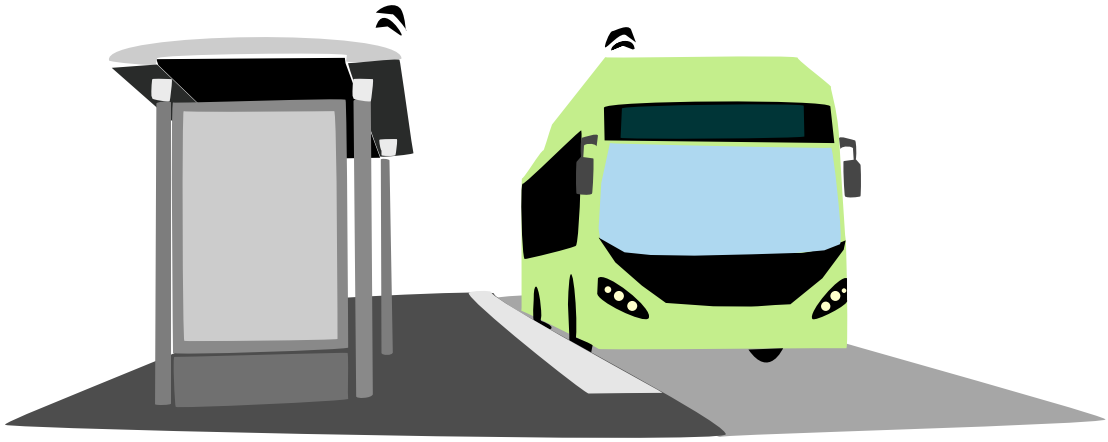
CHALMERS



Användning av kollektivtrafik för luftkvalitetsmätning

Ambulerande Sensorer för Luftkvalitet

Kandidatarbete vid Data- och Informationsteknik (15 hp)

Åke Axeland, Magnus Carlsson, Simon Duchén, Henrik Hagfeldt, Lina Lagerquist, Sofija Zdjelar

Data- och Informationsteknik
Chalmers Tekniska Högskola
Göteborg, Sverige 2019

Kandidatarbete 2019

Användning av kollektivtrafik för luftkvalitetsmätning

Ambulerande Sensorer för Luftkvalitet

Åke Axeland, Magnus Carlsson, Simon Duchén, Henrik Hagfeldt,
Lina Lagerquist, Sofija Zdjelar

CHALMERS

Department of Computer Science and Engineering
Chalmers Tekniska Högskola
Göteborg, Sverige 2019

Ett arbete som undersöker huruvida kollektivtrafiken i Göteborg kan utnyttjas för luftkvalitetsmätning.

Åke Axeland, Magnus Carlsson, Simon Duchén, Henrik Hagfeldt, Lina Lagerquist, Sofija Zdjelar

© Åke Axeland, Magnus Carlsson, Simon Duchén, Henrik Hagfeldt, Lina Lagerquist, Sofija Zdjelar, 2019.

Handledare: Håkan Burden
Examinator: Magnus Myreen

Kandidatarbete 2019
Data- och Informationsteknik
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Gothenburg
Telephone +46 31 772 1000

Typeset in LaTeX
Göteborg, Sverige 2019

Sammanfattning

Luftföroreningar är ett växande problem och idag ett av de största globala hälsoproblemen. Nästan 90 procent av jordens befolkning andas idag luft som anses hälsofarlig. Att mäta luftföroreningar ökar medvetenhet om föroreningarna och är en förutsättning för att kunna utvärdera de insatser som görs i syfte att bekämpa dem. Nuvarande mätstationer är dock dyra och ger dessutom inte en fullt representativ bild av luftkvaliteten. Med detta som bakgrund syftar rapporten till att undersöka möjligheten att använda mindre och billigare luftsensorer samt att använda bussar i kollektivtrafiken som mobila mätstationer. Detta sker genom att ett system som omfattar hela förloppet från mätning till sammanställning och visualisering av luftkvalitetsdata utvecklas.

Systemet utvecklades i tre delar, nämligen sensorenheter för mätning av luftkvaliteten, en applikation för visualisering av mätdatan och en server för lagring av datan samt överföring av data från sensor till applikation. Sensorenheterna byggdes av färdig hårdvara som mäter luftföroreningar i partikelform (PM_{10} och $PM_{2.5}$) samt luftfuktighet och temperatur. Följaktligen placerades en sensorenhet dels bredvid en dyr och pålitlig mätstation som i nuläget används för att bevaka luften i Göteborg, dels på busslinje 55 som ingår i demonstrationsarenan ElectriCity. Datainsamlingen pågick under en månads tid.

Det tekniska resultatet och mätdatan från sensorenheten på bussen talar för att det går att använda kollektivtrafiken för luftkvalitetsmätning. Systemet som utvecklades är fullt fungerande och mäter luftkvalitet som förväntat. Dessutom är mätdatan från bussen inte avvikande i relation till den från stationära sensorenheter, det vill säga mätdata i rörelse hamnar i samma spann som stationär mätdata. Mätresultatet visar att den billiga sensorenheten och den mycket dyrare mätstationen uppmätte helt olika halter partiklar, men att de i stora drag uppvisade samma mönster vad gäller plötsliga förändringar av partikelhalter. Detta var specifikt fallet vid halten $PM_{2.5}$. Detta skapar användningsområden för de billiga sensorerna. Till exempel kan många sådana sensorer tillsammans användas för att mäta positiva och negativa förändringar i luftkvalitet över längre tid.

Abstract

Air pollution is a growing problem and today one of the biggest global health concerns. Almost 90 percent of the world's population is currently breathing air considered dangerous to their health. Measuring air pollutants increases awareness of the pollutants and is a prerequisite for being able to evaluate the efforts being made to combat them. However, current measuring stations are expensive and do not provide a fully representative picture of air quality. Based on this, this report aims to investigate the possibility of using smaller and inexpensive air quality sensors and to use buses in public transport as mobile measuring stations. This is done by developing a system that covers the entire process from measuring to compiling and visualizing air quality data.

The system was developed in three parts, namely sensor units for measuring air quality, an application for visualizing the data and a server for storing and transferring air quality data between the sensors and the application. The sensor units were built from hardware that measures particulate air pollution (PM_{10} and $PM_{2.5}$) as well as humidity and temperature. Then, a sensor unit was placed next to an expensive and reliable measuring station currently used to monitor the air in Gothenburg. Another sensor unit was also placed on top of bus 55 which is part of ElectriCity demo arena. Air quality data was collected for one month.

The technical result and the air quality data from the sensor unit on the bus indicate that it is possible to use public transportation for air quality measurement. The system works as intended and measures air quality data. In addition, the data from the bus is not abnormal in relation to the data from stationary sensor units. The resulting particle measurment shows that the inexpensive sensor unit and the much more expensive measuring station measured completely different amount of particles, but that they largely showed the same pattern with regard to sudden changes in particle content. This is specifically the case when looking at $PM_{2.5}$. This creates use for the cheap sensors. For example, many inexpensive sensors can be used together to measure positive and negative changes in air quality over time.

Förord

Denna rapport är ett kandidatarbete på civilingenjörsprogrammet datateknik vid Chalmers tekniska högskola. Arbetet har genomförts av Henrik Hagfeldt, Lina Lagerquist, Magnus Carlsson, Simon Duchén, Sofija Zdjelar och Åke Axeland under vårterminen 2019. Kandidatarbetet motsvarar 15 högskolepoäng.

Under arbetets gång har vi erhållit stort stöd från vår handledare Håkan Burden. Vi vill därutöver rikta ett stort tack till Rikard Mattsson på Ericsson för teknisk hjälp, trevliga samtal och ett stort engagemang. Vi vill även tacka Ågot Watne från Miljöförvaltningen för konstruktiva samtal och värdefull expertis inom området luftföroreningar.

Slutligen vill vi tacka de företag och myndigheter som med sina resurser har underlättat vårt arbete och gjort så att projektet har kunnat fortskrida. Dessa är ElectriCity, Västtrafik, Icomera, Västfastigheter och Volvo.

Innehåll

1 Introduktion **1**
- 1.1 Syfte . . . 2
- 1.2 Frågeställningar . . . 2
- 1.3 Avgränsningar . . . 2

2 Teori **4**
- 2.1 Luftföroreningar . . . 4
  - 2.1.1 Föroreningshalter och normvärden . . . 5

3 Metod **6**
- 3.1 Kravanalys . . . 6
- 3.2 Arbetssätt . . . 7
- 3.3 Teknisk implementation . . . 7
  - 3.3.1 Sensorenhet . . . 8
  - 3.3.2 Databas . . . 10
  - 3.3.3 Webbapplikation . . . 12
  - 3.3.4 Server . . . 13
  - 3.3.5 Datakommunikation . . . 13
- 3.4 Datainsamling . . . 14
- 3.5 Dataanalys . . . 14

4 Resultat **16**
- 4.1 Tekniskt resultat . . . 16
  - 4.1.1 Sensorenhet . . . 17
  - 4.1.2 Databas . . . 18
  - 4.1.3 Webbapplikation . . . 20
- 4.2 Korrelation mellan luftkvalitetsdata . . . 22
  - 4.2.1 Partikelhalt PM_{10}, Femman . . . 22
  - 4.2.2 Partikelhalt $PM_{2.5}$, Femman . . . 24
  - 4.2.3 Luftfuktighet, Femman . . . 25
  - 4.2.4 Temperatur, Femman . . . 26
  - 4.2.5 Partikelhalter PM_{10} och $PM_{2.5}$ från rörlig respektive stationär sensorenhet . . . 27

5 Diskussion **28**
- 5.1 Tekniska val . . . 28
- 5.2 Resultat . . . 29
- 5.3 Felkällor . . . 29
- 5.4 Etik och samhällsnytta . . . 30

6 Slutsats **32**

Bilagor

A **I**

B **II**

Tabeller

2.1 Huvudsakliga utsläppskällor till luftpartiklar [12] [13] 4
2.2 Miljökvalitetsnormerna (MKN) för luftpartiklar i utomhusluft 5

3.1 Datainnehållet från partikelsensor SDS011 9
3.2 I/O-pinnar hos luftfuktighets- och temperaturmätare DHT22 10
3.3 Databas med redundant data 11
3.4 Databas utan redundant data 11
3.5 Index anger mätdatan från mätningen 11

4.1 Anslutningarna mellan mikrokontroller NodeMCU v3 och partikelsensor SDS011 17
4.2 Anslutningarna mellan mikrokontroller NodeMCU v3 och luftfuktighets- och temperaturmätare DHT22 17
4.3 Tabellen Magnitudes markerar respektive storhet med ett unikt index 19
4.4 Tabellen Measured moments lagrar information om mätningarna . . . 19
4.5 Tabellen Measured values lagrar mätdatan 19

Figurer

1.1 Elbusslinje 55 i Göteborg. Från [9]. Återgiven med tillstånd 3

3.1 Grundläggande systemöversikt 7
3.2 Mikrokontroller NodeMCU v3. Från [18], CC BY-SA 4.0 8
3.3 Luftpartikelsensor SDS011. Från [19], CC0 1.0 9
3.4 Luftfuktighets- och temperaturmätare DHT22. Från [20], CC0 1.0 . . 10

4.1 Schematisk systemöversikt: Fyra stationära sensorenheter och en rörlig på elbuss 55 sänder mätdata via MQTT till en server. Mätdatan behandlas och lagras i en databas för att sedan kunna levereras till webbapplikationen 16
4.2 Kopplingsschema mellan mikrokontroller och sensorer, skapat i Fritzing 18
4.3 ER-diagram över databasen 18
4.4 Webbapplikationens realtidskarta 20
4.5 Webbapplikationens rapportvy 21
4.6 Exempel på diagram med inzoomning och informationsruta 22
4.7 Diagram över mätdata (PM_{10}) från Miljöförvaltningens mätstation och egen sensorenhet på varuhuset Femmans tak 23
4.8 Korrelationsdiagram över mätdata (PM_{10}) från Miljöförvaltingens mätstation och egen sensorenhet på varuhuset Femmans tak. Korrelationskoefficienten är 0.496 23
4.9 Diagram över mätdata ($PM_{2.5}$) från Miljöförvaltningens mätstation och egen sensorenhet på varuhuset Femmans tak 24
4.10 Korrelationsdiagram över mätdata ($PM_{2.5}$) från Miljöförvaltingens mätstation och egen sensorenhet på varuhuset Femmans tak. Korrelationskoefficienten är 0.736 24
4.11 Diagram över mätdata (luftfuktighet) från Miljöförvaltningens mätstation och egen sensorenhet på varuhuset Femmans tak 25
4.12 Korrelationsdiagram över mätdata (Luftfuktighet) från Miljöförvaltingens mätstation och egen sensorenhet på varuhuset Femmans tak. Korrelationskoefficienten är 0.235 25
4.13 Diagram över mätdata (temperatur) från Miljöförvaltningens mätstation och egen sensorenhet på varuhuset Femmans tak 26
4.14 Korrelationsdiagram över mätdata (Temperatur) från Miljöförvaltningens mätstation och egen sensorenhet på varuhuset Femmans tak. Korrelationskoefficienten är 0.394 26
4.15 Mätdata från Buss 55 och Götaplatsen mellan 27 maj till 31 maj . . . 27

Ordlista

Attribut – Egenskaper och kännetecken som entiteter i en databas har.

