

Patrick Römer

**Eine erweiterbare Open Source Messstation für Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>)**



# Eine erweiterbare Open Source Messstation für Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ )

Bachelorarbeit  
im Studiengang Informatik

eingereicht von  
**Patrick Römer**  
(Matrikelnummer 9595805)

angefertigt am  
Lehrgebiet Kooperative Systeme  
Fakultät Mathematik und Informatik  
FernUniversität in Hagen

Betreut durch  
Dr. Niels Seidel

Januar 2020



**Patrick Römer**

**Eine erweiterbare Open Source Messstation für Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ )**



## Zusammenfassung

Stickstoffdioxid als Luftschadstoff ist ein Problem, welches aktuell durch den „Dieselgate“ Skandal eine besondere Aufmerksamkeit erhält. Aufgrund der geringen Anzahl behördlicher Messstationen und dem Interesse von Bürgern die Luftqualität an ihrem Wohnort zu kennen, wird in dieser Bachelorarbeit der Aufbau einer günstigen Messstation zur Messung von Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) und eines Webservices zum sammeln der gemessenen Daten behandelt.

Es wurden, anhand zuvor ermittelter Anforderungen, mögliche Komponenten als Basis für eine Messstation verglichen. Hierbei fiel die Auswahl auf einen ESP32 Mikrocontroller in Kombination mit einem MiCS-4514  $\text{NO}_2$  Sensor. Versuche diesen Sensor zu kalibrieren und Einflüsse durch weitere Umgebungsparameter zu ermitteln, zeigten dass der Sensor durch die verschiedenen Einflüsse der gleichzeitig auftretenden Gase NO und  $\text{NO}_2$  auf den Sensorwert nicht ohne vorherige Aufarbeitung des Messgases eingesetzt werden kann.

Bei der Entwicklung des Webservice auf Basis von NODE.js wurden verschiedene Darstellungsformen von Messwerten auf einer Karte verglichen um eine schnelle und übersichtliche Visualisierung der Messdaten zu ermöglichen. Hierbei fiel die Auswahl auf eine Heatmap mit Markern, da sie für den gegebenen Anwendungsfall am geeignetsten erschien. Zusätzlich wurde eine API entwickelt, welche sowohl das Registrieren neuer Nutzer, als auch das übermitteln und abfragen von Messdaten ermöglicht.

Allgemein zeigte sich, dass keines der aktuellen Projekte, welches im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurde, zuverlässige Messdaten liefert. Hier muss zukünftig angesetzt werden, um die Messwerte auch für Behörden relevant zu machen.

## Summary

Nitrogen dioxide as an air pollutant is a problem, that is currently receiving high attention due to the „Dieselgate“ scandal. Since there is only a small number of official measuring stations and people are interested in the air quality at their home, this bachelor thesis deals with the construction of a cheap measuring station for nitrogen dioxide ( $\text{NO}_2$ ) and a webservice for collecting the measured data.

Based on previously determined requirements, possible components were compared as the basis for a measuring station. The choice fell on an ESP32 microcontroller in combination with a MiCS-4514  $\text{NO}_2$  sensor. Attempts to calibrate this sensor and the determination of other environmental influences on it showed, that the sensor cannot be used without prior processing of the sample gas. The reason for this is that NO and  $\text{NO}_2$  gas, which occur simultaneously in different concentrations in the atmosphere, have different influences on the sensor value.

During the development of the webservice, based on NODE.js, various forms of presentation to enable quick and clear visualization of the measured data on a map were compared. A heat map with markers was chosen, since it seemed the most suitable visualisation for the given application. In addition, an API was developed, which enables the registration of new users, as well as the transmission and download of measurement data.

In general, it was shown, that none of the current projects, which were examined in the context of this work, provide reliable measurement data. Raising the quality of the measured data (and knowing the expected error) is an important task for future, since this is needed to make the measured values relevant for authorities.

Patrick Römer. *Eine erweiterbare Open Source Messstation für Stickstoffdioxid ( $NO_2$ )*. Bachelorarbeit. Fakultät Mathematik und Informatik, FernUniversität in Hagen, 2020.

Diese Publikation ist unter *Creative Commons – Namensnennung 3.0 Deutschland* lizenziert und darf als Ganzes oder ausschnittweise vervielfältigt, verbreitet und öffentlich zugänglich gemacht werden, sofern dies im Text nicht anders vermerkt ist.



Autor: Patrick Römer  
Gestaltung und Satz: Patrick Römer/  $\text{\LaTeX}$   
Datum: 25. Januar 2020

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>11</b>
1.1 Motivation	11
1.2 Forschungsfragen und Zielsetzungen	11
1.2.1 Messstation	11
1.2.2 Webservice und Webanwendung	13
1.3 Aufbau der Arbeit	14
<b>2 Grundlagen der Luftschadstoffe</b>	<b>15</b>
2.1 Definition von Luftschadstoffen	15
2.2 Stickoxide	15
2.2.1 Einfluss auf die Gesundheit und Umwelt	16
2.2.2 Gesetzeslage, Grenzwerte und Maßnahmen	16
2.2.3 Referenzmessverfahren für Stickoxidmessungen	17
2.2.4 Gesetzliche Anforderungen an die Datenqualität	18
2.2.5 Behördliches Messnetz	19
2.3 Zusammenfassung	20
<b>3 Analyse und Anforderungsermittlung</b>	<b>21</b>
3.1 Verwandte Arbeiten und Angebote	21
3.1.1 Open Source Ansätze	21
3.1.2 Kommerzielle Ansätze	22
3.1.3 Übersicht der Projekte	23
3.2 Anforderungsermittlung	24
3.3 Zusammenfassung	26
<b>4 Konzept</b>	<b>27</b>
4.1 Messstation	27
4.1.1 Basisplatine	27
4.1.2 Konfiguration der Messtation	29
4.1.3 Sensoren für Stickstoffdioxid	29
4.1.4 Gehäuse	31
4.1.5 Kalibriermethoden und Versuche	32
4.2 Webservice	33
4.2.1 Darstellungsformen der Messergebnisse	33
4.2.2 Aufbau der Webanwendung	35
4.3 Zusammenfassung	37
<b>5 Implementierung</b>	<b>39</b>
5.1 Messstation	39
5.1.1 Sensor MiCS-4514	39
5.1.2 Firmware	42
5.1.3 Kalibrierversuche	43
5.1.4 Bauanleitung	50

## Inhaltsverzeichnis

5.2 Webservice . . . . .	51
5.2.1 Node.js . . . . .	51
5.2.2 API . . . . .	52
5.3 Webanwendung . . . . .	56
5.3.1 Übersichtskarte . . . . .	56
5.3.2 Seite: Registrierung . . . . .	57
5.3.3 Seite: Meine Messstation . . . . .	57
5.4 Übersicht Lizenzen . . . . .	59
5.5 Zusammenfassung . . . . .	59
<b>6 Schlussfolgerungen . . . . .</b>	<b>60</b>
6.1 Zusammenfassung . . . . .	60
6.2 Diskussion . . . . .	62
6.3 Ausblick . . . . .	63
<b>A Anhang . . . . .</b>	<b>64</b>
A.1 Weitere Materialien . . . . .	64
<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>67</b>
<b>Abbildungsverzeichnis . . . . .</b>	<b>69</b>
<b>Tabellenverzeichnis . . . . .</b>	<b>71</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis . . . . .</b>	<b>73</b>

# 1. Einleitung

## 1.1. Motivation

Spätestens seit dem Abgasskandal/Dieselgate und den hieraus resultierenden Fahrverboten sind Stickoxide als Luftschadstoff ein Thema, welches im Interesse der breiten Öffentlichkeit angekommen ist. Hinzu kommen ein gestiegenes Umweltbewusstsein in der jüngeren Generation und ein Interesse sich am Umweltschutz zu beteiligen, wie die „Fridays for Future“ Demonstrationen zeigen. Auch ist aufgrund der medialen Aufmerksamkeit ein Interesse von Bürgern an der Schadstoffbelastung und den hieraus resultierenden Umweltschutzmaßnahmen in ihrer direkten Umgebung aufgekommen.

Eine wichtige Grundlage für alle Umweltschutzmaßnahmen sind die Messungen von Umweltschadstoffen. Diese Messungen sind notwendig, da sie ermöglichen, die Quelle von Luftverschmutzungen ausfindig zu machen und diese somit effektiv zu bekämpfen. Für den Bereich der Immission sind die gesetzlichen Anforderungen für solche Messungen durch die 39. BImSchV (Bundes-Immissionsschutzverordnung) festgelegt. Hierbei ist gesetzlich kein flächendeckendes Messnetz vorgesehen, was zur Folge hat, dass nicht zwingend alle Quellen von Luftverschmutzungen ausfindig gemacht werden können. Zusätzlich kosten Messgeräte, welche durch eine Eignungsprüfung bewiesen haben, dass sie die gesetzlich nötigen Anforderungen erfüllen, mehrere tausend Euro. Dies erschwert es Bürgern und Vereinen, welche gegebenenfalls zusätzliche Messpunkte betreiben wollen um die Schadstoffbelastung in ihrer direkten Umgebung zu messen, eigene Messungen durchzuführen.

Hier soll angesetzt werden, indem im Rahmen dieser Bachelorarbeit eine kostengünstige, erweiterbare Open Source Messstation für Stickstoffdioxid entwickelt wird, mit der sich durch das Anbringen eines Sensors auf z.B. einem Balkon jeder interessierte Bürger oder Personengruppe in einem Citizen Science Ansatz an einer qualitativen Netzmessung beteiligen kann. Die gemessenen Daten sollen online verfügbar gemacht und grafisch dargestellt werden. Das Zusammenführen der Daten vieler Messpunkte ermöglicht es so gegebenenfalls, NO<sub>2</sub>-Quellen oder lokale Maxima ausfindig zu machen, welche bisher nicht bekannt waren, da sie außerhalb des Rasters oder der Reichweite der behördlichen Messstationen liegen. Anschließend können öffentliche Stellen wie z.B. das Umweltamt auf diese Quellen und ihre Verursacher aufmerksam gemacht werden.

## 1.2. Forschungsfragen und Zielsetzungen

In dieser Arbeit wird eine Kombination aus einer Open Source Messtation zur Messung von Stickstoffdioxid und einem Webservice, bestehend aus einer API und Webanwendung, zum erfassen der Messdaten in einem Citizen Science Ansatz entwickelt.

### 1.2.1. Messstation

Um eine Messtation für den Citizen Science Einsatz zu entwickeln ist es notwendig, ein Konzept für den Aufbau dieser zu erstellen. Die erste Forschungsfrage lautet somit:

#### **FF 1: Wie muss eine Citizen Science Messtation für Stickoxide aufgebaut sein?**

Hierfür sollen bisherige Open Source und kommerzielle Ansätze betrachtet und ausgewertet werden. Da diese Fragestellung sehr umfangreich ist, werden aus ihr im folgenden mehrere Teilfragen

## 1. Einleitung

abgeleitet, welche detaillierter auf einige Aspekte eingehen.

Die Anforderungen an die Komponenten der Messstation sind ein wichtiger Aspekt für ein Citizen Science Projekt. Hinzu kommt dass die Komplexität des Nachbaus ein Faktor ist, welcher Beachtung finden muss. Hieraus folgt die Fragestellung:

### **FF 1.1: Welche Anforderungen müssen Hardwarekomponenten und Sensoren für eine solche Messstation erfüllen?**

Um diese Frage zu beantworten werden Anforderungen, wie zum Beispiel Messbereiche, Verfügbarkeit und Kosten verschiedener Hardwarekomponenten, miteinander verglichen.

Um NO<sub>2</sub> zu messen, ist es notwendig, dass die Messstation über einen passenden Sensor verfügt. Da mehr als ein Messverfahren für NO<sub>2</sub> existiert, muss hier ein Messverfahren und zugehöriger Sensor ausgewählt werden, welcher die zuvor festgelegten Anforderungen erfüllt. Es folgt die Frage:

### **FF 1.2 Welcher Sensortyp ist für die Messung von NO<sub>2</sub> am besten geeignet?**

Zum beantworten der Fragen werden verschiedene Sensortypen vorgestellt und miteinander verglichen. Am Ende sollen die gewählten Hardwarekomponenten mit dem Sensor zu einer Messstation zusammengebaut werden.

Da die Rohdaten des gewählten Sensors in einen Messwert umgerechnet werden müssen, ist es notwendig, eine Kalibrierung der Sensoren durchzuführen und eine Kalibrierfunktion zu ermitteln. Die gemessenen Daten sollten außerdem möglichst den von Behörden geforderten Qualitätsstandards entsprechen, um bei diesen als Datenquelle anerkannt zu werden.

### **FF 1.3 Wie kann eine Kalibrierung durchgeführt werden, welche behördlichen Anforderungen entspricht?**

Da das Thema der Kalibrierung sehr umfangreich ist, werden hierzu mehrere Teilfragen formuliert.

Zunächst ist es notwendig herauszufinden, welche Messgrößen einen Einfluss auf den Sensorwert haben, da der Messwert von Sensoren oftmals durch weitere Parameter beeinflusst wird. Hieraus resultiert die Fragestellung:

#### **FF 1.3.1 Welche Messgrößen beeinflussen das Messergebnis des gewählten Sensors?**

Hierbei soll mit Hilfe von Literatur und der Betrachtung der Reaktion/des physikalischen Effekts, welcher den Sensorwert beeinflusst, die Einflussgrößen ermittelt werden.

Sind alle Messgrößen gefunden welche den Sensorwert beeinflussen, gilt es eine Kalibrierfunktion zu ermitteln, welche den Ausgabewert des Sensors, kompensiert um die störenden Messgrößen, in eine NO<sub>2</sub> Konzentration umrechnet. Hier stellt sich die Frage, welche Versuchen notwendig sind, um Messwerte zum Sammeln aus welchen die Kalibrierfunktion ermittelt werden kann. Die sich hieraus ergebende Frage lautet:

#### **FF 1.3.2 Wie müssen Versuche zum ermitteln einer Kalibrierfunktion aussehen?**

Am Ende dieser Frage sollen Versuche zur Untersuchung des Einflusses, der zuvor ermittelten Messgrößen geplant und durchgeführt werden. Vorgesehen ist hier eine Vergleichsmessung mit einem eignungsgeprüften Analysator, bei welchen alle Messgrößen mit Einfluss auf den Sensorwert erfasst werden. Aus den ermittelten Daten soll anschließend die Kalibrierfunktion ermittelt werden, welche den aktuellen Sensorwert in eine NO<sub>2</sub> Konzentration umrechnet.

Wurde eine solche Kalibrierfunktion ermittelt, muss ihre Abweichung unter realen Messbedingungen getestet werden, da diese einen Einfluss auf die Belastbarkeit der Daten hat. Sollen solche Daten für Hinweise an und Diskussionen mit Behörden eingesetzt werden, ist es notwendig, die Kriterien welche diese an Messdaten stellt zu kennen. Hieraus folgen die Fragen:

#### **FF 1.3.3 Wie muss ein Versuche zum ermitteln der Performance unter realen Bedingungen aussehen?**

Am Ende dieser Fragen soll eine Beurteilung der Performance durch einen Testlauf im Feld stehen, wobei eine Netzmessung als mögliches Szenario infrage kommt. Da die ermittelten Daten anhand von behördlichen Standards beurteilt werden sollen, ist es notwendig, diese vorab zu ermitteln. Die Fragestellung hierzu lautet:

**FF 1.3.4 Wie sind die behördlichen Anforderungen an die Datenqualität?**

Ist die Messtation implementiert und getestet, stellt sich die Frage, welche Erweiterungen oder Modifikationen in Zukunft die Funktionalität der Messtationen vergrößern könnten. Auch stellt sich die Frage, ob mit ihr die Teilnahme an anderen, ähnlichen Projekten möglich ist.

