden aan wisselende situaties aan	Bekend, complex, monodisciplinair, in de praktijk onder begeleiding	Begeleiding indien nodig
3		Complex, ongestructureerd, verbetert methoden en past normen aan de situaties aan	Onbekend, complex, multidisciplinair in de praktijk	Zelfstandig

Tabel 9: Competentieniveaus HBO Mechatronica, vereist, verwacht en behaald met verantwoording.

	Vereist	Verwacht	Behaald	Verantwoording
Analyseren:	3	3	3	Om een adequaat systeem te ontwerpen moest een groot aantal verschillende opties geanalyseerd worden. Hieruit moesten concepten worden samengesteld, aan de hand waarvan de eisen moesten worden aangescherpt en gedefinieerd.
Ontwerpen:	3	2	3	Om een bruikbaar en geschikt systeem te ontwerpen was inzicht in de toepassing nodig waardoor veel verschillende aspecten moesten worden overwogen. Het moest kunnen worden geproduceerd, wat een grote invloed had op keuzes voor componenten, maar ook het communicatieprotocol en de besturingsstructuur.
Realiseren:	2	3	2	Ondanks het streven een (concept) ontwerp van een PCB op te leveren is realisatie gestopt bij een handgesoldeerd prototype. Vanwege de grote hoeveelheid opties voor o.a. de besturingsstructuur en vanwege de complexiteit van het systeem was er na het ontwerpen hiervan geen tijd meer voor het uitwerken van het ontwerp.
Beheren:	2	2	3	Het werken met de softwarestructuur van de STM32 en de aangeleverde firmware om het prototype te ontwikkelen maakte grondig versiebeheer met Git onontbeerlijk.
Managen:	2	2	2	Dit kwam tijdens deze afstudeerstage niet uitgesproken aan bod.
Adviseren:	2	2	2	Het eindontwerp is een advies aan KUBO voor een zelfstandig werkend sensorsysteem. Dit was vanaf het begin de opdracht.
Onderzoeken:	2	2	2	Dit kwam tijdens deze afstudeerstage niet uitgesproken aan bod.
Professionaliseren:	2	2	2	Het systeem moest worden ontworpen om goed binnen de kassen van KUBO te functioneren. Bij de ontwerpanalyse waren hierom buiten de werking van het systeem, ook de elektronica, softwarebetrouwbaarheid, uitbreidbaarheid en fysieke en digitale veiligheid van het sensorsysteem belangrijke factoren.

Bijlage D: PROGRAMMA VAN EISEN

Tabel 10: Programma van eisen. Dit zijn de eisen aan de hand waarvan de ontwerpanalyse is gedaan.

Onderwerp	Aspect	Waarde/nauwkeurigheid	M	S	C	W	Aantekeningen
Prestaties	Precisie luchtdruk	3Pa	x				
	Precisie dataoverdracht	90%		x			Er mag maximaal 10% van de gegevens verloren gaan
	Sensormodule uitbreidbaar met andere sensoren	-			x		Bijvoorbeeld CO2 sensor. Meet- en updatefrequentie onafhankelijk.
Omgeving	Functioneren in vochtige omgeving	Niet gespecificeerd	x				
	Product heeft geen invloed op luchtkwaliteit		x				
Levensduur	Batterij	1 jaar		x			Batterij gevoed
	Sensor	3 jaar		x			
	Elektronica	5 jaar		x			
Onderhoud	Batterij eenvoudig te vervangen	-		x			
	Batterij te vervangen zonder sensormodule te verwijderen	-			x		
	Sensor te onderhouden zonder sensormodule te verwijderen	-			x		
Productiekosten	Stuksprijs bij grote order	<15 euro per module		x			
	Componenten	-		x			
Seriegrootte	Goed te vermeerderen			x			
Afmetingen en gewicht	Klein genoeg om luchtstroom niet te belemmeren	10cmx15cmx20cm		x			
Vorm, kleur, finishing	Lucht- en waterdampdicht	-		x			
Materialen	Behuizing	-			x		Moet duurzaam zijn en tenminste even lang meegaan als de sensor
Bedrijfszekerheid	Status werking sensormodule ten alle tijden duidelijk	Moet duidelijk zijn in de database of een sensor langere tijd offline is		x			