API – Applikationsprogrammeringsgränssnitt. Specifikation av hur program ska skrivas för att kunna samverka med och/eller hämta information från ett program eller en tjänst som har öppet API.

Entitet – Substantiv som är kandidater till lagring i en databas.

ER-diagram – Entitets/relations-diagram. Konceptuell modell av en databas som beskriver relationen mellan entiteterna.

IDE – Utvecklingsmiljö för programmering. Till exempel är Arduino IDE utvecklingsmiljö för Arduino-kompatibla mikrokontrollerkort.

Input/Output – Förkortas I/O. Beskriver dataflödet som sker genom ett gränssnitt, till exempel pinnar på en elektrisk komponent.

Overhead – Data som behövs i datakommunikation, men som inte ingår i nyttolasten (meddelandet till mottagaren).

$\boldsymbol{PM_{10}}$ – Massan av partiklar i luften som är mindre än 10 mikrometer i diameter.

$\boldsymbol{PM_{2.5}}$ – Massan av partiklar i luften som är mindre än 2.5 mikrometer i diameter.

Pulsbreddsmodulering – Förkortas PWM. Metod för dataöverföring där data läses av genom tidsmätningar på höga och låga signaler.

Utlösare – Procedur som utlöses när vissa data ändras i en databas. Används för att se till att uppgifterna i databasen är korrekta.

UART – Universal Asynchronous Receiver/Transmitter. Hårdvara som används för dataöverföring, omvandlar parallell data till seriell data.

1. Introduktion

Luftföroreningar är ett växande problem och idag ett av de största globala hälsoproblemen [1]. Nästan 90 procent av jordens befolkning andas luft som anses hälsofarlig, vilket innebär att miljarder människor på daglig basis riskerar att drabbas av allvarliga och långsiktiga hälsoproblem såsom allergier, infektioner, lungsjukdomar och hjärt- och kärlsjukdomar [2]. Trots att halterna av luftföroreningar i Sverige är låga jämfört med i många andra länder ligger de ändå ibland på skadligt höga nivåer [3]. Luftföroreningar orsakar flera tusen för tidiga dödsfall per år i Sverige: Detta är inte bara problematiskt utifrån ett hälsoperspektiv utan också ett ekonomiskt perspektiv eftersom behandling av ovanstående hälsoproblem är en ekonomisk belastning på samhället [3, pp. 32-35]. Utöver detta bidrar luftföroreningar till växtskador, försurning och övergödning [4], liksom mindre attraktiva miljöer att resa till och/eller bosätta sig i [5].

Att mäta luftföroreningar ökar medvetenhet om föroreningarna och är en förutsättning för att kunna utvärdera de insatser som görs i syfte att bekämpa dem [2, pp. 19]. I många städer finns därför mätstationer utplacerade. Miljöförvaltningen ansvarar sedan 1970 för att övervaka luftkvaliteten i Göteborg. Deras mätningar redovisas månadsvis och årsvis i olika rapporter och datasammanställningar. Utöver detta ligger Miljöförvaltningens mätningar inom godtagbara felmarginaler för mätningar av till exempel NO_x [6]. Sammanslaget finns starka bevis för att Miljöförvaltningens luftsensorer är pålitliga. Deras mätstationer är emellertid stora, få till antalet och stationära. Datainsamlingen sker alltså punktvis. Deras huvudstation ligger dessutom på hög höjd (33 meter) vilket motarbetar syftet att mäta luftpartiklar i och med att partiklar på grund av sin tyngd finns nära marken. Utöver detta är deras mätstationer dyra: Att upprätta en kostar runt 700 000 kronor och till detta medföljer en årskostnad på 133 000 kronor (se Bilaga A). Att pålitliga luftsensorer är dyra är en förklaring till varför få låg- eller medelinkomstländer, framförallt i Asien och Afrika, mäter sin luft efter föroreningar [7]. Detta är särskilt problematiskt eftersom drygt 90 procent av dödsfallen som kopplas till luftföroreningar inträffar i just dessa länder [7]. Möjligheten att till ett lägre pris kunna mäta luft är med andra ord nödvändigt för att få bukt med luftföroreningar i fattiga länder. I resten av världen kan det bidra till att fler mätstationer upprättas.

Sammanslaget är nuvarande mätstationer dyra och ger dessutom inte en fullt representativ bild av den urbana luftkvaliteten. Större och mer befolkningstäta områden måste täckas i mätningarna, men att upprätta tillräckligt många stationära mätstationer av den befintliga typen är för närvarande varken en ekonomiskt eller

logistiskt hållbar lösning. Istället bör möjligheten att använda mindre och billigare sensorer undersökas. I framtiden skulle sådana sensorer göra det möjligt att bygga täta nätverk av mätstationer genom att de fästes i busskurer, på lyktstolpar med mera. Möjligheten att använda bussar i kollektivtrafiken som mobila mätstationer bör också undersökas. Bussar täcker hela städer under resor och dessutom med färre antal sensorer. Detta hade skapat en bättre helhetsbild av den urbana luftkvaliteten.

1.1 Syfte

Det huvudsakliga syftet med projektet är att tillsammans med intressenter utveckla en plattform med tillhörande luftsensorenheter som omfattar hela förloppet från mätning till sammanställning och visualisering av luftkvalitetsdata.

1.2 Frågeställningar

- Hur kan kollektivtrafiken givet denna plattform användas för att mäta luftkvalitet?
- I vilken utsträckning korrelerar mätdatan från mindre, billigare sensorer med den från dyra högteknologiska sensorer?

1.3 Avgränsningar

Projektet omfattar utvecklingen av plattformen med tillhörande sensorenheter. I rapporten kallas detta för ett system. Fokus ligger således på implementering av mjukvaran snarare än hårdvaran. Sensorenheterna har byggts av färdig hårdvara.

Ännu en avgränsning i projektet är själva utplaceringen av sensorenheterna. Eftersom Västtrafik som ansvarar för kollektivtrafiken i Västra Götaland har avtal med externa kollektivtrafiksoperatörer har en sensorenhet istället placerats på elbuss 55, detta eftersom den ingår i ElectriCity [8] – en demonstrationsarena för hållbar kollektivtrafik. I samband med detta har sensorenheter placerats på de busshållsplatser utmed samma busslinje som också ingår i ElectriCity (Götaplatsen, Chalmersplatsen och Teknikgatan). Dessa tre hållplatser är försedda med el och internetåtkomst, vilket underlättar installationen av sensorenheterna. Därutöver har en sensorenhet placerats bredvid Miljöförvaltningens huvudstation på taket till varuhuset Femman i östra Nordstan. Figur 1.1 nedan visar busslinje 55.

Figur 1.1: Elbusslinje 55 i Göteborg. Från [9]. Återgiven med tillstånd

De intressenter projektgruppen har valt att avgränsa sig till är intressenter som dels har uttryckt intresse för projektet i fråga, dels har möjlighet att förse gruppen med de resurser och den expertis som kan tänkas behövas under projektets gång. Dessa är Ericsson, Miljöförvaltningen och Västtrafik.

De luftsensorer som har använts för att bygga sensorenheterna utgör ännu en avgränsning. Eftersom projektet har begränsningar vad gäller tid och budget har två olika sensorer använts, nämligen en luftpartikelsensor som mäter två sorters partiklar och en luftfuktighets- och temperaturmätare.

2. Teori

I syfte att förse läsaren med kunskapsgrund om projektet förklarar följande kapitel grundläggande teori bakom luftföroreningar, luftföroreningshalter och normvärden.

2.1 Luftföroreningar

Luftföroreningar är gaser och partiklar som till följd av antropogent (av människan orsakade) och naturligt ursprung förekommer i atmosfären i så stor mängd att det kan få skadlig inverkan på människa och miljö. Partiklar bedöms vara den luftförorening som medför störst hälsoproblem i svenska städer [4, pp. 23]. Vanliga mått på partiklar är PM_{10} och $PM_{2.5}$ vilket motsvarar partiklar mindre än 10 respektive 2.5 mikrometer. De mindre partiklarna är avsevärt fler till antalet och har en tydlig koppling till effekter på människors hälsa − både på kort och lång sikt [10]. Till luftföroreningar i gasform räknas huvudsakligen kväveoxider (NO_x), kolväten, svaveldioxid och marknära ozon. Stora källor till luftföroreningar är bland annat förbränning, industriprocesser och fordonstrafik [11]. Huvudsakliga och mer specifika utsläppskällor till de föroreningar som mäts inom ramen för projektets genomförande finnes i inbördes ordning i Tabell 2.1 nedan.

Tabell 2.1: Huvudsakliga utsläppskällor till luftpartiklar [12] [13]

Förorening	**Källa**
PM_{10}	Inrikes transporter, vedeldning, industriutsläpp, jordbruk
$PM_{2.5}$	Vedeldning, inrikes transporter, industriutsläpp, arbetsmaskiner

Som synes ovan är trafik en av de större utsläppskällorna. Detta beror förutom på vägslitage även på förbränning av bränslen så som bensin och diesel [14]. Mängden sådana utsläpp beräknas i den svenska nationella beräkningen med hjälp av så kallade emissionsfaktorer. En emissionsfaktor ger en uppskattning av mängden utsläpp per använd mängd bränsle. Beräkningen bygger på att bränsleförbrukning multipliceras med bränslets värmevärde och dess emissionsfaktor, se ekvation (2.1) nedan.

$$\text{Utsläpp} = \text{Bränsleförbrukning} \cdot \text{Värmevärde} \cdot \text{Emissionsfaktor} \tag{2.1}$$

2.1.1 Föroreningshalter och normvärden

Luftföroreningshalter anges i mikrogram per kubikmeter ($\mu g/m^3$). Luftkvalitetsförordningen (2010:477) [15] fastställd av Riksdagen innehåller de svenska miljökvalitetsnormerna (MKN) för utomhusluft. Dessa bidrar till att skydda människors hälsa och miljön samt att uppfylla EU-direktiv. MKN anger en högsta acceptabel föroreningsnivå, varför flera luftföroreningar har skadeverkan även under dessa [4, pp. 18]. Det bör därför eftersträvas att halterna hålls så låga som möjligt. I Tabell 2.2 nedan finns MKN-värden för de föroreningar som mäts inom ramen för projektets genomförande. Värdena anger den genomsnittliga mängd ($\mu g/m^3$) som föroreningarna inte får överstiga i utomhusluft − per dygn och kalenderår.

Tabell 2.2: Miljökvalitetsnormerna (MKN) för luftpartiklar i utomhusluft

Förorening	**Medelvärdesperiod**	**MKN-värde**
PM_{10}	Dygn, år	50, 40 $\mu g/m^3$
$PM_{2.5}$	År	25 $\mu g/m^3$

Vädrets inverkan på föroreningshalterna

Det ska även anges att väderlek har betydelse för hur höga föroreningshalterna blir i luften [4, pp. 127]. Vindar transporterar och späder ut föroreningarna, medan regn hjälper till att minska halterna av dem genom att hindra material virvla upp från vägbanan. Luftfuktighet och temperatur påverkar halterna av luftpartiklar: Vid till exempel temperaturinversion kan varm luft inte stiga i höjdled som vanligt, vilket gör att föroreningar blir kvar nära marknivå. Göteborg har stora problem med inversion på grund av stadens topografi [16].

3. Metod

Detta kapitel redogör för projektets genomförande, vilket omfattar kravanalys tillsammans med projektets intressenter, implementation av systemet samt insamling och analys av luftkvalitetsdata.

3.1 Kravanalys

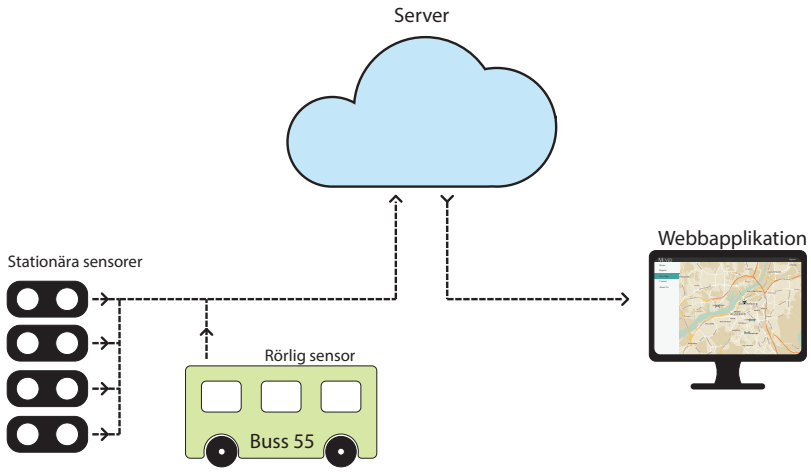
Vid projektstart utformades en målbild för projektet tillsammans med dess intressenter. En gemensam målbild var ett system som med användning av kollektivtrafiken mätte och visualiserade luftkvaliteten i Göteborg. Systemet skulle även göras skalbart så att det skulle kunna användas i andra städer, vilket betyder att det skulle kunna hantera ett stort antal mätpunkter och föroreningstyper.