**FF 1.4 Welche Erweiterungen/Modifikationen der Messtation sind möglich?**

Um diese Frage zu beantworten sollen mögliche weitere Komponenten und Funktionen betrachtet werden.

Sind die Messdaten erfasst, stellt sich die Frage, wie diese gegebenenfalls an andere Projekte übermittelt werden können.

**FF 1.5 Wie können die Messwerte an andere Open Source Projekte übermittelt werden?**

Durch die Implementierung einer beispielhaften Erweiterung für die Messtation, welche die Messdaten an ein anderes Projekt übermittelt, soll dieser Fragen Rechnung getragen werden.

## 1.2.2. Webservice und Webanwendung

Wenn Messdaten gemessen werden, ist es notwendig diese zur Auswertung zentral an einem Ort zu sammeln. Hierfür soll ein Webservice implementiert werden.

**FF 2 Welche Anforderungen muss ein Webservice zum sammeln von Messdaten bieten?**

Die Messtationen müssen eine Möglichkeit haben, ihre Messdaten an den Webservice zu übermitteln. Sind die Messdaten übermittelt, müssen diese dauerhaft gespeichert werden und auch für Anwendungen abrufbar sein. Diese Fragestellung setzt sich aus den folgenden Teilfragen zusammen

**FF 2.1 Wie können die Messdaten von der Messtation an den Webservice übermittelt werden?**

Hier soll ein Weg gefunden werden die gemessenen Daten an den Webservice zu übermitteln. Sind die Daten erfolgreich an den Server übermittelt worden, ist es notwendig sie für zukünftige Auswertungen persistent zu sichern. Die hieraus resultierende Frage lautet:

**FF 2.2 Wie können die übermittelten Messdaten persistent gesichert werden?**

Zum persistenten Speichern soll auf die nötige Datenstrukturen eingegangen und ein Datenschema erstellt werden. Da die Messdaten auch anderen Anwendungen zur Verfügung gestellt werden sollen, ist es nötig eine Schnittstelle für den Datenzugriff zu erstellen.

**FF 2.3 Wie können die Messdaten Anwendungen zur Verfügung gestellt werden?**

Um diese Fragen zu beantworten, soll eine API implementiert werden, welche den Datenzugriff ermöglicht.

Da offizielle Messtationen existieren, ist die Frage, ob und wie deren Messdaten mit eingebunden werden können, um die eigenen gemessenen Daten zu ergänzen.

**FF 2.4 Inwiefern lassen sich offizielle behördliche Messdaten einbinden?**

Hierbei sollen die Quellen für behördliche Messdaten betrachtet und eine Funktionalität implementiert werden, welche diese wenn möglich abruft und zusätzlich zu den anderen Messdaten speichert.

Eine Webanwendung soll den Zugriff und Interaktionen durch Anwender ermöglichen. Die Hauptfrage ist hier:

## *1. Einleitung*

### **FF 3 Welche Funktionalitäten muss eine Webanwendung für den Nutzer bieten?**

Ein Anwender muss wissen wieso es für ihn relevant ist, die Konzentration von Luftschadstoffen in seiner Umgebung zu kennen. Hieraus folgt die Frage:

#### **FF 3.1 Wie können einem Anwender die Informationen bereitgestellt werden, welche er benötigt um die Gefahren durch Luftschadstoffe nachvollziehen zu können?**

Hierfür soll ein Infotext, welcher auf die Gefahren von Stickstoffdioxid hinweist, erstellt werden.

Sind Messdaten erfasst stellt sich die Frage, wie diese darstellen lassen um einem Anwender einen schnellen Überblick über die gemessenen Daten zu geben.

#### **FF 3.2 Welche von anderen Projekten genutzte Darstellungsformen für Messdaten können für dieses Projekte genutzt werden?**

Hierfür werden bestehende Ansätze anderer Anbieter von Messdaten betrachtet und verglichen. Am Ende dieser Frage soll eine Darstellungsform gewählt und in der Webanwendung implementiert werden.

Ein Anwender welcher sich nach dem Infotext dafür interessiert an der Messung teilzunehmen, benötigt Informationen um die Messstation nachzubauen zu können.

#### **FF 3.3 Wie kann eine Anleitung gestaltet werden, welche es einem Anwender ermöglicht, an dem Projekt teilzunehmen?**

Ziel ist es hier eine Anleitung zum Nachbau der Messstation zu erstellen, welche in der Webanwendung zur Verfügung gestellt wird.

## **1.3. Aufbau der Arbeit**

Die Arbeit beginnt mit einer Darstellung der aktuellen gesetzlichen Lage in Deutschland. Anschließend folgt ein Vergleich der bisherigen Ansätze und die Ermittlung der Anforderungen. Folgend hierauf wird aus den ermittelten Anforderungen ein Konzept erstellt und im Anschluss die Implementierung dieses Konzeptes behandelt

## 2. Grundlagen der Luftschadstoffe

In den folgenden Kapiteln wird auf die Grundlage zu Luftschadstoffen und im speziellen  $2$  eingegangen. Hierbei wird neben dem Einfluss auf die Gesundheit auch die Aktuelle Gesetzeslage und offizielle Messverfahren vorgestellt.

### 2.1. Definition von Luftschadstoffen

Als Luftschadstoff ist jeder in der Luft vorhandene Stoff definiert, der schädliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit oder die Umwelt insgesamt haben kann. Im Bereich des Umweltschutzes sind aktuell die folgenden Luftschadstoffe relevant und werden aufgrund bestehender gesetzlicher Verpflichtungen staatlich überwacht [BJV10]:

- Stickoxide ( $\text{NO}_x$ )
- Feinstaub (PM10 und PM2,5)
- Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ )
- Bodennahes Ozon ( $\text{O}_3$ )
- Kohlenmonoxid (CO)
- Benzol
- Ammoniak
- Staubinhaltsstoffe (Arsen, Kadmium, Nickel, Blei, Benzo[a]pyren)

### 2.2. Stickoxide

Hinter dem Begriff Stickoxide verbergen sich eine Gruppe chemischer Verbindungen, welche aus Stickstoff (Elementsymbol: N) und Sauerstoff (Elementsymbol: O) bestehen. Zu dieser Gruppe zählen neben Stickstoffmonoxid(NO), Stickstoffdioxid( $\text{NO}_2$ ) und Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) diverse weitere Verbindungen.

Bei der Verbrennung in konventionellen Motoren und Verbrennungsanlagen entstehen hauptsächlich Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid, wobei das Stickstoffmonoxid an der Luft in Kontakt mit bodennahem Ozon zu Stickstoffdioxid reagiert. Dieses Stickstoffdioxid wirkt toxisch auf den menschlichen Organismus [CEM10]. Aufgrund ihrer besonderen Bedeutung als Luftschadstoffe werden deshalb in diesem Zusammenhang vereinfacht nur Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid unter dem Begriff Stickoxide( $\text{NO}_x$ ) zusammengefasst.

Im Gegensatz zu zum Beispiel  $\text{CO}_2$ , welches als Treibhausgas mit für die Klimaerwärmung verantwortlich ist, ergibt sich das Problem durch Stickoxide hauptsächlich aus deren gesundheitsschädlichen Wirkung.

## 2. Grundlagen der Luftschaadstoffe

### 2.2.1. Einfluss auf die Gesundheit und Umwelt

Da NO<sub>2</sub> eine geringe Wasserlöslichkeit hat, wird es nicht in den oberen Atemwegen gebunden und dringt in tiefe Regionen der Lunge ein. Hier kann es als sehr reaktives Oxidationsmittel das empfindliche Zellgewebe angreifen und hierdurch Zellschäden, entzündliche Prozesse, Hyperreagibilität und Allergien verursachen. In Studien zeigte sich ein Zusammenhang zwischen einer Erhöhung der NO<sub>2</sub> Belastung und der Anzahl von Krankenhausaufnahmen aufgrund von Atemwegserkrankungen, Schlaganfällen und Herzinfarkten, in Kombination mit einer steigenden Mortalität aufgrund dieser Ursachen. Das Umweltbundesamt ermittelte alleine für das Jahr 2014 mehr als 6000 vorzeitige Todesfälle durch NO<sub>2</sub> Belastung 2.1. [AS118]

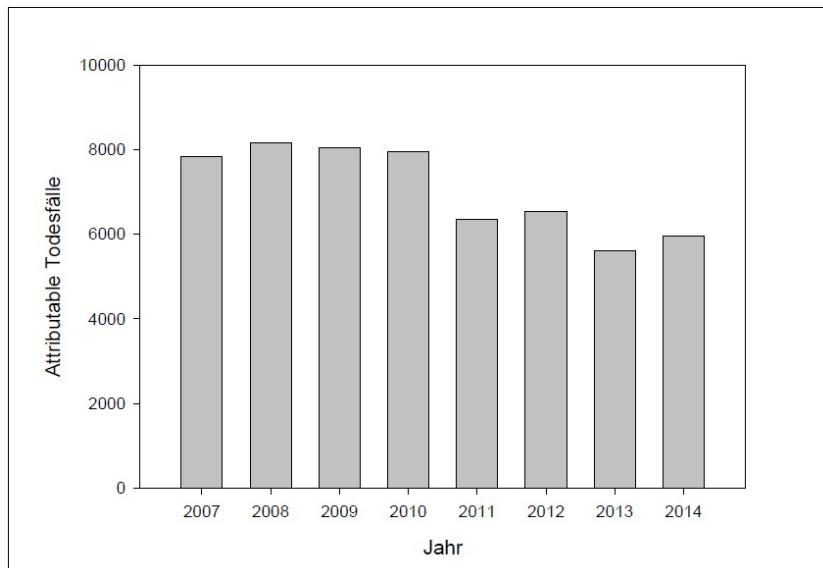


Abbildung 2.1.: Entwicklung der NO<sub>2</sub>-Exposition zugeordneten Todesfälle in Deutschland  
[AS118]

Besonders bereits vorgeschädigte Menschen, wie zum Beispiel Astmatiker, reagieren empfindlich auf eine erhöhte NO<sub>2</sub> Exposition. In der Arbeit von Zorana J. Andersen et. al. zeigte sich zum Beispiel ein solcher Zusammenhang zwischen NO<sub>2</sub> Konzentration und nicht tödlichen (Hazard Ratio von 1,12) und tödlichen (Hazard Ratio von 1,33) Schlaganfällen. Die Hazard Ratio bezeichnet hierbei das Verhältnis von Todesfällen in der untersuchten Gruppe im Verhältnis zu einer Kontrollgruppe. [ACKA<sup>+</sup>11]

Auch Pflanzen tragen durch NO<sub>2</sub> Schäden davon. Gelbwerden der Blätter, vorzeitiges Altern und Kümmerwuchs sind einige der direkten Effekte durch eine erhöhte NO<sub>2</sub> Konzentration. Aber auch eine Übersäuerung des Bodens, durch die Bildung von Salpetersäure, hat einen Einfluss auf die Flora. Allgemein führen erhöhte Konzentrationen von NO<sub>2</sub> zu einer Verdrängung von Pflanzen, welche Stickstoffärmeren Böden bevorzugen. Trotz dieses Einflusses sind, abgesehen von sogenannten Hintergrundmessungen in der Nähe von Städten, keine Messungen in der Nähe von Naturschutzgebieten vorgesehen. [UBAc]

### 2.2.2. Gesetzeslage, Grenzwerte und Maßnahmen

In Deutschland regelt das Bundes-Immissionsschutzgesetz, kurz BImSchG, einen großen Teil der rechtlichen Grundlagen im Bereich des Umweltrechtes. Es enthält Regeln, welche dem Zweck dienen, Menschen, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter vor schädlichen Umwelteinwirkungen zu schützen und dem Entstehen schädlicher Umwelteinwirkungen vorzubeugen. [BJG] Auf Basis des BImSchG werden die sogenannten Bunde-

simmissionsschutzverordnungen, kurz BImSchV, erlassen, welche konkrete Regeln und Grenzwerte festlegen.

Innerhalb der Europäischen Union gibt es einheitliche Mindeststandards im Bereich der Luftqualität, welche auf klinischen Studien und einer hieraus folgenden Empfehlung der WHO basieren. Diese Mindeststandards sind in der Luftqualitätsrichtlinie [EU018] festgelegt. Mit der 39. BImSchV (Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen) wurden diese Mindeststandards in deutsches Recht überführt. In ihr sind die Grenzwerte für verschiedene Luftschaadstoffe (unter anderem Stickoxide, siehe Tabelle 2.1) und Anforderungen an die Messverfahren geregelt.

Tabelle 2.1.: Stickstoffdioxidgrenzwerte laut 39. BImSchV [BJV10]

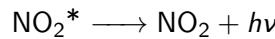
Grenzwert	Maximalkonzentration
Jahresmittelwert zum Schutz der Menschlichen Gesundheit	40 µg/m³
Stundenmittelwert zum Schutz der Menschlichen Gesundheit	200 µg/m³
Alarmschwelle, welche wenn sie drei Stunden in Folge überschritten wird unverzügliche Maßnahmen zur Folge hat	400 µg/m³
Jahresmittelwert zum Schutz der Vegetation	30 µg/m³

Die offiziellen Messdaten der behördlichen Messstationen für das Jahr 2018, welche vom Umweltbundesamt zur Verfügung gestellt werden, zeigen dass Stundenmittelwerte (mit wenigen Ausnahmen) kein Problem darstellen [UBAb]. Anders sieht es aus wenn man die Jahresmittelwerte betrachtet, da es hier einige Überschreitungen um fast 100% gibt. In Folge dieser Überschreitungen sind zur Reduktion der Messwerte verschiedene Maßnahmen, wie Dieselfahrverbote und Umweltpuren, ergriffen worden.

### 2.2.3. Referenzmessverfahren für Stickoxidmessungen

Bei einem Referenzverfahren im Zusammenhang mit der BImSchV handelt es sich um das gesetzlich festgelegte Messverfahren für einen gegebenen Stoff. Das Referenzverfahren für behördliche Messungen von Stickstoffdioxid und Stickstoffmonoxid in der Außenluft ist das in der DIN EN 14211:2012 beschriebene Chemilumineszenz-Verfahren. Es wurde unter anderem aufgrund seiner hohen Selektivität und den hieraus folgenden geringen Querempfindlichkeiten als Referenzverfahren gewählt.

Beim Chemilumineszenz-Verfahren wird das zu untersuchende Gas zusammen mit Ozon ( $O_3$ ) in einer Analysekammer gemischt, wobei folgende Reaktion stattfindet:



Die emittierte Menge an Licht( $h\nu$ ) ist hierbei proportional zu der Konzentration an Stickstoffmonoxid im untersuchten Gas. Um zusätzlich noch die Konzentration an  $\text{NO}_2$  zu erfassen, wird das zu untersuchende Gas durch einen Konverter geführt, welcher einen Katalysator enthält, der  $\text{NO}_2$  in  $\text{NO}$  umsetzt (Gefordert ist hierbei eine Umsetzung von mindestens 98%). Anschließend kann durch das Bilden der Differenz zwischen der Messung mit und ohne Katalysator die Konzentration an  $\text{NO}_2$  bestimmt werden.

$$c_{\text{NO}_2} = c_{\text{NO}_2+\text{NO}} - c_{\text{NO}} \quad (2.1)$$

## 2. Grundlagen der Luftschaadstoffe

Eignungsgeprüfte Messgeräte im Bereich der Immission, welche dieses Verfahren einsetzen, liegen preislich in einem Bereich von >10,000 €, da sie zusätzlich zu der eigentlichen Messzelle noch weitere Komponenten zum Aufbereiten des Messgases enthalten. Hierzu gehören neben Partikelfiltern für Staub auch ein Kühler, welcher durch kühlen des Gases auf 4 °C die Luftfeuchte auskondensiert und eine Heizung zum temperieren des Katalysators und der Messzelle. Aufgrund dieser Komplexität sind diese Messgeräte teuer und aufwendig zu warten, da zum Beispiel die Katalysatormasse und vorgeschaltete Partikelfilter regelmäßig getauscht werden müssen. Die Struktur eines solchen Analysators ist in der Abbildung 2.2 dargestellt.