	Met vaste regelmaat sensorwaarden verzenden	Elke 15 minuten	x	
Opslag	Sensordata	Periodiek centraal opslaan	x	
Testen	Testprogramma start automatisch bij opstarten	-	x	
Veiligheid	Geen stroom op behuizing bij defect	-	x	
	Geen lekkende stoffen bij defect	-	x	
	Defect in sensormodule propageert niet naar centrale computer	-	x	
Installatie, ingebruiksstelling	Gegevensoverdracht	tot 150 meter	x	
	Gegevensoverdracht niet beïnvloed door omstandigheden	-	x	Met uitzondering van nabijheid van storingsbronnen zoals hoogspanningscompo nenten

Bijlage E: OORSPRONKELIJKE AFSTUDEEROPDRACHT

Opdracht

KUBO vraagt mij een luchtdruksensor te ontwerpen die wereldwijd kan worden toegepast in haar kassen en gevonden informatie centraal kan verzamelen. Deze informatie moet dan worden geregistreerd in het databasesysteem dat ook gebruikt wordt door de andere aanwezige regelsystemen. Dit product moet plug-and-play zijn en eenvoudig uitbreidbaar. Het is een extra doel de sensor door middel van een API te verbinden met de server van het bedrijf, zodat KUBO op afstand hulp kan bieden aan haar klanten.

Relevantie

Deze opdracht beslaat de drie disciplines van Mechatronica als volgt:

- **Werktuigbouwkunde:** Om een adequate sensormodule te ontwerpen moet deze op de juiste plek binnen de kas kunnen functioneren. Hierbij moet rekening gehouden worden met het (kunstmatige) klimaat binnen de kas, de vochtigheidsgraad, bevestiging van de sensormodule op locatie, een behuizing voor deze sensor en het niet in de weg zitten van het proces, zoals bijvoorbeeld een sensor binnen een buis. De sensor moet gemakkelijk kunnen worden geïnstalleerd en verplaatst.
- **Elektrotechniek:** Om een goedkope sensor te ontwerpen die gemakkelijk kan worden geproduceerd en gedistribueerd naar alle landen waar KUBO kassen bouwt, zal met eenvoudige sensormodules gewerkt moeten worden. Omdat de kassen groot zijn en het systeem uit te breiden moet zijn is het niet rendabel om een sensor met 150 meter kabel ertussen centraal uit te lezen. Een onafhankelijke sensormodule met eventueel eigen stroomvoorziening en geïntegreerde microcontroller zal mogelijk een uitkomst bieden. Dit product zou dan kunnen worden ontworpen als PCB met geïntegreerde sensoren en componenten en kunnen worden aangesloten op een centrale computer die de informatie inleest en upload.
- **Informatica:** Om de data, vergaard door de sensoren weer te geven wordt verlangd dit te integreren in de centrale database die nu in de kas wordt gebruikt voor onder andere de klimaatmachines. Ook zou deze data centraal via een API naar KUBO's database gestuurd kunnen worden. Op deze manier kan KUBO haar klanten op afstand analytische

ondersteuning bieden. Dit deel van het project biedt een grotere uitdaging, omdat hierbij de sensor moet samenwerken met verschillende randsystemen. Het uploaden van de data naar de servers van KUBO is daarom een wens en geen eis.

Competenties

Om af te studeren van mijn HBO studie moet ik bewijzen dat ik bepaalde competenties bezit. Binnen dit project voorzie ik de volgende competenties te bewijzen zoals beschreven in de profielbeschrijving van een engineering bachelor:

- Analyseren, niveau 3
- Ontwerpen, niveau 2
- Realiseren, niveau 3
- Beheren, niveau 2
- Professionaliseren, niveau 2