Intressenternas primära fokus varierade emellertid. Miljöförvaltningens fokus låg på visualiseringen av luftkvalitetsdatan och mätdatans kvalitet. Mer bestämt önskades en applikation med realtidskarta över datan och möjligheten att sammanställa mätningar över tid i rapporter. Det bestämdes att en webbapplikation skulle utvecklas för detta ändamål då dessa kan användas på alla operativsystem.

På grund av projektets syfte samt potentialen att skala upp systemet behövde det ha låg kostnad. Inspiration till systemet hämtades således från ett projekt om sakernas internet (Internet of Things, IoT) i Tyskland vid namn Luftdaten [17] som använder sig av just billiga sensorer för luftkvalitetsmätning. Med ovanstående som bakgrund bestämdes det att ett system uppbyggt av följande tre delar behövdes för att uppfylla projektets målbild:

- Sensorenheter för mätning av luftkvaliteten
- Server för bland annat lagring av mätdatan
- Applikation för visualisering av mätdatan

Detta system visualiserades i ett tidigt skede i form av Figur 3.1 nedan.



Figur 3.1: Grundläggande systemöversikt

3.2 Arbetssätt

Projektet genomfördes genom en iterativ och inkrementell process, vilket innebär att systemet utvecklades i korta etapper och omarbetades efter respons från intressenterna. Systemet och projektet i stort utvärderades veckovis tillsammans med handledare och intressenter. Utöver detta kontaktades externa aktörer regelbundet angående infrastruktur nödvändig för projektets fortskridande (till exempel WiFi-uppkoppling och el på busshållsplatser).

3.3 Teknisk implementation

Detta avsnitt redogör för de tekniska val som gjordes samt den hårdvara, mjukvara och material som användes för att implementera systemet.

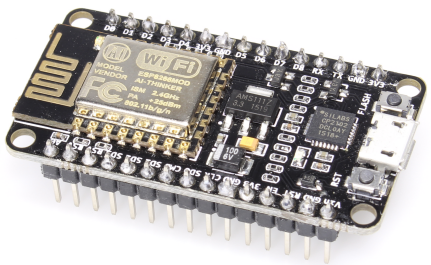
3.3.1 Sensorenhet

Sensorenheterna valdes med inspiration från Luftdaten att byggas av följande delar:

- Mikrokontroller NodeMCU v3
- Luftpartikelsensor SDS011
- Luftfuktighets- och temperaturmätare DHT22
- Kopplingskablar
- USB-kabel och USB-strömadapter
- Buntband
- Slang, invändig diameter 6 mm och längd 20 cm
- Avloppsböj som väderskydd
- Myggnät som insektsskydd

Mikrokontroller NodeMCU v3 (se Figur 3.2 nedan) valdes som huvudkomponent i sensorenheten med uppgiften att skicka mätdata från sensorenheten vidare för lagring. Mikrokontrollern bygger på WiFi-chippet ESP8266 som är bland de billigaste på marknaden för programmering av IoT-produkter och programmerades i Arduino IDE – en utvecklingsmiljö för programmering som erbjuder bra stöd för mikrokontrollern i fråga.

Mikrokontrollern har 13 pinnar för dataöverföring (I/O-pinnar), av vilka två används för dataöverföring med hårdvaran Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART) som omvandlar parallell data till seriell data. Trots att det endast finns **en** uppsättning I/O-pinnar med UART på NodeMCU går det att genom mjukvara implementera funktionaliteten hos UART även på andra I/O-pinnar.



Figur 3.2: Mikrokontroller NodeMCU v3. Från [18], CC BY-SA 4.0

Till mikrokontrollern kopplades en luftpartikelsensor av typen SDS011 (se Figur 3.3 nedan). Sensorn mäter halten PM_{10} och $PM_{2.5}$ genom principen om ljusspridning: Beroende på partiklarnas storlek och antal sprider de olika mycket ljus (olika intensitet). Sensorn har en inbyggd fläkt och matar ut den uppmätta koncentrationen partiklar på en digital utgång. Denna komponent är bland de billigaste på marknaden för partikelmätning.

Figur 3.3: Luftpartikelsensor SDS011. Från [19], CC0 1.0

Det fanns två typer av dataöverföring mellan luftpartikelsensorn och mikrokontrollern: Seriell överföring via UART samt pulsbreddsmodulering (PWM) som läser av data genom tidsmätning av höga och låga signaler. Eftersom datan som sänds över UART var tydligare dokumenterad än datan som sänds över PWM föll valet på det förstnämnda. Eftersom UART användes för dataöverföring mellan mikrokontroller och luftpartikelsensor samt för att ladda upp programvara på mikrokontrollern implementerades en funktion som möjliggör UART-överföring på godtycklig I/O-pinne hos partikelsensorn (med vissa undantag). Det finns nämligen risk för konflikt om två överföringar sker parallellt genom UART.

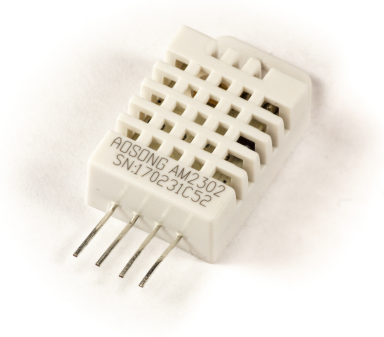
Partikelsensorn sänder data om 10 bytes − 6 bytes mätdata och 4 bytes kommunikationsdata som inte innehåller någon nyttolast (overhead). Tabell 3.1 nedan beskriver datans innehåll.

Tabell 3.1: Datainnehållet från partikelsensor SDS011

Bytenummer	**Namn**	**Värde**
0	Meddelandehuvud	0xAA
1	Kommando-nummer	0xC0
2	Data 1	$PM_{2.5}$ Låg byte
3	Data 2	$PM_{2.5}$ Hög byte
4	Data 3	PM_{10} Låg byte
5	Data 4	PM_{10} Hög byte
6	Data 5	Identifikationsbyte 1
7	Data 6	Identifikationsbyte 2
8	Checksumma	(Summa av data)
9	Meddelandesvans	0xAB

Av dessa fält används huvud och svans för att ange början respektive slut på en dataöverföring. Låg och hög byte utgör tillsammans de 16 bitar som motsvarar mätdata av respektive partikelstorlek.

Till mikrokontrollern kopplades också en luftfuktighets- och temperaturmätare av typen DHT22 (se Figur 3.4 nedan). Som nämnt i kapitel 2 Teori har väderlek betydelse för hur höga föroreningshalterna blir, varför mätaren lades till i sensorenheterna.



Figur 3.4: Luftfuktighets- och temperaturmätare DHT22. Från [20], CC0 1.0

Mätaren har 4 I/O-pinnar enligt Tabell 3.2:

Tabell 3.2: I/O-pinnar hos luftfuktighets- och temperaturmätare DHT22

Pin	**Funktion**
1	VDD 3.3 - 5.5V DC
2	Datasignal
3	Ej ansluten
4	Jord

Mätaren använder PWM för dataöverföring och använder endast en anslutning. Dataöverföringen innehåller 40 bitar varav 16 för luftfuktighet, 16 för temperatur och resterande 8 för kontrollsumma.

Sammanfattningsvis mäter ovanstående komponenter tillsammans fyra storheter, nämligen PM_{10}, $PM_{2.5}$, luftfuktighet och temperatur.

3.3.2 Databas

I syfte att organisera och lagra mätdatan från sensorenheterna utvecklades en databas i programspråket Structured Query language (SQL). Ett entitets/relationsdiagram som visuellt beskriver relationen mellan entiteterna (objekten) utformades innan utveckling av databasen för att först strukturera den. För att göra databasen skalbar utvecklades databasen på ett sådant sätt att inga specifika namn på entiteter eller deras attribut (egenskaper) skulle förekomma (fler sensorer än de som tillhandahållits skulle kunna läggas till i databasen i framtiden).

För att kunna hålla reda på exakt vilken sensorenhet mätdata skickades från bestämdes det att mikrokontrollernas unika MAC-adress skulle lagras tillsammans med GPS-position och tidpunkten då mätningen ägde rum. Sensorenheterna mäter som tidigare nämnt fyra olika slags storheter per mätning. Om all mätdata hade lagrats i samma entitet hade detta resulterat i en tabell där MAC-adress, tidpunkt och position upprepas fyra gånger per mätning. Tabell 3.3 nedan visar hur en sådan databas hade sett ut.

Tabell 3.3: Databas med redundant data

Index	**MAC-adress**	**Tidsstämpel**	**Latitud**	**Longitud**	**Värde**	**Storhet**
1	MAC1	DT1	LAT1	LNG1	V1	1
2	MAC1	DT1	LAT1	LNG1	V2	2
3	MAC1	DT1	LAT1	LNG1	V3	3
4	MAC1	DT1	LAT1	LNG1	V4	4

Istället utvecklades databasen på att sådant sätt att varje mätning markerades med ett unikt index. På detta sätt skulle redundant data undvikas. Databasen fick således ett utseende enligt Tabell 3.4 och 3.5 nedan.

Tabell 3.4: Databas utan redundant data

Index	**MAC-adress**	**Tidsstämpel**	**Latitud**	**Longitud**
1	MAC1	DT1	LAT1	LNG1

Tabell 3.5: Index anger mätdatan från mätningen

Index	**Värde**	**Storhet**
1	V1	1
1	V2	2
1	V3	3
1	V4	4

För att säkerställa att ingen kolumn i databasen har ett tomt värde och att indata har rätt struktur implementerades restriktioner parallellt med entiteterna. Med dessa kan datans reliabilitet och riktighet garanteras hos entiteterna då restriktioner specificerar regler som datan måste följa när den läggs in.

Efter att strukturen för databasen var färdig implementerades en utlösare, det vill säga en lagrad procedur som utlöses i reaktion av en modifiering i databasen eller i samband med förbestämda operationer. I detta fall utlöser den lagrade proceduren en funktion som fördelar inkommande mätdata i separata entiteter. Utöver detta implementerades flera vyer för ökad säkerhet: En vy kan representera en tabell (eller en kombination av flera) ur databasen. Vyer är virtuella och går inte att ändra på av utomstående. De ser också till att relevant data skickas till webbapplikationen.

3.3.3 Webbapplikation

Webbapplikationen utvecklades för att visualisera mätdatan från sensorenheterna – både i realtid och över längre tid. Applikationen utvecklades i programspråken JavaScript, HTML och CSS. I HTML byggdes webbapplikationens grundläggande struktur och därefter ändrades färger, form och typsnitt i CSS. I samband med detta användes JavaScript för webbapplikationens funktionalitet, till exempel inställning av parametrar och möjligheten att välja mellan realtidskarta och sammanställande av rapporter.

Realtidskartan utvecklades med hjälp av tre öppna applikationsprogrammeringsgränssnitt (API) – applikationer som tillåter samverkan med andra program eller tjänster. Följande API användes för realtidskartan:

- Google Maps API som tillhandahöll själva kartvyn och tillhörande markörer
- Miljöförvaltningens API som gav tillgång till mätdatan från deras mätstation på varuhuset Femmans tak
- Ericsson API som gav tillgång till elbussarnas GPS-position

Att uppdatera bussarnas GPS-position i realtid visade sig vara en process som krävde mycket datorkraft. Med detta som bakgrund utvecklades realtidskartan i form av ett rutnät. Användaren kunde på detta sätt filtrera bort stadsområden som inte var av intresse. Istället kunde användaren markera önskat stadsområde med ett ritverktyg från Google Maps API och bussar vars GPS-koordinater låg innanför den markerade rutan uppdaterades i realtid medan bussar utanför ignorerades. Eftersom jorden är klotformad användes ekvation (3.1) och (3.2) för att räkna ut GPS-koordinaterna i rutnätet:

$$\phi_2 = \arcsin(\sin\phi_1 \cos\delta + \cos\phi_1 \sin\delta \cos\theta) \tag{3.1}$$

$$\lambda_2 = \lambda_1 + \arctan 2(\sin\theta \sin\delta \cos\phi_1, \cos\delta - \sin\phi_1 \sin\phi_2 \tag{3.2}$$

Där ϕ_1 = latitud (start), ϕ_2 = latitud (slut), λ_1 = longitud (start), λ_2 = longitud (slut), θ = riktning (medurs från norr), d = distans, R = jordens radie och $\delta = d/R$ [21].