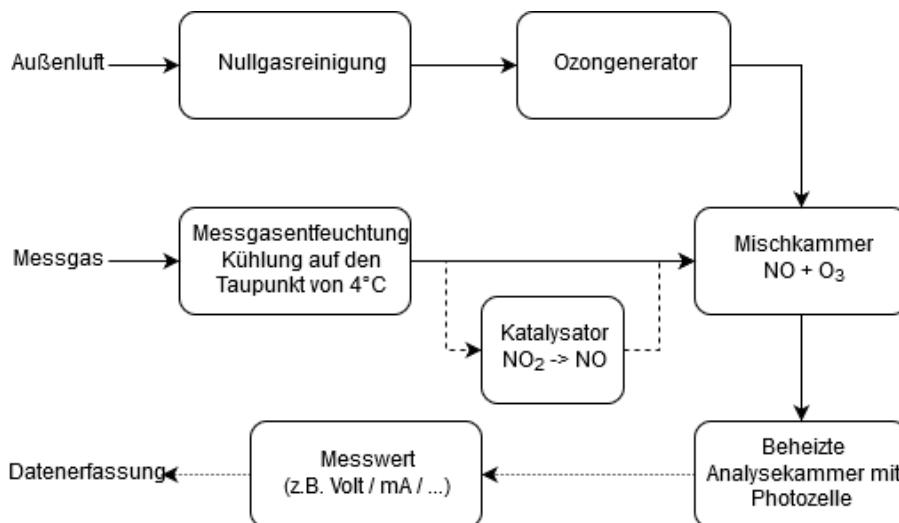


Abbildung 2.2.: Das Blockdiagramm eines Chemilumineszenz Messgerätes.

Alternativverfahren zum Chemilumineszenz-Verfahren müssen gemäß der DIN EN 14793:2017 auf Gleichwertigkeit mit dem gesetzlich festgelegten Referenzverfahren geprüft werden. Eine solche Prüfung beinhaltet unter anderem das parallele Durchführen von Messungen an einem Messpunkt über einen Zeitraum von mehreren Monaten durch einen fachkundige Person und eine umfassende Dokumentation der Ergebnisse. Die hierbei ermittelten Abweichungen legen das mögliche Einsatzgebiet des Alternativverfahrens fest, welches sich aus den in der 39. BImSchV, Anlage 1 vorgestellten Anforderungen an die Datenqualität ergibt.

Ein Beispiel für ein solches auf Gleichwertigkeit geprüftes Messverfahren mit etwa 20 % Unsicherheit sind Passivsammler, welche im folgenden vorgestellt werden.

### Passivsammler

Bei Passivsammlern handelt es sich um Röhrchen, die mit einem Stoff gefüllt sind, welcher den zu messenden Schadstoff (NO<sub>2</sub>) adsorbiert. Diese werden an dem Messort gegenüber der Umgebungsluft exponiert und nach einer vorher definierten Zeit eingesammelt und analysiert. Ein solcher Passivsampler ist in Abbildung 2.3 zu sehen.

Aufgrund der langen Expositionszeit eignet sich dieses Verfahren allerdings nur für die Ermittlung von Langzeitmittelwerten.

#### 2.2.4. Gesetzliche Anforderungen an die Datenqualität

Die Datenqualitätsziele für Messdaten von Stickoxiden sind in der 39. BImSchV, Anlage 1 festgelegt. Hier werden vier verschiedenen Beurteilungsmethoden und zugehörige Unsicherheiten festgelegt, welche in Tabelle 2.2 aufgeführt sind.



Abbildung 2.3.: Foto eines Passivsammlers.

Tabelle 2.2.: Datenqualitätsziele für Messdaten von Stickoxiden [BJV10]

Methode	Maximale Unsicherheit	Mindestdatenerfassung
Ortsfeste Messung	15%	90%
Orientierende Messungen	25%	90%
Modellrechnungen	50%	
Objektive Schätzung	75%	

Orientierende Messungen und Modellrechnungen können eingesetzt werden, um zum Beispiel neue Orte für ortsfeste Messtationen festzulegen oder die Messdaten ortsfester Messungen zu ergänzen. Hierbei kann die Anzahl ortsfester Messtationen unter in der 39. BlmSchV festgelegten Bedingungen um bis zu 50 % verringert werden.

Ein Alternativverfahren, welches nach der DIN EN 14793:2017 auf Gleichwertigkeit geprüft wird, kann also wenn es eine Unsicherheit von 15 bis 25 % hat nur für orientierende Messungen eingesetzt werden.

## 2.2.5. Behördliches Messnetz

Die Anzahl und Auswahl der Standorte für die behördlichen Messtationen erfolgt gemäß Anlage 3 der 39. BlmSchV. Relevante Kriterien zur Ermittlung der Orte innerhalb von Städten, an welchen die Messtationen zum Schutz der menschlichen Gesundheit aufgestellt werden, sind hier gesetzlich wie folgt festgelegt [BJV10]:

- Es sollen Daten über Bereiche innerhalb von Gebieten und Ballungsräumen gewonnen werden, in denen die höchsten Werte auftreten, denen die Bevölkerung wahrscheinlich direkt oder indirekt über einen Zeitraum ausgesetzt sein wird, der im Vergleich zum Mittelungszeitraum der betreffenden Immissionsgrenzwerte signifikant ist.
- Auch sollen Daten zu Werten in anderen Bereichen innerhalb von Gebieten und Ballungsräumen, die für die Exposition der Bevölkerung allgemein repräsentativ sind, gewonnen werden.
- Der Ort der Probenahmestelle ist im allgemeinen so zu wählen, dass die Messung von Umweltzuständen, die einen sehr kleinen Raum in ihrer unmittelbaren Nähe betreffen, vermieden wird. Dies bedeutet, dass der Ort der Probenahmestelle so zu wählen ist, dass die Luftproben - soweit möglich - für die Luftqualität eines Straßenabschnitts von nicht weniger als 100 Meter Länge bei Probenahmestellen für den Verkehr und nicht weniger als 250 Meter x 250 Meter bei Probenahmestellen für Industriegebiete repräsentativ sind.
- Probenahmestellen sollten möglichst auch für ähnliche Orte repräsentativ sein, die nicht in ihrer unmittelbaren Nähe gelegen sind. So soll eine Messung an einer Kreuzung zum Beispiel

## 2. Grundlagen der Luftschaadstoffe

auch für andere ähnlich stark befahrene Kreuzungen repräsentative Werte liefern.

Vereinfacht gesagt sind sie so zu wählen, dass sie an repräsentativen Orten der höchsten zu erwartenden Belastung stehen, die die Bevölkerung gegenüber ausgesetzt ist. Da nur Punkte höchster Belastung gemessen werden, ist eine flächendeckende Überwachung der Luftqualität nicht gewährleistet und auch gesetzlich nicht vorgesehen. [UBAa]

Der Standort einiger Messstationen kann hierbei von den angegebenen Kriterien abweichen, da sie vor dem Inkrafttreten der 39. BISchV aufgestellt wurden. Da eine fortlaufende Aufzeichnung und Überwachung der Entwicklung der Luftschaadstoffbelastung gewünscht ist, werden diese Messstationen nicht versetzt.[UBAa]

Da nur Stunden und Jahresmittelwerte erfasst werden, kann anhand der behördlichen Messdaten keine Aussage über zeitlich kurz auftretende Ereignisse durchgeführt werden.

### 2.3. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden der Einfluss auf die Gesundheit und die gesetzliche Grundlagen zu Stickstoffdioxid betrachtet. Es zeigte sich, dass Stickstoffdioxid einen schädlichen Einfluss auf Pflanzen, Tiere und Menschen haben. Besonders vorgeschiedigte Menschen wie Astmatiker haben hier verstärkt Probleme.

Bei der Gesetzeslage wurden wichtige Punkte der 39. BlmSchV, wie die zulässigen Abweichungen von Messverfahren behandelt. Es zeigte sich, dass ein Messfehler von 25% das Minimum ist, was ein Messverfahren erfüllen muss um sinnvoll einsetzbar zu sein. Auch wurde festgestellt, dass das behördliche Messnetz aus sehr wenigen Messstationen besteht, welche an repräsentativen Messpunkten aufgestellt seien sollen.

# 3. Analyse und Anforderungsermittlung

In diesem Kapitel sollen verschiedene kommerzielle und Open Source Ansätze im Bereich der Luftschadstoffmessungen betrachtet und analysiert werden. Anschließend wird aus diesen Ansätzen die Anforderungen an die Messstation für NO<sub>2</sub> erstellt und in Form von User Stories formuliert.

## 3.1. Verwandte Arbeiten und Angebote

Die verwandten Arbeiten und Angebote werden in den folgenden Kapiteln, sortiert nach Open Source und kommerziellen Ansätzen, vorgestellt.

### 3.1.1. Open Source Ansätze

#### OpenSenseMap

Die OpenSenseMap ist ein Citizen Science Open Source Projekt, welches eine Sammlung verschiedener, hauptsächlich durch Privatpersonen ermittelter Sensordaten über eine API und Webanwendung zur Verfügung stellt. Die verschiedenen Sensoren werden hierbei als Punkte auf einer Karte dargestellt, wobei durch die Auswahl einer Messstation ihre letzten Messwerten und verbaute Sensoren angezeigt werden können.

OpenSenseMap ermöglicht auch das Registrieren nicht vordefinierter Parameter und Sensoren, wie z.B. von NO<sub>2</sub>. Allerdings werden keinerlei Angaben über Grenzwerte oder die Qualität der Messwerte zur Verfügung gestellt. Hinzu kommt, dass die Suche nach NO<sub>2</sub> Sensoren nur einen einzigen Sensor zeigt. Auch ist es recht umständlich, sich über die angebotene Karte eine Übersicht über die Messergebnisse eines Schadstoffes zu verschaffen.

Zu der OpenSenseMap gehört zusätzlich noch die sogenannte senseBox, welche als ein „Citizen Science Toolkit für jedermann“ beworben wird. Für diese senseBox werden Sets mit Sensoren für Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, Beleuchtungsstärke und Schall angeboten, welche preislich im Bereich von 250€ liegen. Insgesamt sind bei der OpenSenseMap aktuell (27.12.2019) 5786 sense-Boxen registriert, von denen die Meisten in Deutschland stehen. [SEN]

#### Luftdaten.info

Bei dem Projekt Luftdaten.info handelt es sich um ein Open Source Projekt des „OK Lab Stuttgart“, bei welchem mit Hilfe selbstgebauter Feinstaubmessstationen interessierte Bürger an einer Netzmessung für Feinstaub teilnehmen können. Für den Bau der Messstation werden die nodeMCU ESP8266, ein Feinstaubsensor vom Typ SDS011 und ein DHT22 eingesetzt. Die aktuellen Messdaten der Sensoren werden als farblich markierte Waben auf einer Karte dargestellt (genannt Hexbin Map), wobei die Farbe der Wabe aus den Messdaten der Sensoren in dem durch sie abgedeckten Bereich resultiert. Insgesamt gibt es laut den Angaben von Luftdaten.info mehr als 10000 solcher Messtationen, von denen die Meisten in Deutschland lokalisiert sind.

Die Messstation erfasst aktuell neben Feinstaub nur Temperatur und Luftfeuchtigkeit, allerdings ist eine Erweiterung um einen Lärmensor und einen Stickstoffdioxid Sensor vom Typ NO2-A43F

### 3. Analyse und Anforderungsermittlung

(Erläuterung des Messprinzips in Kapitel 4.1.3) der Firma Alphasense geplant, welcher preislich im Bereich von etwa 100 € liegt. Ohne diese Sensoren liegt die Station preislich bei etwa 30 €.

Das Projekt steht im Austausch mit der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), welche auch den verwendeten Feinstaubsensor im Vergleich mit einem eignungsgeprüften Gerät getestet hat. Hierbei zeigte sich dass es keine eindeutige Abhängigkeit der Sensordaten zu den klimatischen Verhältnissen gibt und der Sensor je nach Charge unterschiedlich gute Werte liefert. [LUF]

#### **hackAIR**

Ähnlich wie Luftdaten.info bietet das hackAIR Projekt verschiedene Open Source Bauanleitungen für Messstationen welche Feinstaub, Temperatur und Luftfeuchte messen. Das Messnetz, welches auf der Seite von hackAIR angezeigt wird, zeigt allerdings (Stand 23.07.19) nur etwa 40 Messstationen vom Typ hackAIR. Allerdings ist es möglich, die Messstationen des Luftdaten.info Projektes und für einige Länder (unter denen sich Deutschland nicht befindet) auch die behördlichen Messstationen und ihre Messwerte zusätzlich anzuzeigen. Die Darstellung der Messstationen erfolgt als Punkte auf einer Karte, mit farblicher Hervorhebung abhängig vom Messwert. Auch lässt sich der Modus „Continuous map“ aktivieren, welcher die Karte abhängig von den Messwerten einfärbt.

Unterstützt wird das Projekt von verschiedenen Organisationen, unter denen auch der BUND ist (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland). Als Hardwarebasis für den hackAIR Sensor dient ein Arduino zusammen mit einem speziellen WiFi Shield und einem SDS011 Feinstaubsensor.

Preislich liegt der Sensor bei etwa 60 €, misst allerdings kein NO<sub>2</sub> und das WiFi Shield ist aktuell nicht verfügbar. [HAC]

#### **3.1.2. Kommerzielle Ansätze**

##### **Air Quality Egg**

Bei dem Air Quality Egg handelt es sich um eine kommerzielle Messstation für Luftschadstoffe. Jedes dieser Eggs kann eine Teilauswahl aus folgenden Sensoren enthalten: Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, Feinstaub, O<sub>3</sub>, CO, flüchtige organische Verbindungen.

Als normaler Nutzer erhält man nach einer Anmeldung nur Zugriff auf die eigenen historischen Messdaten. Hinzu kommt, dass Institutionen für den Zugriff auf Messdaten zahlen müssen. Die Darstellung der Messwerte erfolgt als einfaches Diagramm, welches den Verlauf der Konzentration des jeweiligen Sensors wiedergibt. Zusätzlich lassen sich die Messerte direkt auf dem Gerät ablesen.

Der Preis für die Grundausführung mit Temperatur und Luftfeuchtesensor liegt bei 160 \$ und für die Ausführung mit NO<sub>2</sub> Sensor 205 \$. Es werden keine Angaben über die Messgenauigkeit der Sensoren gemacht. [AEG]

##### **Air-Q**

Ähnlich dem Air Quality Egg handelt es sich beim Air-Q um eine kommerzielle Messstation für diverse Luftschadstoffe, die über Kickstarter finanziert wurde. Die Grundausführung, welche auch Stickoxide misst, kostet rund 400 € und kann aktuell nur vorbestellt werden. Im Gegensatz zu den zuvor genannten Projekten ist der Air-Q für die Messung der Luftqualität in Räumen bestimmt und stellt die Ergebnisse der Messungen als Diagramm dar.

Zugriff auf die Messwerte soll über eine App erfolgen, wobei nur der Zugriff auf die eigenen Messwerte möglich ist. [AIR]

## AQMMesh

Das AQMesh ist ein proprietäres System zur Überwachung der Luftqualität, welches eher an professionelle Anwender gerichtet ist. Es basiert auf sogenannten „AQMMesh pods“, welche neben Elektrochemischen Sensoren weitere Hardwarekomponenten zum Übermitteln der Daten an die Server von AQMesh enthält. Die ermittelten Daten sind hierbei nicht frei verfügbar, sondern stehen nur dem Besitzer der Pods zur Verfügung und werden in der Basisversion auch lediglich für ein Jahr gespeichert.[AQM]

Versuche, welche von Nuria Castell et. al. mit diesen AQMesh pods durchgeführt wurden, zeigten ein Bestimmtheitsmaß von größer als 90 %, allerdings nur unter Laborbedingungen. Im Feldversuch zeigten sich signifikant geringere Korrelationen. [CRDS<sup>+</sup>16]

Die AQMesh Pods wurden von Philipp Schneider et. al. [SCV<sup>+</sup>17] erfolgreich eingesetzt, um eine Netzmessung in Oslo durchzuführen. Hierbei wurde durch dass zusammenführen der Sensordaten mit Meteorologischen und Simulationsdaten eine Heatmap der Stadt Oslo erstellt, welche den Konzentrationsverlauf innerhalb der Stadt darstellt. Durch die Kombination dieser Daten wurde außerdem eine Verbesserung der Korrelation gegenüber Vergleichsmessungen erreicht.

### 3.1.3. Übersicht der Projekte

Für die zwei kommerziellen Projekte Air Quality Egg und Air-Q stehen leider keine Informationen über die eingesetzten Sensoren zur Verfügung. Aufgrund der angegebenen Messbereiche und Größe der Messstationen ist allerdings davon auszugehen dass sie elektrochemische Sensoren einsetzen. Eine Übersicht über alle vorgestellten Projekte ist in Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 dargestellt.

Tabelle 3.1.: Übersicht der zuvor genannten Projekte. Die Basisversion umfasst nur eine kleine Auswahl der aufgezählten Sensoren

Projekt/Produkt	Sensoren	Open Source	Preis (Basisversion)
OpenSenseMap	Frei wählbar	Ja	250 €
Luftdaten.info	Feinstaub, Temperatur, Luftfeuchte	Ja	30 €
hackAIR	Feinstaub, Temperatur, Luftfeuchte	Ja	60 €
Air Quality Egg	Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , Feinstaub, O <sub>3</sub> , CO, Flüchtige organische Verbindungen	Nein	160 €
Air-Q	Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , Feinstaub, O <sub>3</sub> , CO, Flüchtige organische Verbindungen, O <sub>2</sub> , Lärm	Nein	400 €
AQMMesh	Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , Feinstaub, O <sub>3</sub> , CO, Flüchtige organische Verbindungen, O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, Lärm, GPS	Nein	Nur auf Anfrage

### 3. Analyse und Anforderungsermittlung

Tabelle 3.2.: Übersicht über den Messdatenzugriff der zuvor genannten Projekte

Projekt/Produkt	Messdatenzugriff	Darstellung
OpenSenseMap	Alle Messdaten per API	Punkte auf einer Karte
Luftdaten.info	Alle Messdaten per API	Farblich markierte Waben auf einer Karte
hackAIR	Alle Messdaten per API	Punkte auf einer Karte
Air Quality Egg	Nur eigene Messwerte, kostenpflichtiger Zugriff für Institutionen, Zugriff per Webinterface	Als Diagramm/Tabelle
Air-Q	Nur eigene Messwerte, Zugriff per App	Als Diagramm/Tabelle
AQMash	Nur eigene Messwerte, Zugriff per Webinterface	Als Diagramm/Tabelle und Karte

## 3.2. Anforderungsermittlung

Es zeigt sich, dass die vorgestellten Projekte in verschiedenen Punkten Defizite haben. So sind die Kommerziellen Lösungen häufig recht teuer, die Daten nur dem Besitzer zugänglich und die Messgenauigkeiten unter realen Bedingungen schlechter als angegeben. Bei den Open Source Projekten hingegen gibt es aktuell kein auf NO<sub>2</sub> fixiertes Projekt und die OpenSenseMap ist zum Teil recht unübersichtlich in ihrer Bedienung. So ergeben sich für die Messstation folgende, als User Storys formulierte Anforderungen, welche in den Tabellen 3.3, 3.4, 3.5 und 3.6 aufgelistet sind. Die Zielgruppen sind hierbei wie folgt definiert.

- Bürger: Ein Bürger ist eine Person, welche sich über die Schadstoffkonzentrationen in seiner Umgebung informieren möchte.
- Interessent: Ein Interessent ist eine Person, welche noch keine eigene Messstation besitzt, allerdings in Zukunft mit einer eigenen Messstation an der Messung teilnehmen möchte. Privatpersonen mit einem Interesse am Umweltschutz, Schüler in der Fridays For Future" Bewegung, Studenten und Technikinteressierte fallen in diese Gruppe.
- Teilnehmer: Ein Teilnehmer ist eine Person, welche eine eigene, angemeldete Messstation betreibt.
- Programmierer: Ein Programmierer ist eine Person, welche die Messdaten der Sensoren oder die gesammelten Erfahrungen nutzen möchte. Hierin fallen zum Beispiel Institutionen oder Forscher, welche die Messdaten zu Forschungszwecken nutzen wollen.

Tabelle 3.3.: Anforderungsdefinition als Userstorys für Bürger

Laufende Nr.	User Story
1	Als Bürger möchte ich Informationen zu den gemessenen Schadstoffen, um die Auswirkung der Messergebnisse auf mich und die Umwelt zu verstehen.
2	Als Bürger möchte ich eine Karte mit Farbindikator, um schnell einen Überblick über die Konzentrationen im Messnetz zu erhalten.
3	Als Bürger möchte ich eine Karte mit Markierungen, um schnell einen Überblick über die Positionen der Messstationen im Messnetz zu erhalten.
4	Als Bürger möchte ich Informationen zu den Messwerten, um die Qualität und Bedeutung der Messwerte verstehen zu können.
5	Als Bürger möchte ich Informationen zu dem Standort des Sensors, um die Messergebnisse vergleichbar zu machen(Indoor/Outdoor/...).

Tabelle 3.4.: Anforderungsdefinition als Userstorys für Interessenten

Laufende Nr.	User Story
6	Als Interessent möchte ich eine einfache Anleitung, um die Messstation nachzubauen zu können.
7	Als Interessent möchte ich eine unkomplizierte Anmeldung, um an dem Projekt teilnehmen zu können.
8	Als Interessent möchte ich gut verfügbare Teile, um die Station mit wenig Aufwand nachzubauen zu können.
9	Als Interessent möchte ich günstige Komponenten, um den Preis für die Messstation gering zu halten.

Tabelle 3.5.: Anforderungsdefinition als Userstorys für Teilnehmer

Laufende Nr.	User Story
10	Als Teilnehmer möchte ich beständige Komponenten, um geringe Betriebskosten und Wartungsaufwand zu haben.
11	Als Teilnehmer möchte ich die Messstation erweitern können, um zusätzliche Messdaten zu erfassen.
12	Als Teilnehmer möchte ich Zugriff auf meine Messdaten, um einen Überblick über die Schadstoffbelastung an meinem Standort zu haben.
13	Als Teilnehmer möchte ich eine unkomplizierte Kalibrierung, um bessere Messwerte zu erhalten.
14	Als Teilnehmer möchte ich ein möglichst dichtes Messnetz, um Schadstoffquellen schnell zu identifizieren.
15	Als Teilnehmer möchte ich meine Privatsphäre schützen, indem mein Standort leicht anonymisiert wird.
16	Als Teilnehmer möchte ich eine Abweichung der Messdaten von weniger als 25%, um diese als Grundlage für Diskussionen mit Behörden nutzen zu können.

### 3. Analyse und Anforderungsermittlung

Tabelle 3.6.: Anforderungsdefinition als Userstorys für Programmierer

Laufende Nr.	User Story
17	Als Programmierer möchte ich eine intuitive API, um die Daten für mein Projekt zu nutzen.
18	Als Programmierer möchte ich Zugriff auf den Quellcode mit Open Source Lizenz, um aus den Erfahrungen des Projektes lernen zu können.
19	Als Programmierer möchte ich Zugriff auf die Daten der Kalibrierung, um sie mit den Kalibrierungen anderer Sensoren vergleichen zu können.
20	Als Programmierer möchte ich Zugriff auf historische Messdaten, um einen zeitlichen Verlauf darstellen zu können.

### 3.3. Zusammenfassung

Bei der Anforderungsermittlung zeigte sich, dass unter den existierenden Open Source Projekte bisher keine Messtation existiert die NO<sub>2</sub> messen kann. Kommerzielle Ansätze, welche über NO<sub>2</sub> Sensoren verfügen, zeigen zudem im Feldeinsatz größere Abweichungen als von den Herstellern angegeben. Auch zeigte sich, dass die Messdaten der Kommerziellen Sensoren nicht frei verfügbar sind und zum Teil, wie beim Air Quality Egg, sogar nur gegen einen Geldbetrag zur Verfügung gestellt werden.

Wenn Messdaten verfügbar sind, ist bei keiner der Lösungen eine Angabe zu den Messfehlern zu finden.

# 4. Konzept

Dieses Kapitel besteht aus zwei Abschnitten. Zunächst wird das Konzept der Messstation behandelt. Diese besteht prinzipiell aus drei Komponenten: der Basisplatine, einem NO<sub>2</sub> Sensor und einem Temperatur- und Luftfeuchtesensor. Hierbei werden verschiedene Sensortypen und Komponenten vorgestellt, verglichen und die geplanten Versuche mit den Messtationen beschrieben.

Anschließend wird auf das Konzept der API und Webanwendung eingegangen. Hierbei werden neben der Struktur der Webseite auch verschiedene Darstellungsformen der Messergebnisse auf einer Karte vorgestellt.

## 4.1. Messstation

Die Messstation hat die Aufgabe die Messdaten der Sensoren auszulesen und an die API des Webservice zu übermitteln. Hierfür ist es notwendig dass sie eine Verbindung zum Internet aufbauen kann. Die eingesetzten Sensoren müssen in der Lage sein, die NO<sub>2</sub> Konzentration und andere Einflüsse auf den Sensor, wie die Temperatur, zu messen.

### 4.1.1. Basisplatine

Die Aufgabe der Basisplatine umfasst das Aufzeichnen, Auswerten und Übertragen der Messwerte an den Webservice. Mögliche Komponenten, welche hierfür in Frage kommen, sind ein Raspberry Pi oder ein IoT WLAN Modul, die im Folgenden vorgestellt werden.

#### Raspberry Pi

Bei dem Raspberry Pi handelt es sich um einen Einplatinencomputer der gleichnamigen Raspberry Pi Foundation, welcher ursprünglich als Lernplattform für Programmier- und Hardwarekenntnisse entwickelt wurde. Es gibt eine Reihe an verschiedenen Modellen, welche preislich bei 12€ für einen Raspberry Pi Zero beginnen und bei 60€ für das aktuelle Modell 4B enden. Eine Gemeinsamkeit aller Modelle ist die GPIO Leiste (General Purpose Input and Output), welche das einfache Anschließen sogenannter Pi-HATs ermöglicht, die den Rechner um zusätzliche Funktionen erweitern.

Von allen Modellen wird im Folgenden der Raspberry Pi Zero W betrachtet, da es sich bei ihm um die günstigste Variante mit WLAN handelt. Eine Übersicht der wichtigsten Spezifikationen ist in Tabelle 4.1 dargestellt.

Als Betriebssystem für den Raspberry Pi wird von der Raspberry Pi Foundation das auf Linux basierende Raspbian zur Verfügung gestellt. Die Programmiersprache Python wird hierbei besonders unterstützt und enthält Bibliotheken zum Ansteuern der integrierten GPIO Pins.

Der Raspberry Pi besitzt keinen integrierten ADC, weshalb es nicht möglich ist, ohne zusätzliche Hardware Messwerte (welche nicht digital übermittelt werden) auszulesen. Auch sind weitere Komponenten (wie eine Micro SD Karte) notwendig, um den Kleinrechner in Betrieb zu nehmen.

#### 4. Konzept

Tabelle 4.1.: Technische Spezifikationen des RaspberryPi Zero W [RAS]

CPU	BCM2835, 1000 MHz
RAM	512 MB
Speicher	MicroSD variabler Größe
WLAN	Broadcom BCM43143, b/g/n
Bluetooth	v4.1 LE
ADC	Nicht Vorhanden
Arbeitstemperatur	0 °C - 85 °C

#### IoT WLAN Module

Bei WLAN Modulen wie dem ESP32 oder ESP8266 handelt es sich um 32 Bit Microcontroller, welche als Basis für Internet-of-Things (IoT) Anwendungen entworfen wurden. Sie besitzen ein WLAN und Bluetooth Interface, welches ihnen die Verbindung mit anderen Geräten und dem Internet ermöglicht.

Der ESP32, auf welchen sich die folgenden Details beziehen, ist als „Low-Power“-Device ausgelegt und hat in Spitze lediglich einen Stromverbrauch von 0,35 Watt, welcher sich durch verschiedene „Power Modes“ auf unter 0,1 Watt senken lässt. Vertrieben wird er im Allgemeinen aufgelötet auf eine Platine, welche neben der Antenne auch den Flashspeicher für die Firmware enthält und ab 5€ erhältlich ist. Eine Übersicht der Spezifikationen ist in Tabelle 4.2 dargestellt.[ESP]

Tabelle 4.2.: Technische Spezifikationen des ESP32 [ESP]

CPU	2x low-power Xtensa® 32 Bit LX6 mit bis zu 240 MHz Takt, abhängig vom Modell des Entwicklerboards
RAM	520 KB SRAM
Speicher	Flashspeicher variable Größe, angebunden per SPI, in der Regel mind. 4 MB
WLAN	802.11 b/g/n
Bluetooth	v4.2 BR/EDR und BLE
ADC	12 Bit Analog - Digital Konverter mit bis zu 18 Kanälen, 0 - 3,3 Volt
Arbeitstemperatur	-40 °C - 125 °C

Ein entscheidender Vorteil des ESP32 im Vergleich zum ESP8266 ist die Größe des verfügbaren Flashspeichers. Im Gegensatz zu vielen ESP8266 Modulen, welche lediglich mit 512 KB Flashspeicher ausgeliefert werden, haben die verfügbaren ESP32 Module mindestens 4 MB. Dies ist auch das obere Limit für die Größe der Firmware, damit diese auf allen verfügbaren Boards lauffähig ist. Zum Programmieren der Firmware kann die Arduino IDE eingesetzt werden, welche im Folgenden vorgestellt wird.

#### Arduino IDE

Bei Arduino handelt es sich um ein Open Source Elektronik Projekt, welches zum einen eine Reihe an Entwicklerboards, zum anderen eine Entwicklungsumgebung zum Programmieren von Mikrocontrol-

lern hervorgebracht hat. Es setzt hierbei auf eine C/C++ ähnliche Sprache, welche allerdings einige besondere Funktionen wie „analogread“ bereitstellt. [ARD] Im Vergleich zu anderen Entwicklungsumgebungen wie dem Atmel Studio erleichtern diese Funktionen die Arbeit enorm, da man sich nicht um den Zugriff auf hardwarespezifische Register kümmern muss.

Online sind viele Bibliotheken für diverse Sensoren und Mikrocontroller verfügbar, welche nicht standardmäßig durch die Entwicklungsumgebung unterstützt werden. Hierzu gehört zum Beispiel auch eine Bibliothek für den ESP32, welche von Espressif bereitgestellt wird. Diese stellt die WLAN Funktionalität und andere ESP32 spezifische Funktionen zur Verfügung.

Auch stellt Arduino die Möglichkeit zur Verfügung, vorcompilierte Firmware auf ein Modul zu laden. Dies stellt für den Endnutzer eine Erleichterung dar, da er nur die vorkomplizierte HEX Datei und nicht das gesamte Projekt benötigt.