Rapportvyn utvecklades med användning av två bibliotek: ECharts användes för att rendera diagram i bildformatet PNG och förbereda diagrammen för nedladdning i filformatet PDF. Biblioteket valdes för att det kunde göra diagrammen interaktiva i webbläsaren. Vidare hanterar biblioteket rendering i flera grafikformat, men vektorgrafikformatet SVG valdes då det bidrar till bättre upplösning än pixelgrafikformat. PDFKit användes för att skapa en nedladdningsbar PDF-fil från det som förberetts med ECharts.

3.3.4 Server

En server implementerades som länken mellan sensorenheterna och webbapplikationen. Servern utvecklades i tre delar, nämligen datahanterare, databas och webbserver.

Datahanteraren implementerades i programspråket Python för att ligga mellan sensorenheterna och databasen − mer specifikt för att formatera mätdatan från sensorenheterna och lägga in dessa i databasen. Mellan databasen och webbapplikationen implementerades en webbserver och en websocketserver som gränssnitt med syftet att rätt data skulle skickas till rätt användare. Gränssnittet utvecklades i programsystemet NodeJS som möjliggör exekvering av JavaScript-kod på servernivå. NodeJS lämpar sig bra för serverkonstruktion på grund av dess skalbarhet och sätt att behandla parallella förfrågningar från klienter. Vidare bidrog detta gränssnitt med ytterligare säkerhet, detta genom användning av färdigkonstruerade förfrågningar som förhindar felaktig åtkomst till databasen genom typkontroll av inparametrar.

3.3.5 Datakommunikation

Detta avsnitt redogör för de kommunikationsprotokoll som valdes för dataöverföring i systemet.

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) är det protokoll som används för att skicka data från mikrokontrollerna till databasen. Detta möjliggörs av en datahanterare (MQTT broker) som fungerar som medelpunkten i MQTT nätverket. Precis som fysiska paket måste gå genom posten för att skickas till rätt mottagare, måste alla MQTT datapaket gå genom en sådan datahanteraren för att skickas vidare till rätt nod(er). För att ange var paketen ska skickas och vem som ska ta emot dem används en metod som kallas “publish and subscribe”. Metoden går ut på att paketen skickas tillsammans med ett särskilt ämne och om en enhet prenumererar på just det ämnet kommer den att motta paketen.

REST (Representational State Transfer) är en typ av mjukvaruarkitektur som förser systemet med en uppsättning begränsningar för kommunikation över internet. Mer specifikt innebär detta att server och applikation är skilda från varandra vilket möjliggör utveckling eller påbyggnad av ena parten utan att den andra påverkas. Meddelanden skickas via protokollet HTTP och bygger på efterfrågan och svar. Data skickas alltså enbart då den har efterfrågats. Detta lämpade sig bra för systemet, eller närmare bestämt webbapplikationen, då den ska sammanställa rapporter enbart då användaren frågar efter det.

Websocket är en teknik som möjliggör snabb tvåvägskommunikation, även kallat duplex, mellan klient och server. En sådan anslutning hålls öppen på obestämd tid och mängden overhead som förekommer efter att en anslutning skapats blir lägre. Som en följd av detta blir datapaketen mindre och dataöverföringen mellan klient och server mer effektiv. I systemet lämpade sig denna teknik bra för webbapplikationens realtidskarta som alltid måste ha de mest aktuella värdena.

3.4 Datainsamling

Mätdatan från sensorenheterna syftade till att ge svar på projektets frågeställningar, det vill säga:

Hur kan kollektivtrafiken användas för att mäta luftkvaliteten? En förutsättning för luftkvalitetsmätning med hjälp av bussar i linjetrafik är att det, givet ett tekniskt system kopplat till bussarna, går att mäta och lagra luftkvalitetsdata från dem. Ytterligare en förutsättning är att mätdatan i fråga inte är avvikande i relation till den från stationär mätning, det vill säga att mätdatan hamnar i samma spann som den från stationär mätning. Datainsamlingen genomfördes genom att en sensorenhet placerades på elbuss 55 och tre tillhörande busshållplatser med hjälp från Volvo. Datainsamlingen pågick under april och maj månad.

I vilken utsträckning korrelerar mätdatan från mindre, billigare sensorer med den från dyra högteknologiska sensorer? Mer specifikt utgick frågeställningen på att undersöka i vilken utsträckning mätdatan från våra egna sensorenheter korrelerar med den från Miljöförvaltningens mätstation. Datainsamlingen genomfördes genom att en sensorenhet placerades bredvid Miljöförvaltningens mätstation på taket till varuhuset Femman i östra Nordstan. Mätdatan från mätstationen utgjorde således referensdatan med vilken vi bedömde vår egen mätdatas korrekthet. Datainsamlingen pågick under april månad.

3.5 Dataanalys

Efter datainsamling analyserades mätdatan från vår egen sensorenhet på varuhuset Femman, detta för att undersöka hur väl mätdatan korrelerar med den från Miljöförvaltningens mätstation på samma plats. Storheterna $PM_{2.5}$, PM_{10}, temperatur och luftfuktighet analyserades.

Mätdatan från Miljöförvaltningen mätstation tillhandahölls genom deras öppna API. Mätdatan jämfördes därefter med mätdatan från vår egen sensorenhet med hjälp av datorprogrammet MATLAB, vilket används för matematiska och tekniska beräkningar. Innan dataanalys behövde mätdatan från Miljöförvaltningens API

först skrivas på annat format, detta eftersom tidsstämpeln var i felaktigt format och mätdatan skickades i rader (MATLAB kräver kolumner). Ett skript som kunde läsa in och behandla Miljöförvaltningens mätdata skrevs således i Python. Samma skript användes för att hämta vår mätdata från databasen, skriva den på rätt format och spara den i separata fält för vidare analysering.

Miljöförvaltningens mätstation mätte luften under andra tidpunkter än sensorenheten. På grund av detta användes vid dataanalys tekniken interpolation som skapar nya datapunkter av en redan befintlig mängd värden. Tekniken kurvanpassade mätdatan från sensorenheten och fick som följd mätdata vid samma tidpunkter som mätdatan från Miljöförvaltningens mätstation. Eftersom partikelsensorn inte kan utföra pålitliga mätningar då luftfuktigheten är över 70 % togs dessa mätpunkter bort för att få en mer tillförlitlig analys.

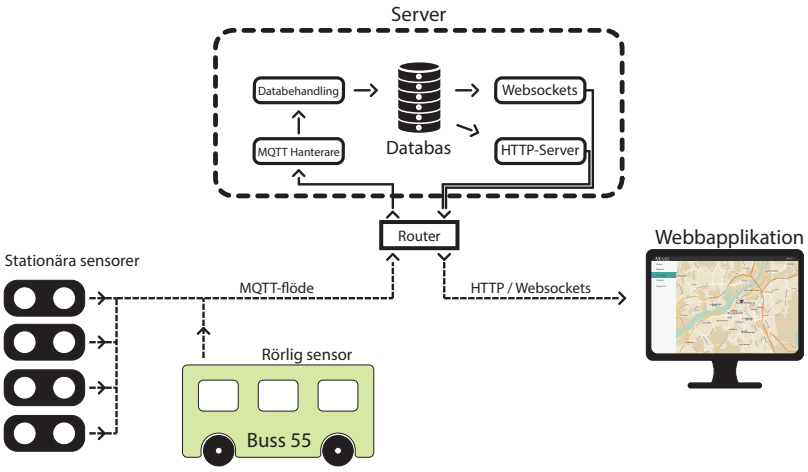
Slutligen beräknades korrelationen och angavs med en korrelationskoefficient. Korrelationen kunde därefter presenteras i spridningsdiagram. Koefficienten hamnade i ett intervall mellan -1 och 1, där 1 motsvarar en perfekt positiv korrelation. Detta betyder att en linjär funktion kan beskriva förhållandet mellan variablerna X och Y: När X ökar så kommer också Y att öka. Koefficienten -1 motsvarar istället en perfekt negativ korrelation. Också i detta fall kan en linjär funktion beskriva förhållandet, men när X ökar så kommer Y istället att minska. Korrelationskoefficienten 0 innebär att det inte finns en linjär funktion som kan beskriva förhållandet mellan variablerna X och Y.

4. Resultat

I följande kapitel presenteras projektets resultat. Detta omfattar det resulterande tekniska systemet samt korrelationsanalys av mätdatan.

4.1 Tekniskt resultat

Det slutgiltiga systemet består av fem sensorenheter, en server som behandlar samt lagrar mätdatan i en databas och slutligen en webbapplikation som sammanställer och visualiserar mätdatan. Figur 4.1 visualiserar systemet i form av en schematisk bild.



Figur 4.1: Schematisk systemöversikt: Fyra stationära sensorenheter och en rörlig på elbuss 55 sänder mätdata via MQTT till en server. Mätdatan behandlas och lagras i en databas för att sedan kunna levereras till webbapplikationen

Totalt fem luftsensorenheter ligger utplacerade i Göteborg för datainsamling. Varje minut mäter dessa enheter temperatur, luftfuktighet och halten av partiklar i den omgivande luften. Enheterna märker sedan mätdatan med tidsstämpel samt identifikationsnummer innan den serialiseras för att vidare överföras i form av ett MQTT-flöde över Wi-Fi till en server. Hos servern tas mätdatan emot av en MQTT-hanterare som ansvarar för kommunikationen mellan sensorenheterna och servern. Denna hanterare vidarebefordrar sedan mätdatan till en databehandlare på servern som strukturerar mätdatan för permanent lagring i en databas. Servern är i sin tur värd för en webbserver och en Websocket-server. Den förstnämnda har i uppgift att dels sammanställa mätdatan från databasen för REST-förfrågningar, dels leverera webbapplikationen till användaren. Den sistnämnda möjliggör kontinuerlig dataström mellan servern och webbapplikationen.

Webbapplikationen är mätdatans slutdestination. Med denna kan användare sammanställa mätdata över valfritt tidsspann i diagram, exportera rapporter i PDF-format och se aktuell mätdata (inklusive den från Miljöförvaltningens mätstation) i en realtidskarta över staden.

4.1.1 Sensorenhet

För att bygga sensorenheterna användes som tidigare nämnt färdig hårdvara. Detta avsnitt redogör för hopkopplingen av samtliga komponenter till en färdig sensorenhet. Anslutningarna mellan mikrokontrollern och partikelsensorn i sensorenheten är följande:

Tabell 4.1: Anslutningarna mellan mikrokontroller NodeMCU v3 och partikelsensor SDS011

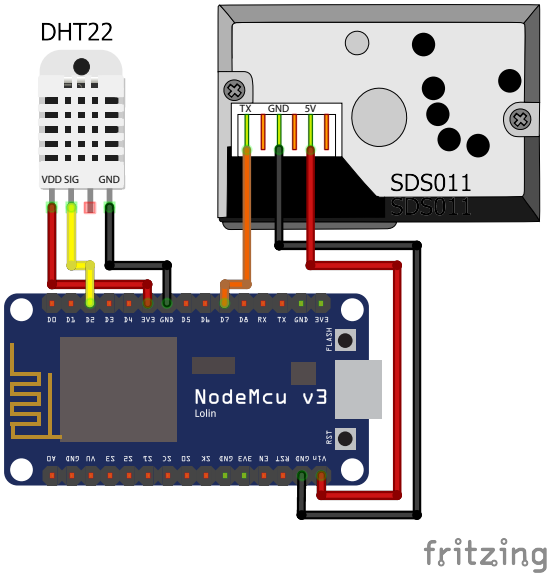
NodeMCU	**SDS011**
VIN	5V
GND	GND
D7(RX)	TX

Anslutningarna mellan mikrokontrollern och luftfuktighets- och temperaturmätaren i sensorenheten är följande:

Tabell 4.2: Anslutningarna mellan mikrokontroller NodeMCU v3 och luftfuktighets- och temperaturmätare DHT22

NodeMCU	**DHT22**
VDD	3V
GND	GND
SIG	D2

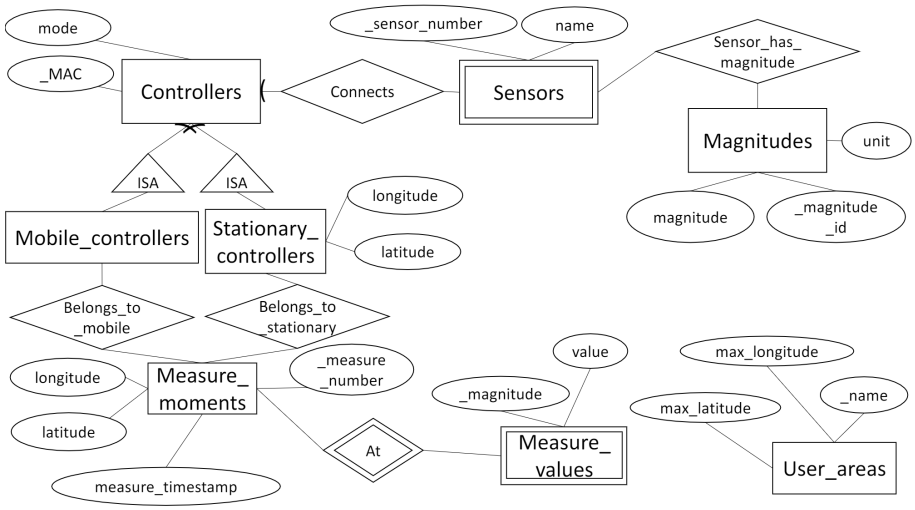
Figuren nedan (Figur 4.2) visar grafiskt hur komponenterna ovan kopplades samman.