Veröffentlicht ist die Arduino IDE unter der LGPL Lizenz.

### Fazit Basisplatine

Aufgrund des Preises, der geringeren Anzahl an notwendigen Teilen und wegen des bereits integrierten ADC Wandlers wurde ein IoT W-Lan Modul als Hardwarebasis gewählt. Ein zusätzlicher Punkt, welcher gegen einen Raspberry Pi spricht, ist dass das Betriebssystem, welches zum Betrieb notwendig ist, vor dem Einsatz von einem Interessenten aufwendig eingerichtet werden müsste.

#### 4.1.2. Konfiguration der Messtation

Da die Messtation nach dem Aufspielen der Firmware über keine Konfiguration verfügt, ist es notwendig, WLAN und Sensoren zu konfigurieren. Hierfür kann prinzipiell ein Webinterface oder eine separate Konfigurationssoftware genutzt werden.

Eine Konfigurationssoftware zu nutzen hat den Vorteil, dass auf der Messtation kein Speicher für ein Webinterface notwendig ist, und lediglich eine Routine benötigt wird, welche die Konfiguration annimmt und einspielt. Allerdings ist hierdurch auch ein Stück zusätzliche Software notwendig, welche zum einen gepflegt, zum anderen vom Endnutzer installiert und gegebenenfalls aktuell gehalten werden muss.

Ein Webinterface benötigt zwar zusätzlichen Speicher, verhindert allerdings Inkompatibilitäten wie sie zwischen Messtation und separater Konfigurationssoftware auftreten können. Hierbei ist allerdings die Größe der Firmware ein begrenzender Faktor, da dass Webinterface je nach Umfang viel Speicher einnehmen kann.

#### 4.1.3. Sensoren für Stickstoffdioxid

Neben dem für Behördliche Messungen eingesetzten und zugelassenen Chemilumineszenz-Verfahren, gibt es noch eine Reihe andere Messverfahren um die NO<sub>2</sub> Konzentration zu bestimmen. Im folgenden werden zwei dieser Messverfahren vorgestellt, für welche kommerzielle Sensoren verfügbar sind.

### Elektrochemische Sensoren

Elektrochemische Sensoren, wie zum Beispiel der NO<sub>2</sub>-A43F der Firma Alphasense, generieren einen Strom, welcher linear Proportional zu der Konzentration der gemessenen Komponente ist.

Diese Funktionsweise der Sensoren basiert hierbei auf dem Zusammenspiel von drei Elektroden, der Arbeits-, Referenz- und Gegenelektrode, welche über einen Elektrolyt (ein elektrisch leitfähiges Medium) miteinander in Kontakt stehen. Die Elektroden haben alle eine ähnliche Zusammensetzung,

#### 4. Konzept

wobei die Arbeitselektrode je nach zu messendem Stoff noch mit einem Katalysator beschichtet ist, welcher die Oxidation bzw. Reduktion katalytisch fördert. Tritt nun die zu messende Substanz mit der Phasengrenze zwischen Elektrode und Elektrolyt in Kontakt, wird dieser abhängig vom gemessenen Stoff reduziert oder oxidiert ( $\text{NO}_2$  wird reduziert).

Die Gegenelektrode gleicht nun die Reaktion der Arbeitselektrode aus, indem zum Beispiel bei einer Reduktion an der Arbeitselektrode eine Oxidation an der Gegenelektrode stattfindet. Der hieraus resultierende kleine Stromfluss zwischen Arbeits- und Gegenelektrode wird gemessen und in eine Konzentration umgerechnet.

Die dritte Elektrode, die Referenzelektrode, hat die Aufgabe das Potential der Arbeitselektrode zu stabilisieren, damit diese eine optimale Sensitivität gegenüber dem gemessenen Stoff behält. Der Aufbau eines solchen Sensors ist in Abbildung 4.1 dargestellt. [ALP]

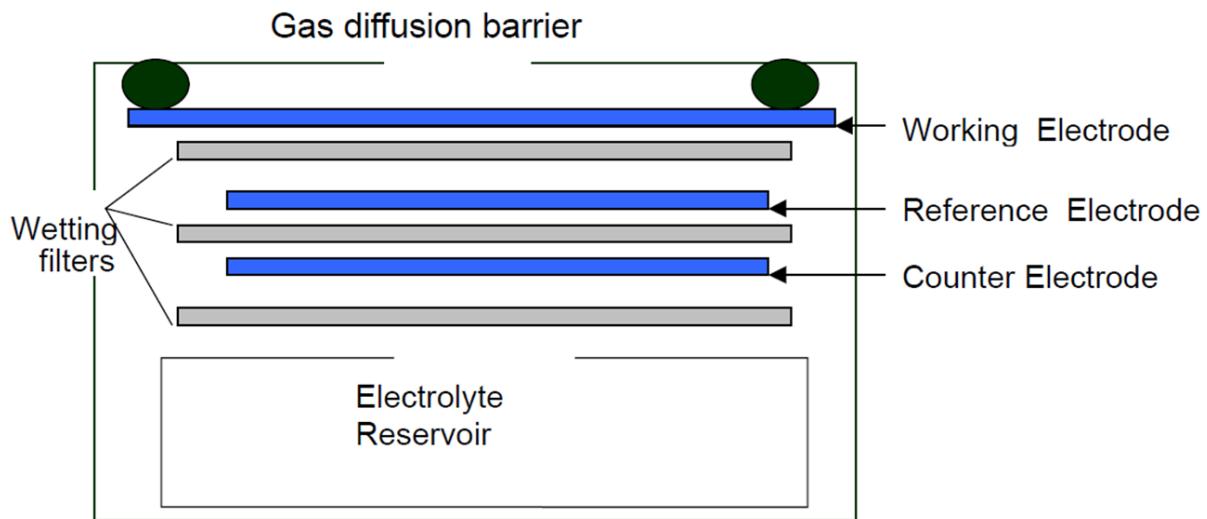


Abbildung 4.1.: Aufbau eines elektrochemischen Sensors. Die „Wetting filters“ enthalten das Elektrolyt um den Kontakt zwischen den Elektroden herzustellen. [ALP]

Sensoren, welche dieses Messprinzip nutzen, beginnen preislich im Bereich von über 100 € und sind aktuell Online nur schwer für Privatpersonen erhältlich. Der Grund hierfür ist, dass zum einen durch die höheren Kosten Zollgebühren anfallen, zum anderem die Händler welche sie gelistet haben nur an gewerbliche Kunden verkaufen. Das Luftdaten.info Projekt führt aktuell Versuche mit diesem Typ von Sensor durch. [LUF]

#### Metalloxid Sensoren

Die Metalloxid-Gassensoren bestehen aus Halbleitern, welche ihren Widerstand abhängig von der sie umgebenden Atmosphäre verändern. Ihre Funktion basiert im Allgemeinen auf der Eigenschaft, dass Sauerstoffatome sich bei hohen Temperaturen an die Oberfläche des Sensors binden und ihm so Elektronen entziehen. Anschließend interagiert der Sensor mit umgebendem Gas, welches entweder Sauerstoff vom Sensor löst oder sich selbst auf diesen setzt und somit zu einer Veränderung des Widerstands führt [PAHG<sup>+</sup>17][FFMCAB10]. Die Interaktionen zwischen Sensor und Luft sind in Abbildung 4.2 dargestellt. Hierbei hat neben der Zusammensetzung des Gases auch die Umgebungstemperatur und Luftfeuchte in Form einer Querempfindlichkeit einen Einfluss auf den Sensorwiderstand.

Das Ausbringen mehrerer Sensoren kann helfen, die Querempfindlichkeit zu kompensieren, wird diese allerdings nicht komplett beseitigen. Deshalb ist es beim Einsatz von Metalloxid Sensoren notwendig, alle störenden Faktoren auf anderem Wege zu erfassen oder die Sensoren regelmäßig zu kalibrieren (vorausgesetzt der Hintergrund verändert seine Zusammensetzung nur langsam).

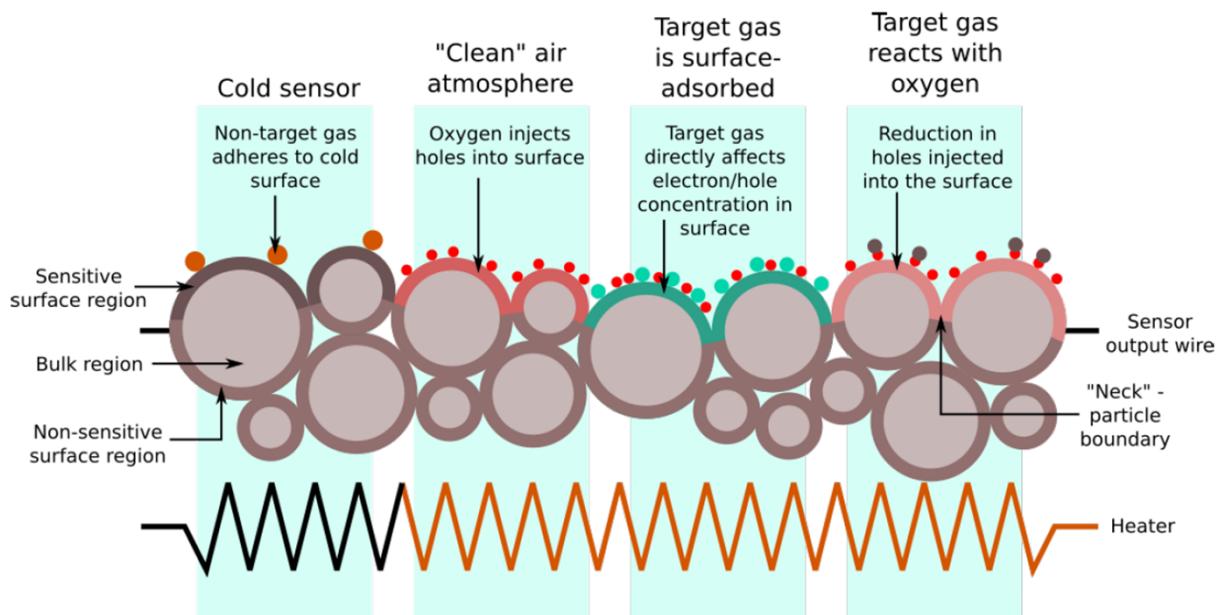


Abbildung 4.2.: Aufbau und Interaktionen mit der Atmosphäre eines Metalloxid Sensors [PAHG<sup>+17</sup>]

Es wird davon ausgegangen, dass Metalloxid Sensoren mit den Fortschritten in den Materialwissenschaften und den hieraus resultierenden Verbesserungen ihrer Messeigenschaften, in Kombination mit ihren geringen Kosten, ein wichtiges Werkzeug in der Luftüberwachung werden können [FFMCAB10][PAHG<sup>+17</sup>].

Argumente für diesen Sensortyp sind der Preis von etwa 15 € und die gute Verfügbarkeit des Sensors. Da die Messwerte der Sensoren für NO<sub>2</sub> von der Temperatur und Luftfeuchte abhängig sind, ist es notwendig diese Werte zusätzlich zum eigentlichen Messwert erfassen und in die Kalibrierung mit einzubeziehen.

## Fazit Sensoren

Die Wahl bei den Sensoren fiel auf einen Metalloxid Sensor, da dieser gegenüber Elektrochemischen Sensoren einen großen Vorteil beim Preis und der Verfügbarkeit hat. Als Interessent gibt es wenige bis keine Möglichkeit, elektrochemische Sensoren zu kaufen, was für einen Citizen Science Ansatz ein stark gewichtetes Kriterium ist.

### 4.1.4. Gehäuse

Zum Schutz vor Wettereinflüssen wie Regen, Wind oder Schnee müssen die elektronischen Bauteile der Messtation in ein Gehäuse eingebaut werden. Hierbei bieten sich an das Gehäuse aus Teilen zu bauen, welche günstig und frei im Baumarkt und Internet verfügbar sind.

Folgende Ansätze sollen betrachtet werden:

- Eine Box (z.B. einer Butterbrotbox, Süßwarengehäuse oder Projektbox) mit Löchern auf der Unterseite als Lufteinlass.
- Ein Aufbau aus Rohren in welcher die Messtation befestigt wird.

Zum Zuführen der Luft an den Sensor wird ein Ansatz mit und ohne zusätzlichen Lüfter miteinander verglichen.

## 4. Konzept

### 4.1.5. Kalibriermethoden und Versuche

In den folgenden Kapiteln werden die Methoden und Versuche vorgestellt, welche durchgeführt werden, um eine Kalibrierfunktion für die Sensoren zu ermitteln.

#### Vormessung

Um einen ersten Vergleich der Sensoren untereinander zu erhalten, werden mit Fünf von ihnen unter Laborbedingungen Vorversuche durchgeführt. Hierfür werden alle Fünf zusammen innerhalb eines Exsikkators platziert und mithilfe einer Gasmischstation der Firma MCZ verschiedenen Verdünnungen eines NO<sub>2</sub> Gases mit bekannter Konzentration ausgesetzt. Die Messdaten der Sensoren werden mithilfe eines Laptops gleichzeitig erfasst und ausgewertet. Anschließend wird aus den gemessenen Daten eine erste Kennlinie für die einzelnen Gassensoren erstellt.

Um die chargeabhängigen Unterschiede der Sensoren mit einzubeziehen, wurden diese über einen Zeitraum von einem Monat bei verschiedenen Händlern bestellt.

#### Temperatureinfluss

Zum ermitteln des Einflusses der Temperatur auf den Messwert werden drei Sensoren zusammen mit Kühlakkus in einer luftdichten Styroporbox Platziert. Durch diesen Aufbau wird sichergestellt, dass die Temperaturen an den Sensoren sich nur sehr langsam verändern und zeitweise annähernd konstant bleiben. Der Messwert der Sensoren wird anschließend kontinuierlich, während des gesamten Auftauvorganges, aufgezeichnet und ausgewertet.

#### Vergleichsmessung

Bei den Vergleichsmessungen werden die zu prüfende Sensoren neben einem eignungsgeprüften Analysator aufgebaut und die ermittelten Messwerte einer Woche Messzeit verglichen. Hierfür eingesetzt wird ein eignungsgeprüfter Analysator der Firma Teledyne (Modell T200). Hierbei bekommen die Sensoren dasselbe Messgas wie der eignungsgeprüfte Analysator. Alle Messdaten werden aufgezeichnet und im Anschluss grafisch ausgewertet.

Aus den Messdaten der Vergleichsmessung wird im Anschluss eine Kalibrierfunktion per fitting ermittelt. Da die Messstation nicht über eine Messgasaufbereitung verfügt, welche das Gas entfeuchtet und auf eine konstante Temperatur bringt, sind die Temperatur und Luftfeuchtigkeit als Teil der Kalibrierfunktion zu berücksichtigen.

#### Netzmessung

Bei einer Netzmessung werden eine größere Anzahl an Messpunkten in Form von Messstationen über eine Fläche verteilt und gleichzeitig bemessen. Der Vorteil einer solchen Messung liegt darin, dass sich die Quelle von Ereignissen, welche große Mengen NO<sub>2</sub> produzieren, auf diese Weise lokalisieren lassen und sich der zeitliche Verlauf der Konzentration auf einer Karte abbilden lässt.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll eine solche Messung in Mönchengladbach durchgeführt werden. Hierfür werden insgesamt sieben Sensoren an Probanden, welche im Stadtgebiet von Mönchengladbach wohnen, verteilt und für einen Monat betrieben. Außerdem sollen behördliche Messdaten der drei Behördlichen Messstationen in Mönchengladbach zur Ergänzung der durch die Sensoren ermittelten Daten eingesetzt werden.

## 4.2. Webservice

Im folgenden Kapitel werden die Konzepte des Webservice eingegangen, welcher sich aus einer Webanwendung und einer API zusammensetzt.

### 4.2.1. Darstellungsformen der Messergebnisse

Verschiedene Möglichkeiten Messdaten vieler Messstationen grafisch darzustellen sind in Abbildungen 4.3 und 4.4 dargestellt. Diese werden im folgenden vorgestellt und miteinander verglichen.

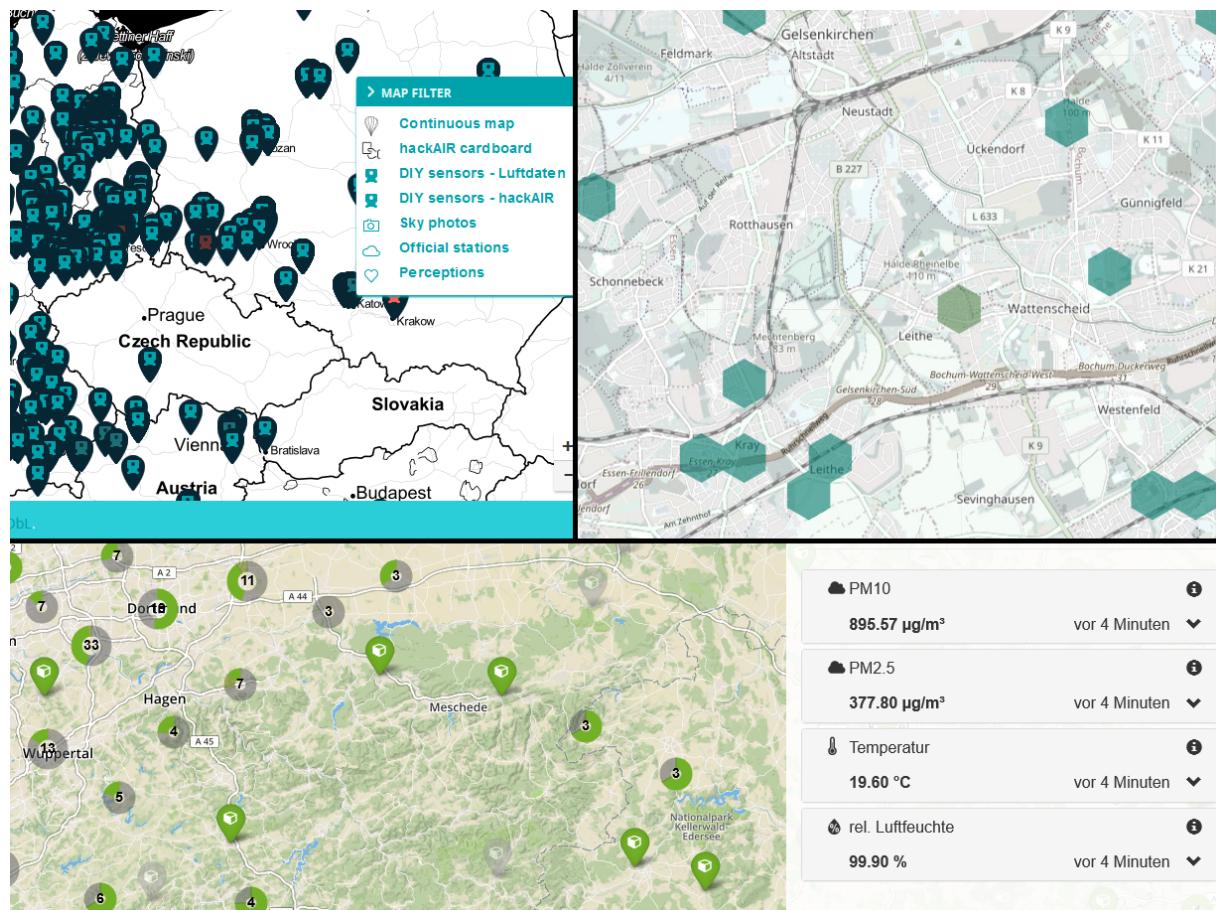


Abbildung 4.3.: Verschiedene Möglichkeiten Messwerte für Luftschadstoffe auf einer Karte darzustellen. Zu sehen sind die verwendeten Methoden von hackAIR (Oben links), Luftdaten.Info(Oben rechts) und OpenSenseMap (Unten)

### Einzelpunkte

Die Darstellung als Einzelpunkte auf einer Karte ist eine einfache Möglichkeit, die Position der Messstationen darzustellen. Diese Darstellungsform ist in der Abbildung 4.3 oben Links und unten abgebildeten. Die Einfärbung einzelner Punkte kann hierbei als Indikator für die gemessene Konzentration eingesetzt werden, indem die Messwerte von niedrig nach hoch mittels einer Farbe von blau nach rot eingefärbt werden.

Die Auswahl einzelner Messpunkte öffnet in den betrachteten Beispielen ein Unterfenster, welches detailliertere Informationen zu den Messtationen anzeigt.

#### 4. Konzept

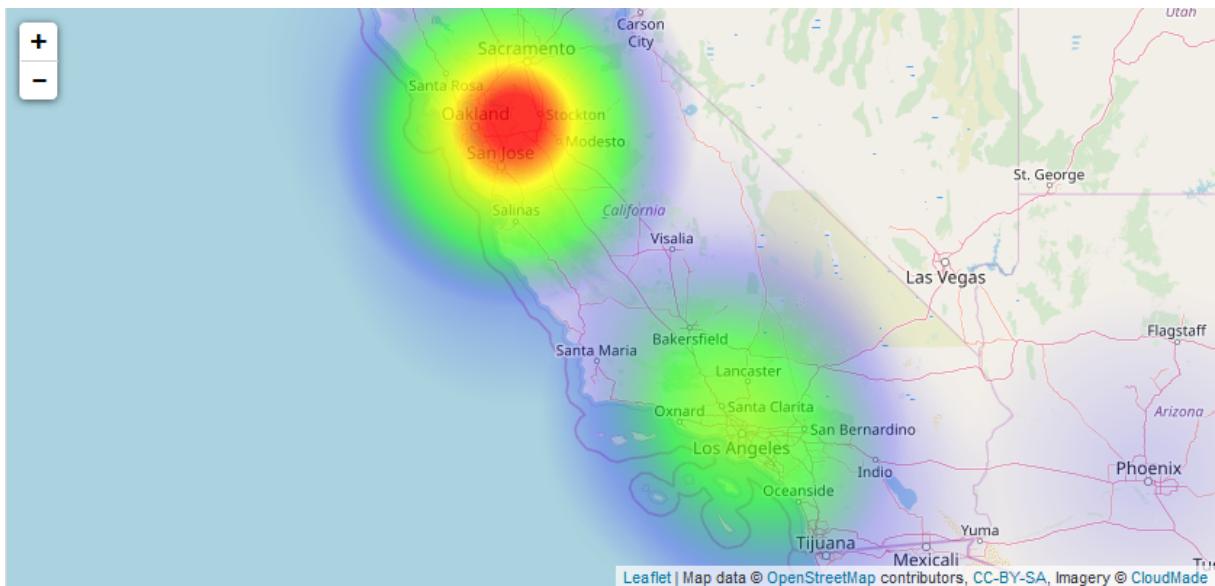


Abbildung 4.4.: Darstellung von Messdaten als Heatmap. Zu sehen ist eine Kombination aus Leaflet und heatmap.js, welche als Beispiel zur Verfügung steht.

Diese Darstellungsform hat den Nachteil, dass es nicht einfach ist, sich einen schnellen Überblick über die aktuellen Messwerte in einer Region zu verschaffen. Auch kann die Übersichtlichkeit bei einem sehr dichten Messnetz verloren gehen, wenn die Marker mehrerer Messtationen sich überlappen.

#### Heatmap

Eine Heatmap, wie sie in Abbildung 4.4 abgebildet ist, ermöglicht die schnelle Visualisierung von Messdaten. Hierbei werden Punkte entsprechend ihrer Konzentration von blau für niedrige, nach Rot für hohe Messwerte eingefärbt. Jeder Messpunkt beeinflusst hierbei einen vorher definierten Bereich, wobei sein Einfluss mit zunehmendem Abstand zur Quelle abnimmt.

Heatmaps lassen sich durch zusätzliche Daten noch verbessern. So wurden zum Beispiel von Philipp Schneider et. al. [SCV<sup>+</sup>17] Versuche mit AQMesh Stationen durchgeführt, welche innerhalb des Stadtgebietes von Oslo aufgestellt wurden. Mit Hilfe von Modellrechnungen, welche Wetterdaten und das „EPISODE dispersion model“ nutzen, wurde hierbei die Aussagekraft der erstellten Heatmap verbessert. Das Ergebnis dieser Kombination ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

Der Nachteil einer reinen Heatmap ist, dass das Ablesen eines konkreten Messwertes einer spezifischen Station nicht möglich ist. Auch ist es je nach gewählter Art der Einfärbung schwer zu erkennen, ob ein Ort nur niedrige Messerte oder einfach keine Messtation hat. Der für eine Heatmap übliche Farbverlauf ist zusätzlich ein Problem, da er fälschlicherweise das Gefühl vermitteln kann, dass der Messwert mit der Distanz abnimmt, was allerdings nicht zwingend der Fall ist. Hier kann eventuell Abhilfe geschaffen werden, indem der beeinflusste Bereich nur in einer einzigen, korrespondierenden Farbe eingefärbt wird. Auch berücksichtigt eine Heatmap ohne zusätzliche Daten keine Einflüsse auf die Ausbreitungsrichtung.

#### Hexbin map

Bei einer „Hexbin map“, wie sie von Luftdaten.info genutzt wird, handelt es sich um eine Darstellungsform, bei welcher die Messdaten als farbige Sechsecke auf einer Karte dargestellt werden. Hierfür wird die Karte in einem ersten Schritt zunächst in gleichgroße Sechsecke eingeteilt. Anschließend werden diese anhand der Messdaten der in ihr enthaltenen Messtationen komplett in einer Farbe, welche

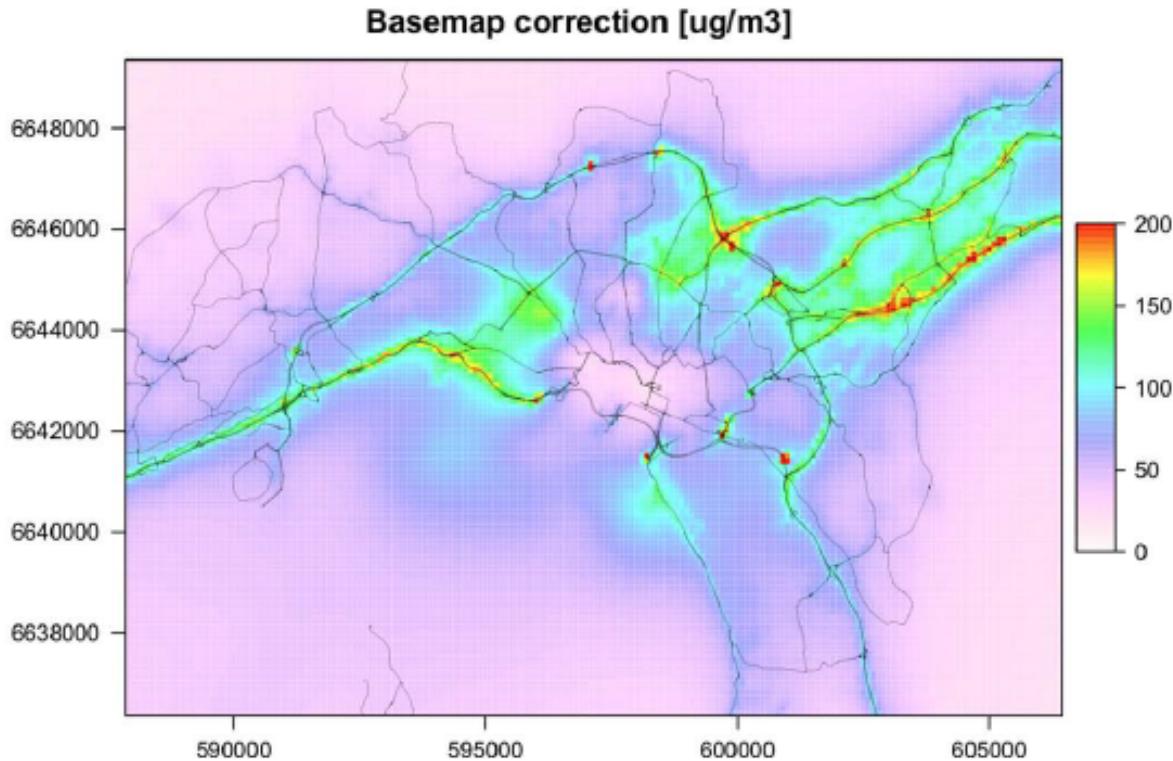


Abbildung 4.5.: Das Ergebnis des Zusammenführens von Messdaten und Modellrechnung auf einer Karte von Oslo.[SCV<sup>+</sup>17]

die Konzentration repräsentiert, eingefärbt. Sind in einem Bereich keine Messdaten vorhanden, so wird auch das umschließende Sechseck nicht gezeichnet.

Der Vorteil dieser Darstellungform liegt darin, dass im Vergleich zu einer Heatmap nicht der falsche Eindruck erweckt wird, dass die Konzentration mit zunehmender Distanz zum Messpunkt abnimmt. Allerdings kann die Position der Messtationen innerhalb des Rasters zu Problemen führen. So hat zum Beispiel die Messung einer Messtation, welche am Rand eines Feldes liegt, auf die umliegende Felder keinen Einfluss. Dies kann im worst case dazu führen, dass ein eigentlich belasteter Bereich durch ungünstig verteilte Messtationen als sauber dargestellt wird. Auch hat die Größe der Sechsecke einen Einfluss auf die Interpretation der Messdaten. Da zum Beispiel in einem Ort mit vielen ländlichen Stationen die Anzahl geringer Messwerte innerhalb eines den ganzen Ort umschließenden Sechseckes größer ist, werden die dargestellten Messwerte hier tendenziell zu niedrig sein.

#### 4.2.2. Aufbau der Webanwendung

Alle Seiten der Webanwendung (mit Ausnahme des Impressums) sollen über die Suchleiste am oberen Rand der Webanwendung erreichbar sein. Der Link zum Impressum wird innerhalb der Fußzeile platziert. Die Webanwendung erhält ein responsives Design, so dass auf einem mobilen Endgerät mit kleinem Display alle Links aus der Kopfzeile, mit Ausnahme des „Home“ Links, in ein Untermenü verschoben werden.

Der prinzipielle Aufbau der Seite ist in den Abbildungen 4.6 und 4.7 dargestellt.

Die Hauptseite soll dem Nutzer direkt einen ersten Blick auf die Ergebnisse bisher installierter Messstationen ermöglichen. Hierfür soll über dem einleitenden Text eine kleine Version der Übersichtskarte platziert werden. Der Text soll in Kurzform die Idee hinter dem Projekt beschreiben. Weitere Unterseiten, die einem nicht angemeldetem Nutzer zur Verfügung stehen, enthalten Infotext-

#### 4. Konzept

te zu Stickstoffdioxid und dessen Gefahren, eine Anleitung zum Mitmachen, eine größere Version der Übersichtskarte und ein Formular zum einloggen/registrieren.

Loggt ein Nutzer sich ein, erhält er zusätzlich Zugriff auf eine Seite, welche die Daten seiner Messstation bereitstellt, wobei der Login Button durch einen „Meine Station“ Button ersetzt wird. Hierfür sollen der Verlauf der NO<sub>2</sub> Konzentration, Luftfeuchte und Temperatur grafisch als Diagramm dargestellt werden. Zusätzlich sollen dem Nutzer weitere Informationen angezeigt werden, welche für die Übertragung der Messdaten und die Konfiguration der eigenen Messtation nötig sind.