Figur 4.2: Kopplingsschema mellan mikrokontroller och sensorer, skapat i Fritzing

4.1.2 Databas

Figur 4.3 visar ett entitets/relations-diagram över databasen. Diagrammet visualiserar hur entiteterna (rutorna) förhåller sig till varandra och vilka attribut (cirklar) dessa har. Samtliga entiteter och relationer representeras av tabeller.



Figur 4.3: ER-diagram över databasen

I databasen finns två huvudsakliga tabeller som lagrar informationen från sensorenheterna. Dessa lagrar dels mätdatan (Measured values), dels information om mätningarna (Measured moments). I tabellen Magnitudes finns de fyra storheter som mäts listade tillsammans med ett index (se Tabell 4.3 nedan).

Tabell 4.3: Tabellen Magnitudes markerar respektive storhet med ett unikt index

Index	**Storhet**
1	$PM_{2.5}$
2	PM_{10}
3	Luftfuktighet
4	Temperatur

En ny mätning sker varje minut. I Measured moments lagras varje mätning med mikrokontrollernas MAC-adress, GPS-position, tidpunkten då mätningen ägde rum och ett unikt index. Se Tabell 4.4 för ett utdrag ur tabellen.

Tabell 4.4: Tabellen Measured moments lagrar information om mätningarna

Index	**MAC-adress**	**Tidsstämpel**	**Latitud**	**Longitud**
9	00:00:00:00:00:00	19-04-21 16:21:34	57.708197	11.935212

I Measured values lagras mätningens unika index tillsammans med mätdatan och index från Magnitudes som specificerar storheten.

Tabell 4.5: Tabellen Measured values lagrar mätdatan

Index	**Värde**	**Storhet**
9	V1	1
9	V2	2
9	V3	3
9	V4	4

Utlösaren vid namn Add value utlöser funktionen New value som i sin tur delar upp inkommande mätdata till de två tabellerna Measured moments och Measured values.

Vidare finns ytterligare tabeller i databasen, till exempel Controllers som lagrar information om vilka uppkopplade mikrokontroller som skickar mätdata och Sensors som lagrar information om de sensorer som är kopplade till samma mikrokontroller. Entiteten User Areas innehåller koordinater för de område som användaren har valt.

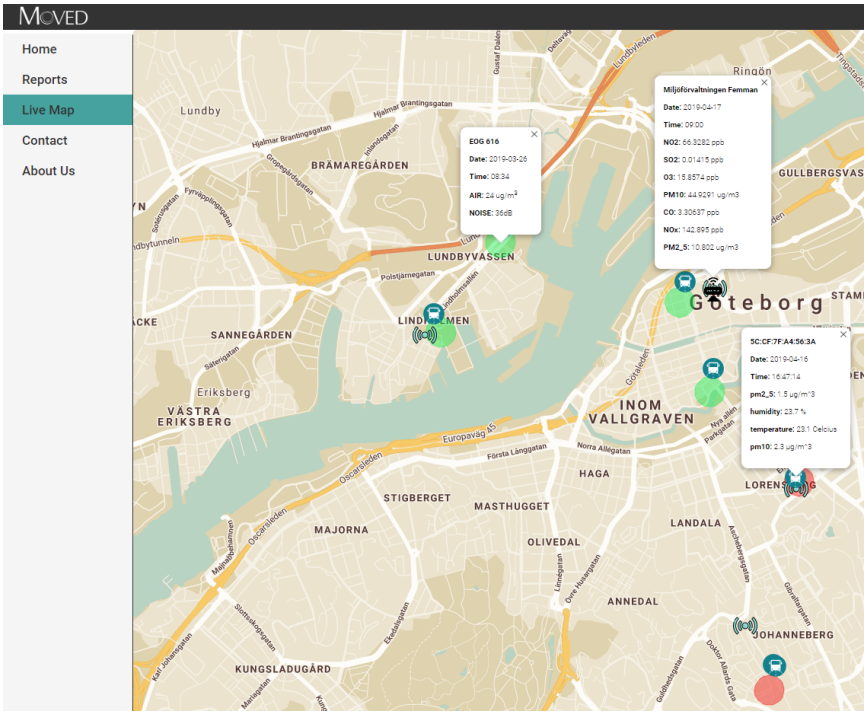
De vyer som implementerades är Report ext, Live map och Insert values. Report ext hämtar data från databasen till webbapplikationen. Tre vyer skapar tillsammans vyn Live map, nämligen Get mac loc som hämtar tid och position för de senaste mätningarna, Get number som hämtar mätningarnas unika index och slutligen Get value som hämtar mätdatan från mätningarna. Den sista vyen, Insert values, aktiverar utlösaren och innehåller sedan de värden som skickats från sensorenheterna till databasen.

Restriktionen som tillför att ingen kolumn i databasen innehåller ett tomt värde är implementerad för attributen hos samtliga entiteter. Ytterligare två restriktioner finns implementerade i Controllers där den ena kontrollerar att attributet Mode endast är Mobile eller Stationary och den andra kontrollerar strukturen hos attributet Mac, närmare bestämt att en MAC-adress endast kan läggas in i databasen om den är angiven i följande format: __:__:__:__:__:__.

4.1.3 Webbapplikation

Applikationen består av en navigationsmeny längst till vänster och en ruta i vilken vald sida visas. Webbapplikationens huvudsakliga funktionalitet ligger under sidorna Live Map (realtidskarta) respektive Reports (rapporter), se Figur 4.4 och 4.5 nedan. Den förstnämnda innehåller en realtidskarta över mätdatan (inklusive den från Miljöförvaltningens mätstation). Den andra innehåller interaktiva diagram över mätdatan inom tidsintervall som kan laddas ned i PDF-format.

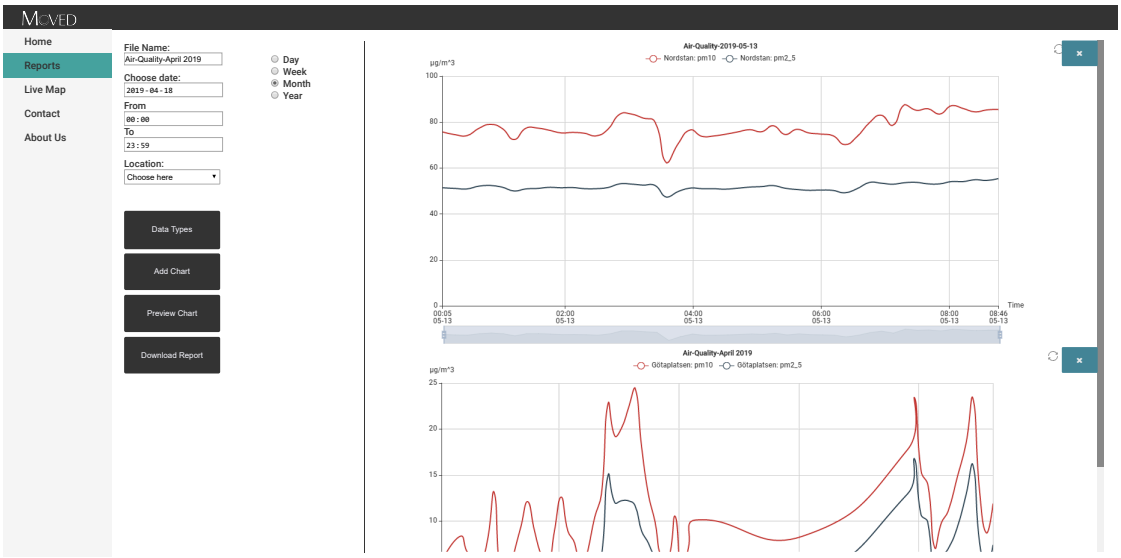
Realtidskartan består av grafiska komponenter från Google Maps API. Sidan består av ett kartobjekt (själva realtidskartan) med markörer ovanpå som representerar sensorenheterna – både stationära och i rörelse. Till de stationära sensorenheterna kopplas en informationsruta innehållandes aktuell mätdata. Mätdatan hämtas från webservern via websocket.



Figur 4.4: Webbapplikationens realtidskarta

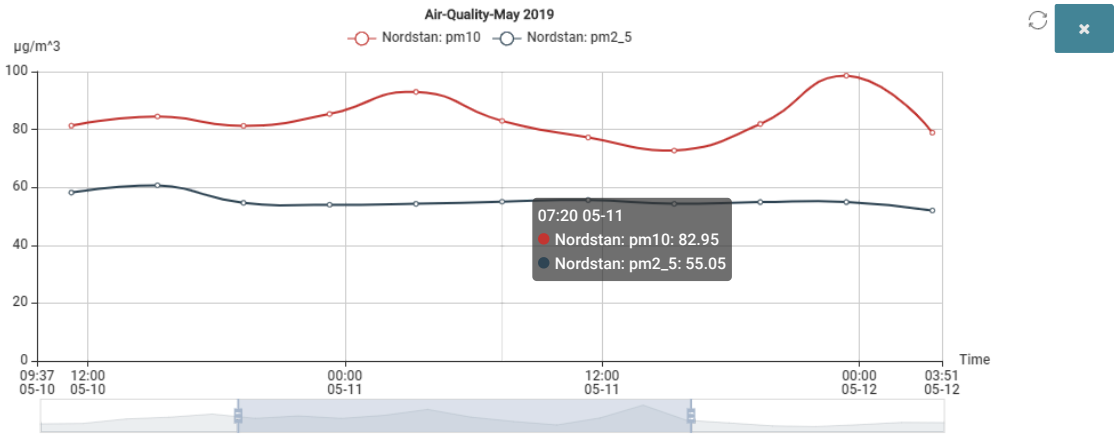
Sensorenheten i rörelse visas med en blå bussikon. Genom att använda ett ritverktyg från Google Maps API kan användaren markera önskat stadsområde på kartan. Detta skapar ett rutnät med en förinställd upplösning på 100 meter per ruta. När sensorenheten i rörelse befinner sig i rutan uppstår en cirkel. Cirkelns färg (grön, gul eller röd) beror på den uppmätta luftkvaliteten och huruvida den överstiger gränsvärden. Informationsrutorna kopplas således till cirklarna istället för bussikonerna.

Rapportvyn består i sin tur av två huvudsakliga delar, nämligen en interaktiv diagramvy och ett formulär. I formuläret kan användaren specificera önskat tidsintervall, stadsområde och vilken storhet som ska visas i diagrammet (se Figur 4.5 nedan). Användaren kan ladda ned diagrammen i PDF-format genom att klicka på knappen Download Report. Då ritas de undansparade SVG-instruktionerna ut i ett PDF-dokument och laddas ned till användarens dator.



Figur 4.5: Webbapplikationens rapportvy

Varje diagram är ett EChart-objekt som visar halten partiklar (y-axeln) och valt tidsintervall (x-axeln). Objektet renderas dels till SVG-format för senare nedladdning i PDF-format, dels en bild till diagramvyn. Användaren kan ändra storleken på diagrammet (zooma) genom att dra i den gråa områdesmarkören under diagrammet. Om användaren håller muspekaren över en mätpunkt på linjen öppnas en responsiv informationsruta i vilket mätvärde och tidsstämpel visas (se Figur 4.6 nedan).



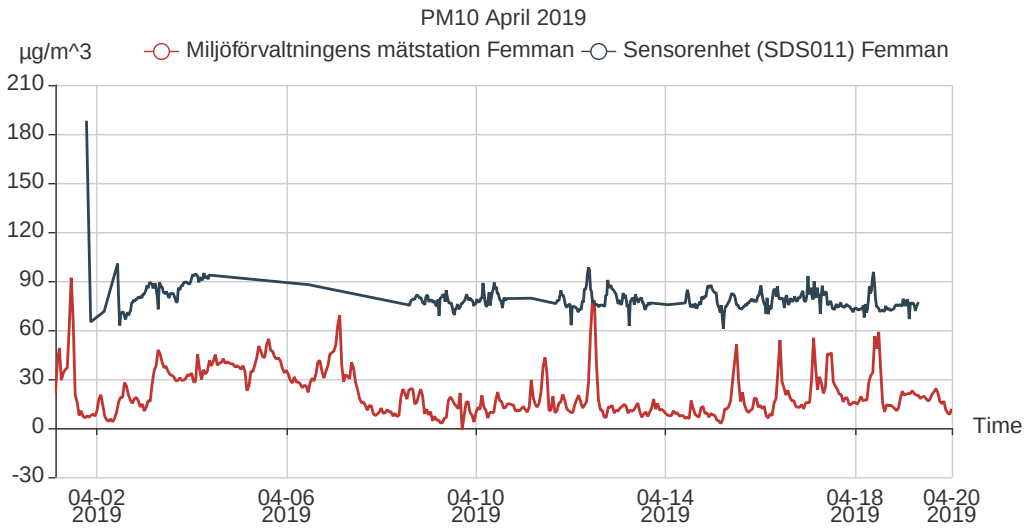
Figur 4.6: Exempel på diagram med inzoomning och informationsruta

4.2 Korrelation mellan luftkvalitetsdata

Följande avsnitt presenterar mätdatan från vår egen sensorenhet och Miljöförvaltningens mätstation på taket till varuhuset Femman i östra Nordstan. Mätdatan omfattar fyra storheter, nämligen PM_{10}, $PM_{2.5}$, luftfuktighet och temperatur. Vidare presenteras korrelationen mellan vår egen sensorenhet och Miljöförvaltningens mätstation, mer bestämt presenteras en korrelation per storhet. Sist presenteras mätdata från vår egna sensorenhet på bussen tillsammans med mätdata från en stationär sensorenhet på Götaplatsen.

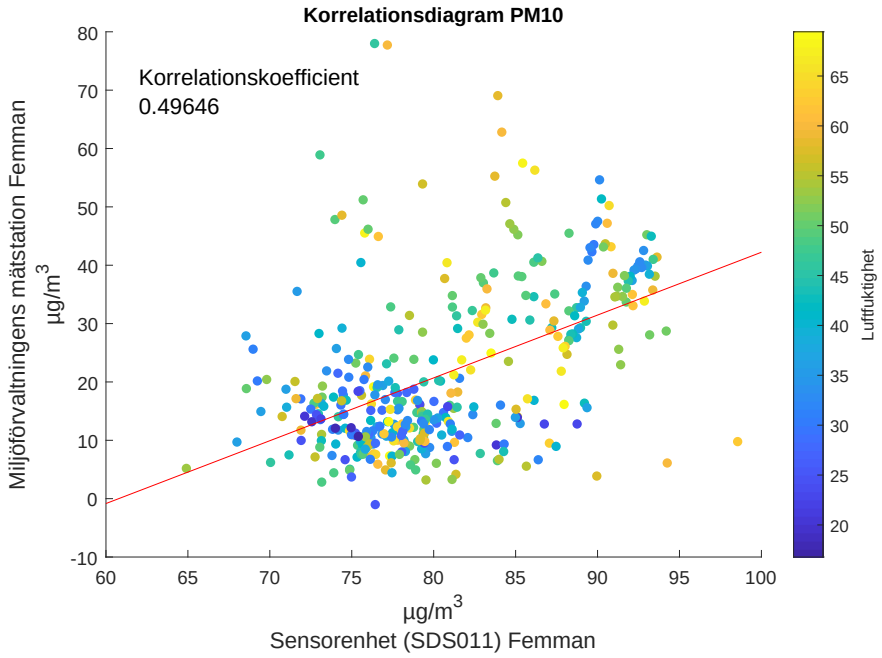
4.2.1 Partikelhalt PM_{10}, Femman

Linjediagrammet nedan (Figur 4.7) presenterar mätdatan från både våra egna sensorenhet och Miljöförvaltningens mätstation, båda på taket till varuhuset Femman. Diagrammet visar halten PM_{10} (y-axeln) mellan tidsintervallet andra och nittonde april 2019 (x-axeln). Notera att sensorenheten inte var i drift mellan den fjärde och åttonde april.



Figur 4.7: Diagram över mätdata (PM_{10}) från Miljöförvaltningens mätstation och egen sensorenhet på varuhuset Femmans tak

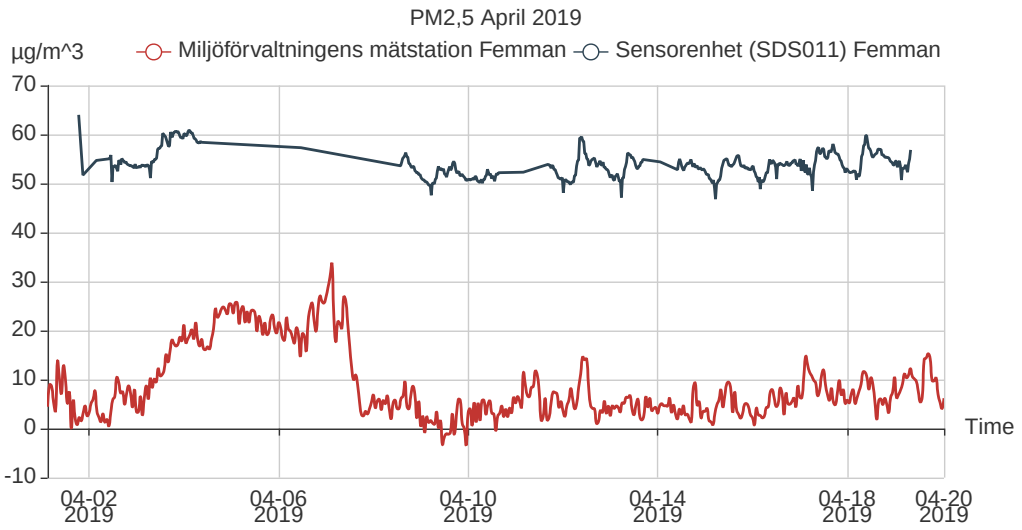
Nedanstående spridningsdiagram (Figur 4.8) presenterar ovanstående resultat i form av Pearsons korrelation. Diagrammet visar relationen mellan vår egna sensorenhet och Miljöförvaltningens mätstation. Mätpunkterna är färgkodade efter luftfuktighet enligt färgskalan på höger y-axel. Mätdata där luftfuktigheten är över 70 % har filtrerats bort under dataanalys. Korrelationskoefficienten är 0.496 vilket enligt Evans korrelationstolkning [22] tyder på en positiv och måttlig korrelation.



Figur 4.8: Korrelationsdiagram över mätdata (PM_{10}) från Miljöförvaltingens mätstation och egen sensorenhet på varuhuset Femmans tak. Korrelationskoefficienten är 0.496

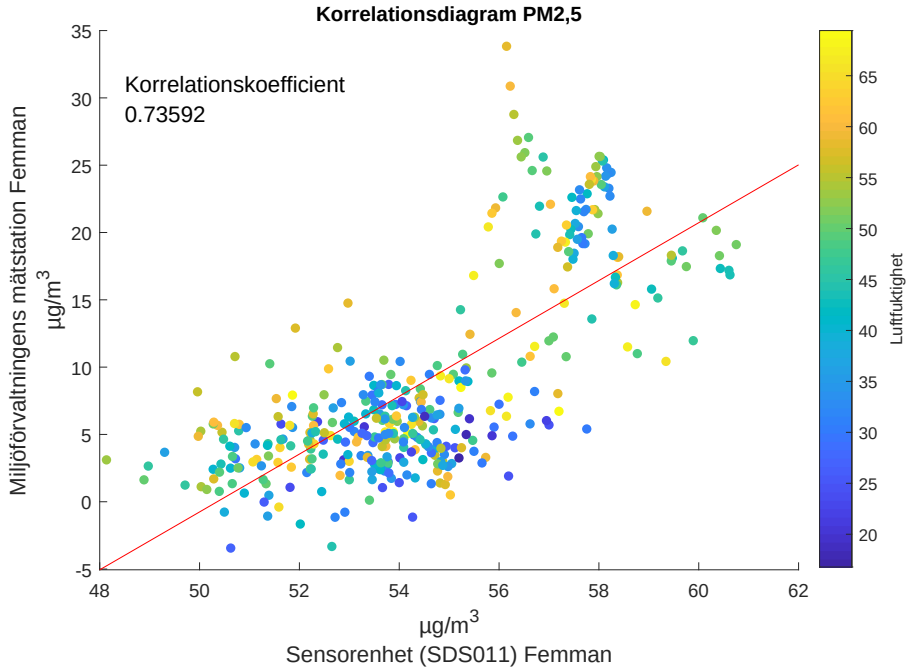
4.2.2 Partikelhalt $PM_{2.5}$, Femman

Linjediagrammet nedan (Figur 4.9) presenterar samma slags mätdata som linjediagram 4.7 ovan, men nu istället för halten $PM_{2.5}$.



Figur 4.9: Diagram över mätdata ($PM_{2.5}$) från Miljöförvaltningens mätstation och egen sensorenhet på varuhuset Femmans tak

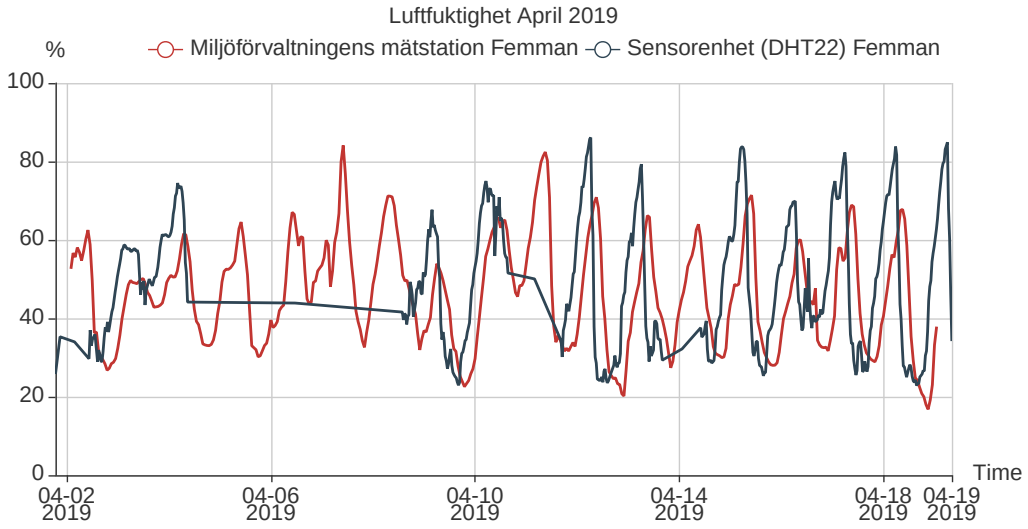
Nedanstående spridningsdiagram (Figur 4.10) presenterar ovanstående resultat i form av Pearsons korrelation. Korrelationskoefficienten är 0.736 vilket enligt Evans korrelationstolkning tyder på en positiv och stark korrelation.



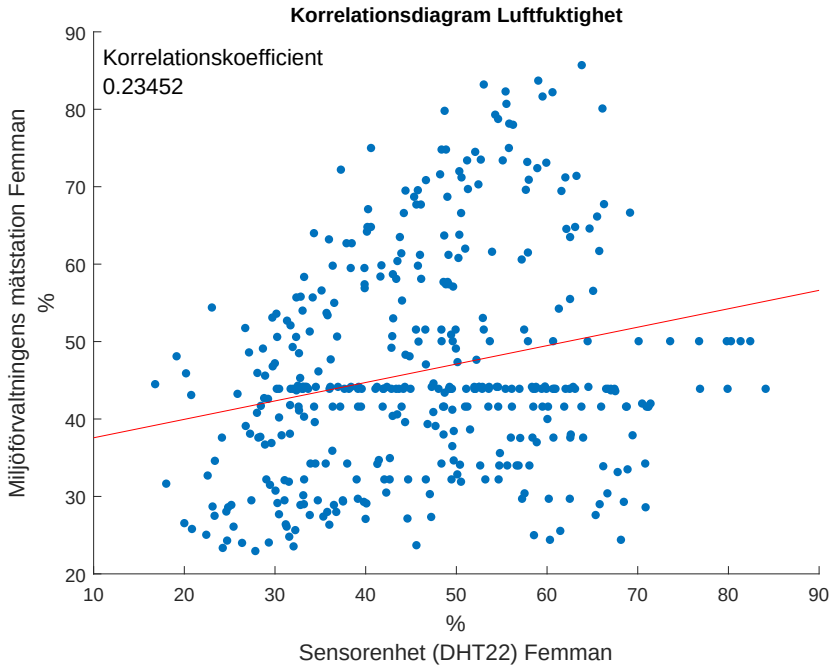
Figur 4.10: Korrelationsdiagram över mätdata ($PM_{2.5}$) från Miljöförvaltingens mätstation och egen sensorenhet på varuhuset Femmans tak. Korrelationskoefficienten är 0.736

4.2.3 Luftfuktighet, Femman

Linjediagrammet nedan (Figur 4.11) presenterar mätdatan från både vår egna sensorenhet och Miljöförvaltningens mätstation, båda på taket till varuhuset Femman i östra Nordstan. Diagrammet visar luftfuktighet i antal procentenheter (y-axeln) mellan samma tidsintervall som ovan (x-axeln). Korrelationsdiagrammet undertill presenterar korrelationen med korrelationskoefficienten 0.235, vilket enligt Evans korrelationstolkning tyder på en positiv och svag korrelation.