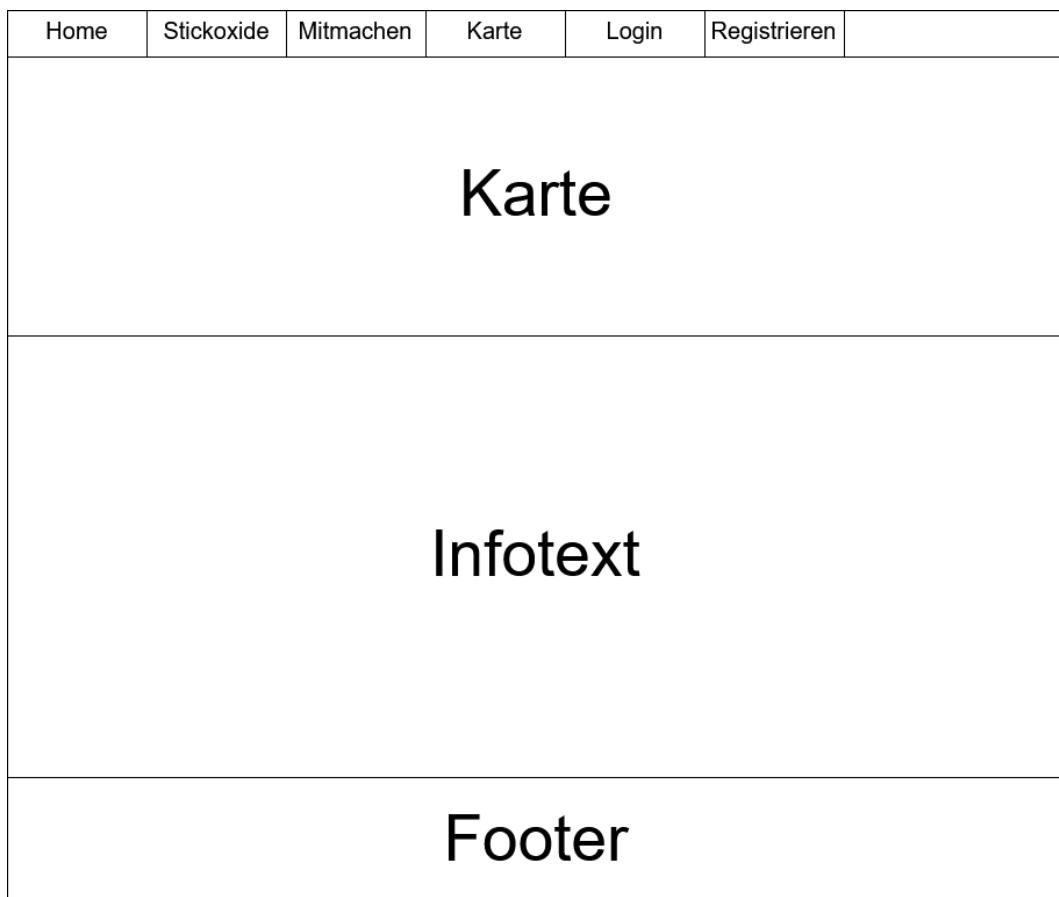


Abbildung 4.6.: Ansichtsskizze der Desktopversion der Webanwendung

#### Übersichtskarte

Die Übersichtskarte soll dem Nutzer eine direkte Übersicht über die gemessenen Werte geben. Die Darstellung der Messwerte soll hierbei grafisch mittels der zuvor vorgestellten Heatmap erfolgen. Ein Filtern der Karte ist nicht vorgesehen, da im Gegensatz zu zum Beispiel OpenSenseMap.org mit NO<sub>2</sub> lediglich ein Schadstoff/Messwert betrachtet wird. Eine Suche nach Ortsnamen ist vorgesehen, welche das schnelle finden der eigenen Messstation ermöglichen soll.

Als Datenquelle für die Karte soll eine durch die API bereitgestellte JSON genutzt werden, welche die Koordinaten und aktuellsten Messwerte jeder Messstation enthält. Messstationen, welche seit längerer Zeit keine Messwerte übermittelt haben, sollen hierbei nicht mit angezeigt werden.

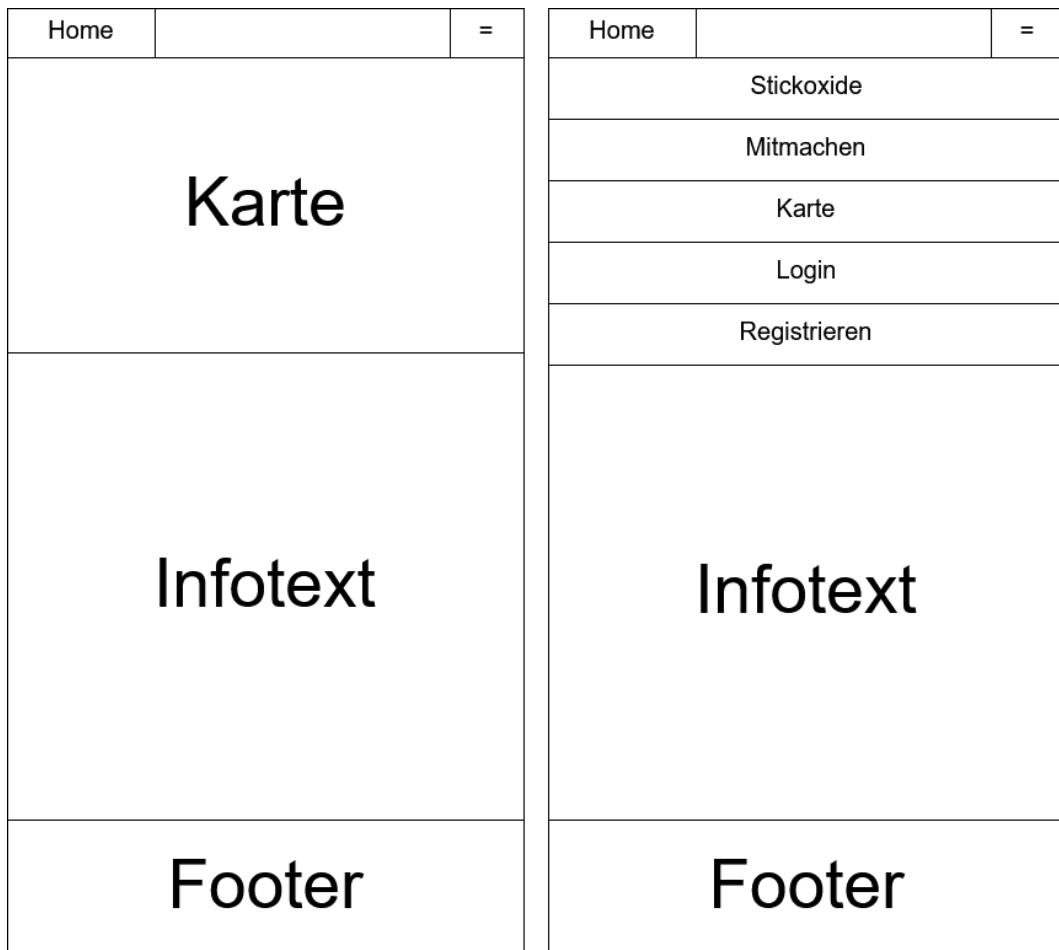


Abbildung 4.7.: Ansichtsskizze der Mobilen Version der Webanwendung. Links ist die Grundansicht und rechts die Ansicht mit expandiertem Menü dargestellt

### Datenschutz und Sicherheitsaspekte

Da der Webservice eine Registrierung mithilfe von Passwörtern ermöglicht, ist es notwendig, diese sicher zu hinterlegen. Um diese Sicherheit zu erreichen, wird eine Hashfunktion eingesetzt, welche das übermittelte Passwort zusammen mit der zufällig generierten UUID als Salt in eine neue Zeichenfolge umsetzt. Diese Zeichenfolge wird anschließend zusammen mit der UUID in der Datenbank hinterlegt. Beim Loginversuch durch einen Nutzer wird sein übermitteltes Passwort erneut zusammen mit seiner UUID durch die Hashfunktion umgesetzt. Entspricht das Ergebnis der zuvor gespeicherten Zeichenfolge ist der Login erfolgreich.

Bezüglich des Datenschutzes ist darauf zu achten, dass der Standort der Messstationen nicht zu genau erfasst/ausgegeben wird, da ein Nutzer seinen Standort nicht unbedingt öffentlich bekanntgeben möchte. Außerdem ist es notwendig eine Datenschutzerklärung im Footer der Seite zu platzieren, da personenbezogene Daten verarbeitet werden.

## 4.3. Zusammenfassung

Als Basis für die Messstation wurde ein ESP32 gewählt, da er im Vergleich zu einem RaspberryPI bereits die meisten notwendigen Komponenten enthält und mit sehr wenig Strom auskommt. Aufgrund der Verfügbarkeit und des Preises wurde als Sensor für NO<sub>2</sub> ein Metalloxidsensor vom Typ MiCS-4514 gewählt.

#### *4. Konzept*

Für die Darstellung der Messdaten im Webservice wurde eine Kombination aus Markern und Heatmap gewählt, wobei die Farbe der Marker angibt ob es sich um eine behördliche oder private Messstation handelt. Auch wurde auf Aspekte des Datenschutzes eingegangen, wobei die Positionen der Messstation leicht verschleiert werden sollen, um die Privatsphäre des Betreibers zu schützen.

# 5. Implementierung

Im folgenden Kapitel wird die konkrete Implementierung der Messstation und des Webservice behandelt. Hierbei wird mit der Implementierung der Messstation und den Ergebnissen der Kalibrierversuche begonnen. Anschließend wird die Implementierung des Webservice mit seiner API behandelt.

## 5.1. Messstation

Als Basis für die Station wurde sich für das zuvor vorgestellte ESP32 IoT-Modul entschieden, da gegenüber dem Raspberry Pi kein separater Analog-Digital-Converter und MicroSD als Speicher benötigt werden. Der verwendete Metalloxidsensor vom Typ MiCS-4514 wird im Folgenden genauer vorgestellt.

### 5.1.1. Sensor MiCS-4514

Bei dem MiCS-4514 handelt es sich um einen Metalloxid Sensor mit zwei beheizten Messelementen, jeweils eines für Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) und Kohlenstoffmonoxid (CO). Im Vergleich zu anderen Sensoren für Stickstoffdioxid, wie zum Beispiel der NO<sub>2</sub>-A43F der Firma Alphasense, welcher aktuell von Luftdaten.Info [LUF] getestet wird und >100 € kostet, ist er mit ca. 15€ günstig und einfacher online erhältlich. Die Spezifikationen und das Ansprechverhalten des NOX Messelementes, welches  $\text{NO}_2$  misst, sind in Tabelle 5.1 und Abbildung 5.1 aufgeführt.

Tabelle 5.1.: Technische Spezifikationen des MiCS-4514.  $R_0$  ist hierbei der Sensorwiderstand an Luft ohne Beheizung. [MiC]

	Symbol	Min	Max	Einheit
Sensorwiderstand an Luft	$R_0$	0,8	20	$\text{K}\Omega$
Typischer $\text{NO}_2$ Messbereich		0,05	10	ppm
Sensitivity factor	$S_R$	2	-	-

Der MiCS-4514 ist Online am einfachsten als Breakout Board erhältlich. Dieses setzt den im Datenblatt enthaltenen empfohlenen Aufbau um und ermöglicht somit einen einfachen Einsatz des Sensors ohne zusätzliche Komponenten. Der Schaltplan für dieses Breakout Board ist im Anhang in Abbildung A.1 abgebildet.

Die Eigenschaften dieses CO Sensors sind in Abbildung A.2 und Tabelle A.1 im Anhang aufgeführt.

### Messbereich

Da der Sensormessbereich in ppm angegeben ist, die Grenzwerte allerdings als Massenkonzentration in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , müssen diese umgerechnet werden. Bei ppm handelt es sich um „parts per million“, also den Anteil an Teilchen eines Stoffes bezogen auf eine Millionen Teilchen der Gesamtmasse. Hierbei entspricht ein ppm einem Stoffmengenanteil von 0,0001 %.

## 5. Implementierung

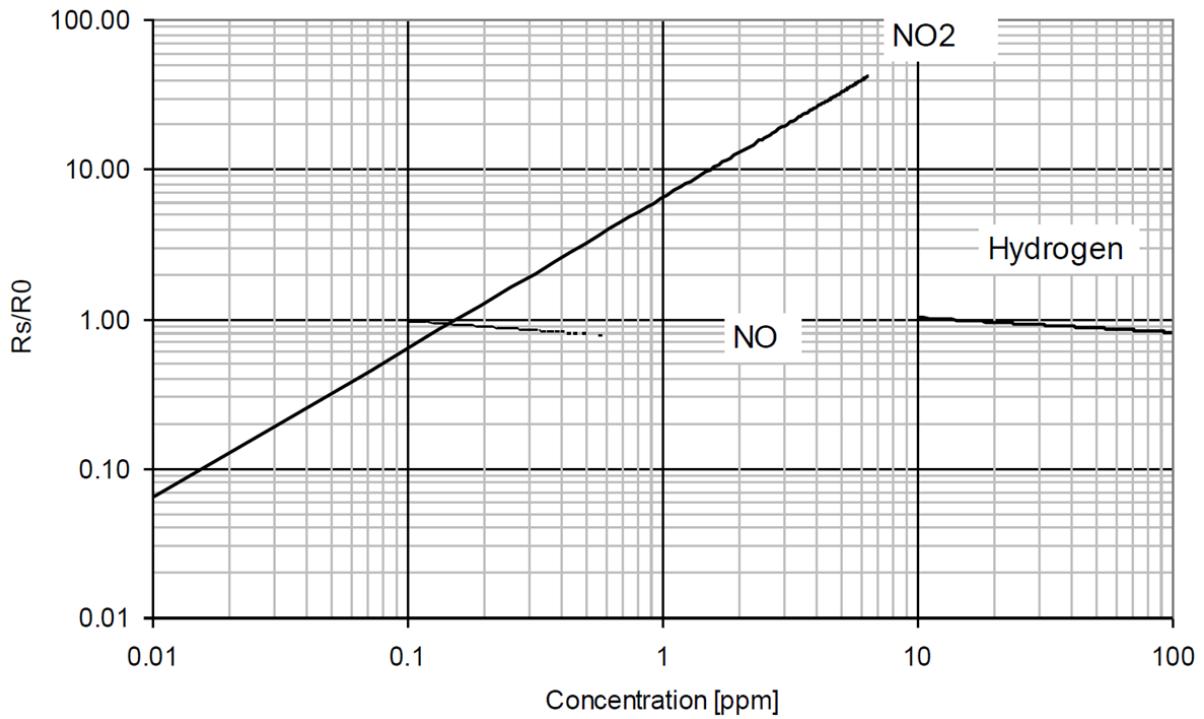


Abbildung 5.1.: Ansprechverhalten des NOX Sensors des MiCS-4514 bei konstant eingeschalteter Beheizung, 25 °C Umgebungstemperatur, 50 % relative Luftfeuchte [MiC]

Für die Umrechnung von ppm in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  wird zunächst das ideale Gasgesetz nach  $n/V$  umgestellt und so die Stoffmengenkonzentration ( $\text{mol}/\text{m}^3$ ) erhalten.

$$p \cdot V = n \cdot R_{\text{Gas}} \cdot T \quad (5.1)$$

$$c_V = \frac{n}{V} = \frac{p}{R_{\text{Gas}} \cdot T} \quad (5.2)$$

Anschließend wird die gesamte Gleichung mit der Molmasse multipliziert um die Massenkonzentration zu erhalten.

$$c_m = \frac{n}{V} \cdot M = \frac{p}{R_{\text{Gas}} \cdot T} \cdot M \quad (5.3)$$

Von hier aus muss nun nur noch die gesamte Gleichung mit den gegebenen ppm multipliziert werden, um den Wert in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  zu erhalten. Setzt man Standardbedingungen (273,15 K, 1013 mbar) und die Molmasse von Stickstoffdioxid (46 g/mol) ein, erhält man das in Gleichung 5.5 gegebene Ergebnis.

$$c_m = \frac{n}{V} \cdot M \cdot c_{\text{ppm}} = \frac{p}{R_{\text{Gas}} \cdot T} \cdot M \cdot c_{\text{ppm}} \quad (5.4)$$

$$c_m = \frac{1013 \text{ mbar}}{83,144 \frac{\text{mbar} \cdot \text{m}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 273,15 \text{ K}} \cdot 46 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 10 \frac{\text{mmol}}{\text{mol}} = 20,51 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} = 20510 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \quad (5.5)$$

Der Messbereich des Sensors ergibt sich somit als  $0 - 20510 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Der Grenzwert bewegt sich somit mit 40 bzw  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  weit am unteren Limit des in dem Datenblatt angegebenen Messbereiches des Sensors. Allerdings lässt sich, durch die Wahl des zweiten Widerstandes, innerhalb dieses Bereiches festlegen wo die größte messbare Sensorveränderung stattfindet. Bei dem verwendeten Breakout Board ist dieser Widerstand so gewählt, dass kleine Konzentrationen bevorzugt sind.