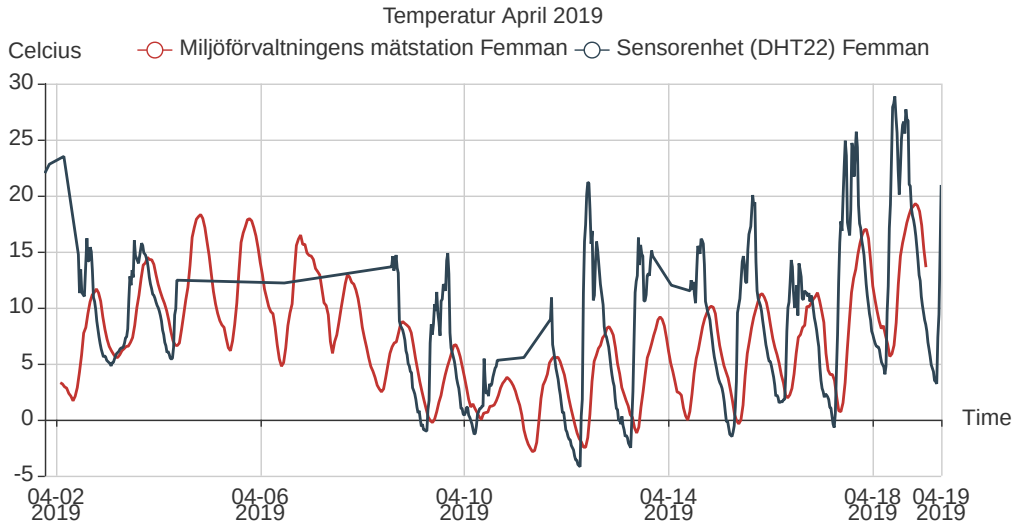
Figur 4.11: Diagram över mätdata (luftfuktighet) från Miljöförvaltningens mätstation och egen sensorenhet på varuhuset Femmans tak



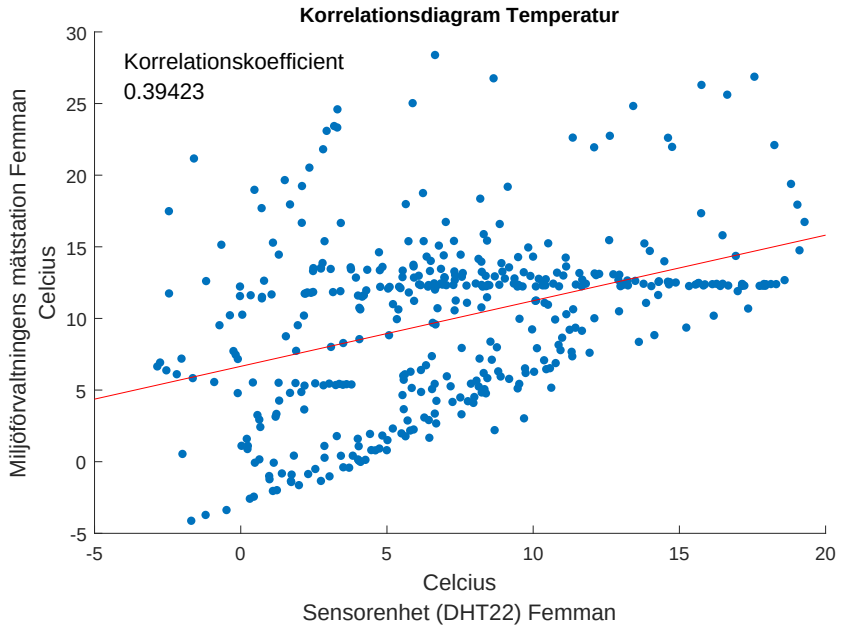
Figur 4.12: Korrelationsdiagram över mätdata (Luftfuktighet) från Miljöförvaltningens mätstation och egen sensorenhet på varuhuset Femmans tak. Korrelationskoefficienten är 0.235

4.2.4 Temperatur, Femman

Linjediagrammet nedan (Figur 4.13) presenterar mätdatan från både vår egna sensorenhet och Miljöförvaltningens mätstation, båda på taket till varuhuset Femman i östra Nordstan. Diagrammet visar temperatur i grader Celsius (y-axeln) mellan samma tidsintervall som linjediagrammen ovan (x-axeln). Korrelationsdiagrammet undertill presenterar korrelationen med korrelationskoefficienten 0.394, vilket enligt Evans korrelationstolkning tyder på en positiv och svag korrelation.



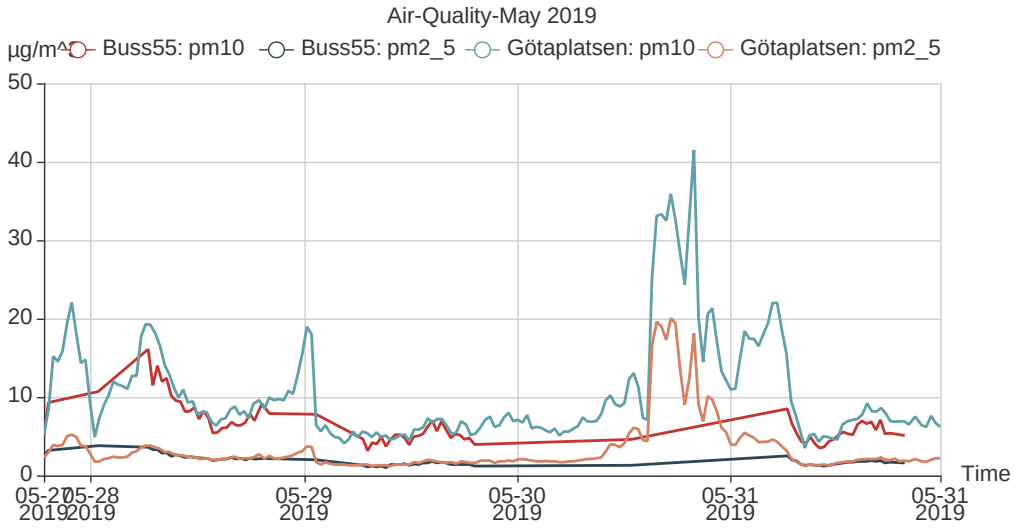
Figur 4.13: Diagram över mätdata (temperatur) från Miljöförvaltningens mätstation och egen sensorenhet på varuhuset Femmans tak



Figur 4.14: Korrelationsdiagram över mätdata (Temperatur) från Miljöförvaltningens mätstation och egen sensorenhet på varuhuset Femmans tak. Korrelationskoefficienten är 0.394

4.2.5 Partikelhalter PM_{10} och $PM_{2.5}$ från rörlig respektive stationär sensorenhet

Linjediagrammet nedan (Figur 4.15) presenterar mätdatan från våra egna sensorenheter – en på buss 55 och en på hållplats Götaplatsen. Diagrammet visar halten PM_{10} och $PM_{2.5}$ Notera att linjen planar ut mellan 30 och 31 maj för att bussen då var avstängd.



Figur 4.15: Mätdata från Buss 55 och Götaplatsen mellan 27 maj till 31 maj

5. Diskussion

I följande kapitel diskuteras projektets resultat och genomförande. Utöver detta diskuteras felkällor, etik och samhälleliga aspekter relaterat till projektet samt fortsatt arbete.

5.1 Tekniska val

Följande avsnitt diskuterar de tekniska val som gjordes och tekniska problem som uppstod under projektets gång.

Ett teknisk val som diskuterades var typen av databas som skulle användas. Bland annat vägdes relationsdatabaser mot icke-relationsdatabaser. Rikard Mattsson på Ericsson förklarade att relationsdatabaser kräver både en fördefinierad struktur och mer förberedelse, men att de är väldigt användbara vid komplexa förfrågningar. Relationsdatabaser utvecklas med hänsyn till hur datan ska lagras medan icke-relationsdatabaser utvecklas med hänsyn till dataåtkomst [23, pp. 60]. Med andra ord är icke-relationsdatabaser mer flexibla och kan ha en mer unik struktur. Vi hade sedan innan kunskaper inom relationsdatabaser, varför en sådan slutligen valdes. Om systemet hade skalats upp i framtiden och börjat lagra större mängder mätdata hade en icke-relationsdatabas passat bättre än en relationsdatabas. Då hade dataåtkomst prioriterats så att man snabbt skulle kunna hämta data från databasen.

De två första sensorenheterna som placerades ut använde en PVC-slang för att transportera partiklar till insuget hos partikelsensorn. Efter samråd med Johan Mellqvist, biträdande professor på institutionen för rymd-, geo- och miljövetenskap på Calmers tekniska högskola, byttes PVC-slangen mot en ledande plastslang hos resterande tre sensorenheter. Mellqvist förklarade att en sådan slang skulle leda till mer pålitliga partikelmätningar än en PVC-slang: PVC-plast bygger upp statisk elektricitet vilket i sin tur påverkar partiklarna som ofta kan ha laddning eller vara polära. Notera att det först över tid hade påverkat partiklarna, varför det inte gjorde någonting för detta projekt att två av våra egna sensorenheter hade sådana slangar.

Till en början användes en enkortsdator, närmare bestämt en Rasberry Pi med 1 GB RAM-minne, som server. På denna lagrades alltså databas, datahante-

rare och websocket. Enkortsdatorn i fråga valdes eftersom den fanns att tillgå vid projektstart. Med tiden fylldes databasen på med mätdata. Detta resulterade i att enkortsdatorn blev långsammare på att exekvera förfrågningar till databasen och känslig för fler än en aktiv användare. Dessutom frös eller kraschade den vid ett flertal tillfällen. Med detta som bakgrund byttes den tionde april enkortsdatorn ut mot en persondator med 8 GB RAM-minne och sedan dess fungerat utan problem.

5.2 Resultat

Det resulterande tekniska systemet och mätdatan från sensorenheten i rörelse talar för att det går att använda bussar för luftkvalitetsmätning: Systemet som omfattar sensorenheterna, servern och webbapplikationen fungerar och mäter luftkvalitet som förväntat. Dessutom pekar diagrammet med mätdatan från dels bussen, dels Götaplatsen på att mätdatan från bussen inte avvikande i relation till den från stationära sensorenheter, det vill säga mätdata i rörelse hamnar i samma spann som stationär mätdata.

Korrelationsresultatet visar att vår egen sensorenhet och Miljöförvaltningens mätstation mäter olika halter av partiklar, mer specifikt att den förstnämnda sensorn konsekvent mäter större halter. Detta pekar på att den billiga partikelsensorn inte kan mäta exakta partikelmängder vid specifika tidpunkter. Dock visar korrelationsresultatet att de billiga sensorerna och Miljöförvaltningens mätstation uppvisar samma mönster vad gäller plötsliga förändringar av partikelhalten. Detta är specifikt fallet vid halten $PM_{2.5}$. Miljöförvaltningen tyckte att detta resultat var som förväntat. Med detta menas att det stämmer överens med de undersökningar som har genomfört tidigare med samma luftpartikelsensor: Korrelationen för halten $PM_{2.5}$ är någorlunda bra medan korrelationen för halten PM_{10} är sämre.

Vidare pekar korrelationsresultatet på att korrelationen mellan vår egen sensorenhet och Miljöförvaltningens mätstation är svag vad gäller mätning av luftfuktighet och temperatur. Värt att nämna är att korrelationskoefficienten berättar om förhållandet mellan de olika populationerna snarare än hur nära två värden ligger. Detta förklarar varför korrelationen är svag fastän sensorenheten och mätstationen verkar mäta tämligen lika mängd luftfuktighet.

5.3 Felkällor

Planen var att datainsamlingen skulle pågå under april månad, men sensorenheten på varuhuset Femmans tak slutade skicka mätdata den nittonde april. Utöver detta var den inte i drift mellan fjärde och åttonde april. Enligt diagrammen i resultatet hade mätdatan från Miljöförvaltningens mätstation både upp- och nedgångar under denna period, vilka är särskilt intressanta att analysera då korrelationen undersöks. Att sensorenheten inte var i drift under en period påverkar med andra

ord korrelationsresultatet.

Som tidigare nämnt kan partikelsensorn inte utföra pålitliga mätningar då luftfuktigheten överstiger 70 %. Av den anledningen togs den mätdatan bort vid dataanalys. Notera att denna borttagning skedde med hjälp av luftfuktighetsdata från Miljöförvaltningens mätstation − som ovan nämnt pekade korrelationsresultatet på att sensorenheten korrelerar svagt med Miljöförvaltningens mycket mer pålitliga mätstationen vad gäller luftfuktighet. Av 502 partikelvärden filtrerades 105 bort vilket resulterade i att en femtedel av datainsamlingen inte gick att använda vid dataanalys.

Linjediagrammet över uppmätt temperatur visar att sensorenheten i regel mäter högre temperatur än Miljöförvaltningens mätstation. Däremot stämmer mätningarna ganska bra överens vid dalarna i diagrammet, vilket råkar vara under nätterna. Detta kan bero på att luftfuktighets- och temperaturmätaren DHT22 låg placerad inuti vinkelröret (väderskyddet) som på soliga dagar kan hettas upp och stänga in värmen vilket kan ge högre utslag vid mätningar.

Efter att dataanalysen hade genomförts och samtliga diagram hade skapats uppmärksammade biträdande professor Mellqvist en tydlig tidsförskjutning i linjediagrammen. Tidsförskjutningen är framförallt tydlig i fråga om luftfuktighet (Figur 4.11) och temperatur (Figur 4.13). Mer specifikt är mätdatan från sensorenheten på Femmans tak tidsförskjuten med två timmar. Detta påverkar korrelationen för samtliga datatyper. Hade tidsförskjutningen åtgärdats hade korrelationen för temperatur och luftfuktighet med största sannolikhet förbättrats. Däremot är det svårare att se en lika tydlig tidsförskjutning i linjediagrammen för partikelhalter och det är därför svårare att dra slutsatser kring huruvida den korrelationen hade påverkats.

5.4 Etik och samhällsnytta

Korrelationsresultatet ger hopp om att billiga sensorer en dag kommer att kunna vara användbara i framtida luftkvalitetsmätningar. Som ovan nämnt uppvisade den billiga sensorenheten och Miljöförvaltningens mätstation i stora drag samma mönster vad gäller plötsliga förändringar av partikelhalten. Detta skapar värdefulla användningsområden för billiga sensorer. Till exempel kan många sådana sensorer tillsammans användas för att mäta positiva och negativa förändringar i luftkvalitet över längre tid. Med detta kan åtgärder och insatser mot luftföroreningar utvärderas, vilket är av nytta för samhället i stort. I samband med detta skulle sensorernas låga pris kunna bidra till att många fler mätpunkter upprättas och dessutom på platser som tidigare inte ingått i luftkvalitetsmätningarna − till exempel bostadsområden och förorter.

På samma sätt skulle billiga sensorer kunna användas i situationer då halten partiklar fluktuerar temporärt och det därför är omotiverat att upprätta en stationär mätstation. Exempel på sådana situationer är byggarbete, då gatorna

sopas eller i rökrum.

Under ett möte med Miljöförvaltningen framfördes information om den billiga sensorn i fråga. Partikelsensorn har som sagt påvisats opålitlig då luftfuktigheten överstiger 70 %. Miljöförvaltningen uppmärksammade också problematiken med att mäta halten partiklar i rörelse, detta eftersom den omgivande luften skapar turbulens. I syfte att inte sprida potentiellt felaktig luftkvalitetsdata och på så vis skapa oro bland befolkningen valde vi redan vid projektstart att inte göra mätdatan publik. Däremot valde vi att informera allmänheten om projektet och luftkvalitetsmätningarna genom att låta Västtrafik göra och sätta upp affischer i bussar och på hållplatser. Affischen finns att se i Bilaga B. Det finns värde i att som ingenjör informera de som berörs av projektet, framförallt om det medför några risker [24, pp. 126]. I detta fall kunde potentiella risker omfatta förvirring eller oro kring de mycket synliga sensorenheterna.

6. Slutsats

Syftet med projektet var att utveckla en skalbar plattform med tillhörande luftsensorenheter som omfattar hela förloppet från mätning till visualisering av luftkvalitetsdata. I samband med detta önskade vi besvara hur kollektivtrafiken givet detta system kunde användas för att mäta luftkvalitet. En luftsensorenhet placerades således på en buss i linjetrafik för datainsamling. Resultatet talar för att det går att använda kollektivtrafiken för luftkvalitetsmätning: Det slutgiltiga systemet är fullt fungerande och mäter luftkvalitet som förväntat. Dessutom är mätdatan från bussen inte avvikande i relation till den från stationära sensorenheter, det vill säga mätdata i rörelse hamnar i samma spann som stationär mätdata. Detta är en huvudsaklig förutsättning för luftkvalitetsmätning med kollektivtrafiken.

Vidare önskade vi besvara i vilken utsträckning mätdatan från mindre, billigare sensorer korrelerar med den från dyra högteknologiska sensorer. En sensorenhet placerades således bredvid Miljöförvaltningens mätstation på taket till varuhuset Femman i östra Nordstan för datainsamling. Dataanalys visade att den mycket billigare sensorenheten konsekvent mäter större halter partiklar och att korrelationen som bäst är måttlig. Trots detta hävdar vi att de mycket billigare sensorenheterna kan vara av värde för samhället i stort, till exempel för att mäta förändringar i luftkvalitet över tid eller upprätta mätpunkter där det ännu inte finns några.

Fortsatt arbete är av stor vikt och bör omfatta längre datainsamling. Datainsamling under en månads tid gav oss visserligen data att analysera, men en sådan kort period är fortfarande känslig för avstickare och felkällor. Fler sensorenheter och mätningar under en längre period hade bidragit till ett mer pålitligt resultat. Att därutöver undersöka huruvida andra typer av sensorer och mikrokontroller ger bättre korrelationsresultat är av stort intresse. Mikrokontrollerna som användes i detta projekt har inte stöd för IoT-nätverk eller GPS. Med just GPS skulle man kunna jämföra mätdatan från sensorenheter i rörelse med mätdatan från stationära sensorenheter. Det finns också potential att med hjälp av systemet mäta annan relevant data, till exempel buller och NO_X.

Detta projekt har gett en inblick i hur brinnande aktuellt luftföroreningar är. Utöver detta har projektet visat hur vi som framtida dataingenjörer inte bara kan vara med och forma tekniskt avancerade samhällen, utan också hållbara samhällen: Innovativ datateknik kan i allra högsta grad hjälpa till att lösa vår tids största utmaningar. Att få bidra till att bekämpa ett globalt problem tillsammans med de som besitter resurserna att förverkliga våra idéer var en unik upplevelse.

Litteratur

[1] K. Sjöberg, "Dålig luft i många delar av världen – ett ökande hälsoproblem", *Luft och miljö 2017 – Barns hälsa*, s. 24–28, 2017.

[2] World Health Organization et al., "Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease", 2016.

[3] M. Gustafsson, J. Lindén, L. Tang, B. Forsberg, H. Orru, K. Sjöberg och S. Åström, *Quantification of population exposure to NO2, $PM_{2.5}$ and PM_{10} and estimated health impacts*, 2018.

[4] Naturvårdsverket, *Luftguiden: Handbok om miljökvalitetsnormer för utomhusluft*, 2014.

[5] Directorate-General for Environment (European Commission), *Making our cities attractive and sustainable – How the EU contributes to improving the urban environment*, 2010.

[6] Göteborgs stad, *Så övervakas luften*, Hämtad 15 februari 2019. [Online]. Tillgänglig: `www.goteborg.se/wps/portal/start/miljo/miljolaget-i-goteborg/luft/sa-overvakas-luften/`.

[7] World Health Organization, "9 out of 10 people worldwide breathe polluted air, but more countries are taking action", 2 maj 2018, Hämtad 15 February 2019. [Online]. Tillgänglig: `www.who.int/news-room/detail/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action`.

[8] *Electricity*, Hämtad 21 april 2019, [Online]. Tillgänglig: `www.electricitygoteborg.se/node/19499`.

[9] ElectriCity, *City Route*, [Elektronisk bild]. [Online]. Tillgänglig: `https://www.electricitygoteborg.se/node/19501`.

[10] Naturvårdsverket, *Fakta om partiklar i luft*, Hämtad 11 mars 2019, 2018. [Online]. Tillgänglig: `www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Klimat-och-luft/Luftfororeningar/Partiklar/`.

[11] ——, *Luftföroreningar och dess effekter*, Hämtad 25 mars 2019, 2018. [Online]. Tillgänglig: `www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Klimat-och-luft/Luftfororeningar/`.

[12] ——, *Utsläpp av grova partiklar (PM10) till luft*, Hämtad 15 februari, 2018. [Online]. Tillgänglig: `https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Partiklar-PM10-utslapp-till-luft/`.

[13] ——, *Utsläpp av små partiklar (PM2,5) till luft*, Hämtad 15 februari, 2018. [Online]. Tillgänglig: https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Partiklar-PM25-utslapp-till-luft/.

[14] ——, *Transporterna och miljön*, Hämtad 25 mars 2019, 2019. [Online]. Tillgänglig: https://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Miljoarbete-i-Sverige/Uppdelat-efter-omrade/Transporter-och-trafik/.

[15] Miljö- och energidepartementet, *Luftkvalitetsförordning (2010:477)*, Hämtad 1 april 2019, 2010. [Online]. Tillgänglig: www.rkrattsbaser.gov.se/sfst?bet=2010:477.

[16] Göteborgs Stad, *Luftkvaliteten i Göteborg*, Hämtad 1 april 2019, [Online]. Tillgänglig: www.goteborg.se/wps/portal/start/miljo/miljolaget-i-goteborg/luft/luftkvaliteten-i-goteborg/.

[17] *Luftdaten*, Hämtad 18 april 2019, [Online]. Tillgänglig: www.luftdaten.info.

[18] Make Magazin DE, *Nodemcu Amica Bot 02*, [Elektronisk bild], 2016. [Online]. Tillgänglig: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nodemcu_amica_bot_02.png.

[19] Ubahnverleih, *Feinstaubsensor SDS011*, [Elektronisk bild], 2017. [Online]. Tillgänglig: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Feinstaubsensor_SDS011_(3).jpg.

[20] ——, *DHT22-Temperatur-Sensor*, [Elektronisk bild], 2017. [Online]. Tillgänglig: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DHT22-Temperatur-Sensor.jpg.

[21] *Movable Type Scripts*, Hämtad 28 april 2019, [Online]. Tillgänglig: http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html?from=48.619%5C%2C-120.412&to=48.59617%5C%2C-120.4020&fbclid=IwAR2NWfuwkTktaBWw8KyxU5Iq5KJCl2-H4NpRbxELI-1IT0wM7dby9u49FVQ.

[22] J. Evans, *Straightforward statistics for the behavioral sciences*, Sida 146, 1996. [Online]. Tillgänglig: https://books.google.se/books?id=8Ca2AAAAIAAJ.

[23] G. Harrison, *Next Generation Databases. [electronic resource] : NoSQL, NewSQL, and Big Data.* Apress, 2015, ISBN: 9781484213292. [Online]. Tillgänglig: http://proxy.lib.chalmers.se/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat06296a&AN=clc.b2211008&site=eds-live&scope=site.

[24] F. Hedenus, U. M. Persson och F. Sprei, *Hållbar utveckling : nyanser och tolkningar.* n.d. ISBN: 9789144121871. [Online]. Tillgänglig: http://proxy.lib.chalmers.se/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat06296a&AN=clc.b2532459&site=eds-live&scope=site.

Bilagor

A.

Nedan försöker jag svara på din fråga angående kostnader för luftmätningar.
Alla kostnaderna är ungefärliga och det skiljer sig åt beroende på typ av instrument och leverantör. Använd därmed dessa siffror därefter.
Utöver detta tillkommer en hel del arbete som jag inte har räknat in.

Det beror även helt och hållet på vad som skall mätas. Om vi säger att vi mäter NOx, Partikelmassa, partikelantal och meteorologi:

Årskostnad:
Service för instrumenten – 50 000 kr
Förbrukningsmaterial (gas, filter, slang och dylikt) – 30 000 kr
Licens mjukvara – 50 000 (beror helt på vad som efterfrågas)
Elkostnader - 3000

Upprätta:
Inköp av instrumenten – 600 000 kr
Loggersystem – 30 000 kr
Inköp av mobilstation – detta har vi tyvärr inga siffror på
Hyra vid faststation – Detta skiljer sig givetvis åt beroende på var det är, 30 000 – 70 000 kr

B.

LABS
Luftmätning pågår!
Om du brukar resa med linje 55 så kan det vara kul att veta att vi just nu testar att använda en av bussarna till att mäta luftkvaliteten i Göteborg. Det är ett nytt och smidigt sätt att samla in data från luft i olika delar av stan vid olika tidpunkter. Sensorerna sitter på bussens tak och i vissa av hållplatserna.
Testet genomförs i samarbete med en grupp innovativa Chalmersstudenter och ElectriCity, och är en del av vårt utvecklingsarbete för framtidens hållbara resande.
Är du nyfiken så kan du läsa mer på electricitygoteborg.se
Västtrafik Labs.
Västtrafik testar nya idéer tillsammans med olika samarbetspartners och ibland tillsammans med dig som reser med oss. Då vet vi om du gillar dem och om vi ska utveckla vidare.
ELECTRICITY
västtrafik