### Spannungsteiler

Da der eingesetzte ESP32 nur eine Spannung von 3,3 V an seinen Analog-Digital-Wandlern (ADC) verträgt, das MiCS-4515 Breakout Board aber bis zu 5 V ausgeben kann, ist es notwendig die maximale Spannung auf ein unkritisches Maß zu begrenzen. Um dies zu erreichen wird ein einfacher, aus zwei Widerständen bestehender Spannungsteiler eingesetzt. Der prinzipielle Aufbau eines solchen Spannungsteilers ist in Abbildung 5.2 dargestellt.

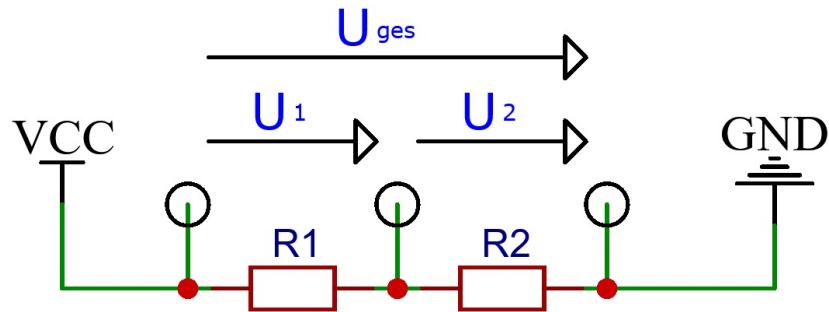


Abbildung 5.2.: Aufbau eines Spannungsteilers. Bei  $R_1$  und  $R_2$  handelt es sich um zwei in Reihe geschaltete Widerstände.

Der Spannungsabfall über die Widerstände errechnet sich, hergeleitet aus dem Ohmschen Gesetz, gemäß der Formel 5.6.

$$U_1 = U_{\text{Ges}} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (5.6)$$

Für zwei Widerstände mit  $R_1 = 200 \Omega$  und  $R_2 = 300 \Omega$  ergibt sich so zum Beispiel für  $U_2$  die in 5.7 angegebene Gleichung.

$$U_2 = 5\text{V} \cdot \frac{200\Omega}{200\Omega + 300\Omega} = 3\text{V} \quad (5.7)$$

Somit lässt sich durch entsprechende Wahl zweier Widerstände aus den gegebenen 5 Volt, eine sichere Spannung  $U_2$  erzeugen. Nutzt man das MiCS-4514 Breakout Board ergibt sich die in Abbildung 5.3 dargestellte Schaltung.

Laut Datenblatt ist ein  $22\text{K}\Omega$  Widerstand nach dem Sensor (RS) empfohlen, wie auch auf dem Breakout Board angebracht ist. Allerdings wird durch das Anschließen des Spannungsteilers der Widerstand gemäß den Formeln für in Reihe und parallel geschalteten Widerstände verändert. Für in Reihe geschaltete Widerstände ergibt sich der Gesamtwiderstand als die Summe aller Widerstände. (Formel 5.8)

$$R_{\text{ges}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (5.8)$$

## 5. Implementierung

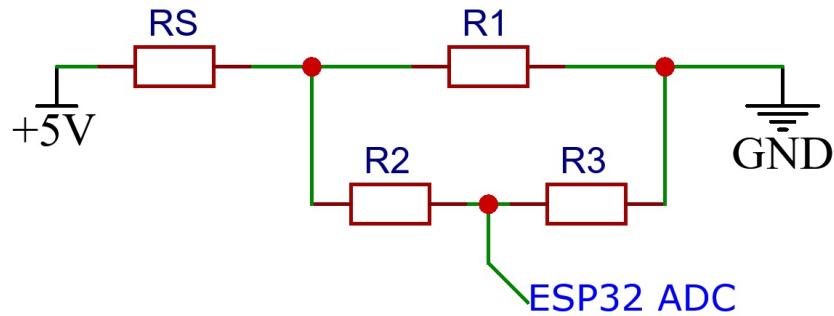


Abbildung 5.3.: Aufbau des in der für die Messstation verwendeten Spannungsteilers. RS ist hierbei der Widerstand des Sensors, R<sub>1</sub> der 22 KΩ Widerstand des Breakout Boards. R<sub>2</sub> und R<sub>3</sub> sind die beiden Widerstände des Spannungsteilers.

Die Gleichung für den Gesamtwiderstand von parallel geschalteten Widerständen ergibt sich aus der reziproken Summe der Reziproken der Einzelwiderstände (Formel 5.9).

$$R_{\text{ges}} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}} \quad (5.9)$$

Um diese Änderung am Gesamtwiderstand und die Anzahl nötiger Komponenten möglichst gering zu halten, werden für R<sub>2</sub> und R<sub>3</sub> zwei große 470 KΩ Widerstände eingesetzt. Hierdurch ergibt sich der dem Sensor folgende Widerstand wie folgt:

$$R_{\text{ges}} = \frac{1}{\frac{1}{22\text{K}\Omega} + \frac{1}{470\text{K}\Omega} + \frac{1}{470\text{K}\Omega}} \quad (5.10)$$

Er bleibt somit nahe am durch das Datenblatt des MiCS-4514 empfohlenen Wert. Da die beiden Widerstände R<sub>2</sub> und R<sub>3</sub> identisch sind, wird die Spannung am ADC, welcher zwischen den beiden angeschlossen wird, gemäß der Formel 5.6 halbiert.

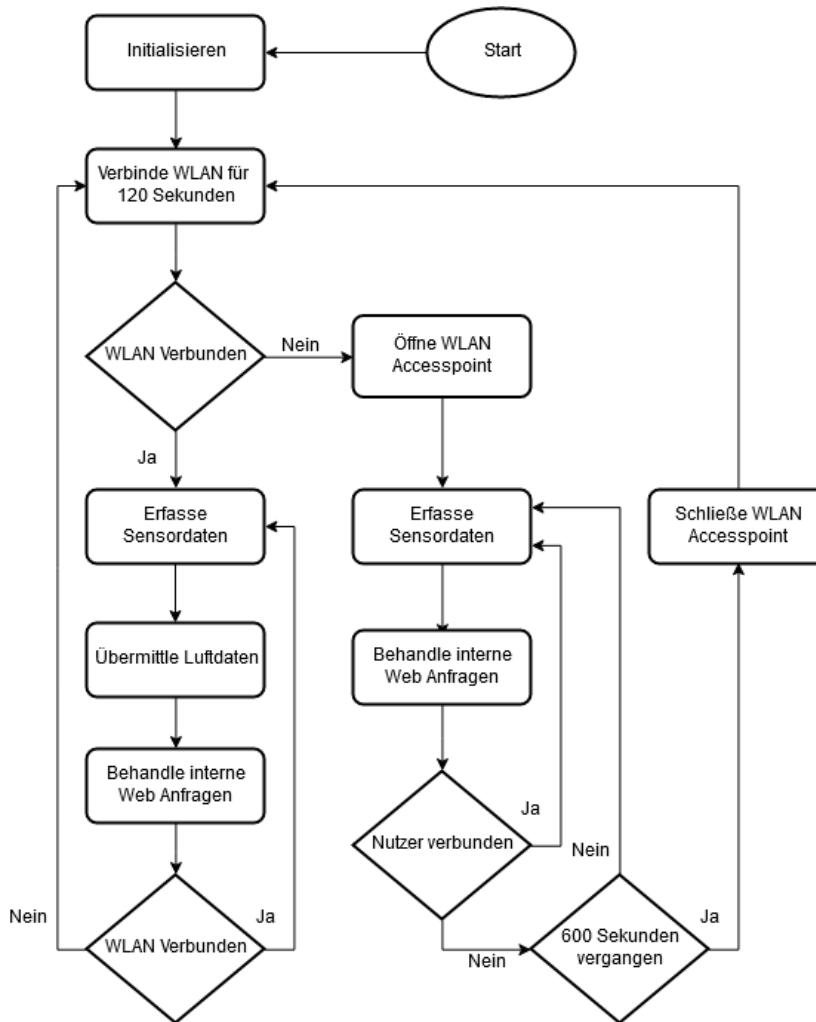
Somit beträgt die maximale Spannung am ADC sichere 2,5 V.

### 5.1.2. Firmware

Der Programmablauf innerhalb der Firmware ist in dem Flussdiagramm in Abbildung 5.4 dargestellt. Es werden in einem ersten Schritt das Modul initialisiert und anschließend für 120 Sekunden versucht, zu dem gegebenenfalls hinterlegten WLAN zu verbinden. Sollte die Verbindung nicht erfolgreich gewesen sein, wird ein WLAN-Accesspoint eingerichtet, welcher dem Nutzer das Verbinden zur Messstation ermöglicht.

Im Anschluss wird mit dem Erfassen der Sensordaten begonnen, welche im Falle einer erfolgreichen Verbindung mittels der API an den Webservice übermittelt werden. Sollte keine Verbindung zustande gekommen sein, werden die Daten lediglich temporär im RAM gespeichert und eine Meldung in roter Schrift auf der internen Webseite angezeigt, welche auf dieses Problem hinweist. Ein nachträgliches übertragen der Daten ist aktuell nicht vorgesehen, da der ESP32 nicht über eine Real Time Clock", kurz RTC, verfügt und es somit nicht möglich ist, den genauen Zeitpunkt der Messung zu erfassen. Allerdings könnte in Zukunft, durch die Integration weiterer Komponenten, eine solche Funktionalität implementiert werden.

Zur Konfiguration der Station und um den Nutzer das Anschauen seiner eigenen Daten zu ermöglichen, wurde ein kleiner Webserver implementiert. Dieser stellt neben der Webanwendung und dem

Abbildung 5.4.: Flussdiagramm der NO<sub>2</sub> Messstation.

zugehörigen Chart.js Script zur Darstellung der Messergebnisse auch die Messdaten als JSON zur Verfügung. Der Inhalt der „main.html“ und „chart.js“ wird über zwei zusätzliche Header zur Verfügung gestellt, in welchen der gesamte Inhalt als Null terminierter String hinterlegt ist. Diese Konvertierung von Text zu null terminiertem String wurde mithilfe des Tools auf der Seite „<http://tomeko.net/>“ durchgeführt.

Erweiterungen an der Firmware können durch die Strukturierung dieser einfach vorgenommen werden. Soll zum Beispiel ein weiterer Sensor ausgelesen werden, so reichen eine entsprechende Änderung in der Funktion welche die Sensordaten erfasst. Ebenso verhält es sich mit dem Übermitteln der Sensordaten an andere Projekte. Als Beispiel für eine solche Erweiterung wurde die Übermittlung der Sensordaten an das OpenSenseMap Projekt implementiert.

Auch lässt sich die Messstation durch das Hinzufügen einer SD-Karte, RTC und einer Batterie als mobiles Messgerät nutzen. Hierfür müssen lediglich innerhalb des „Erfasse Sensordaten“-Blocks kleine Modifikationen durchgeführt werden, um die Messdaten auf die SD-Karte zu schreiben.

### 5.1.3. Kalibrierversuche

In den folgenden Kapiteln werden die konkreten Durchführungen und Ergebnisse der Kalibrierversuche vorgestellt und erläutert.

## 5. Implementierung

### Vorversuche

Zur Ermittlung einer Kalibrierfunktion für die Messstationen wurde zunächst ein Vorversuch unternommen, um das Verhalten mehrerer Sensoren, welche über einen Zeitraum von einem Monat bei verschiedenen Händlern gekauft wurden, zu vergleichen. Ziel war es hierbei herauszufinden, welche Unterschiede verschiedene Chargen eines Sensors untereinander besitzen. Hierfür wurden mit einer Gasmischstation aus Prüfgas mit einer Konzentration von 50 ppm verschiedene geringere Konzentrationen erzeugt. Dieses Prüfgas wurde in einen Exsikkator eingebracht, in welchem sich die fünf untersuchten Sensoren befanden. Nachdem die Sensoren ihre Messwerte nicht mehr veränderten (ca. 20 Minuten), wurden die aktuell registrierten Werte notiert.

Der Aufbau dieses Versuches ist in Abbildung 5.5 zu sehen.



Abbildung 5.5.: Aufbau des Vorversuches mit Gasmischstation.

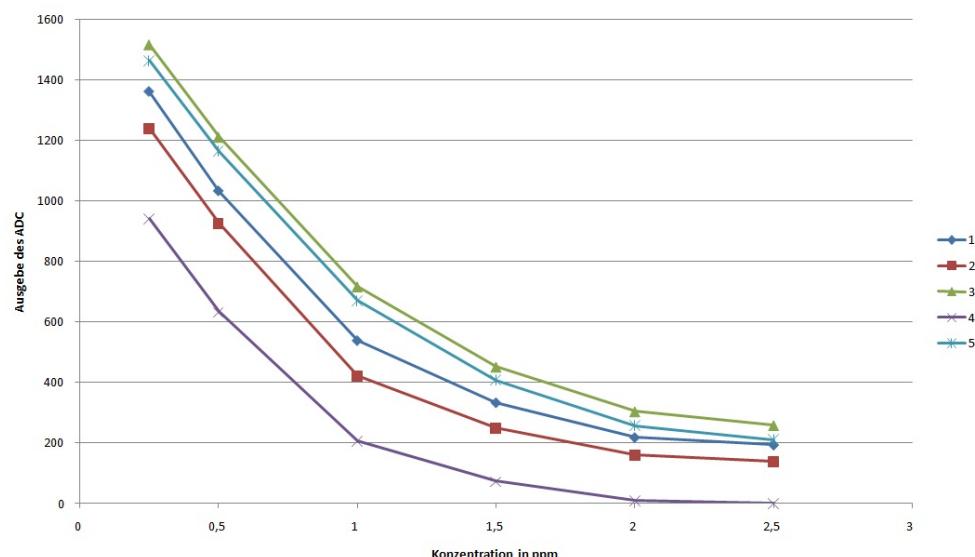


Abbildung 5.6.: Ergebnisdiagramm des Vorversuches bei 30 °C und 0 % Luftfeuchtigkeit

Das Ergebnis des Vorversuches zeigt ein ähnliches Verhalten aller Sensoren bei gleichbleibenden Umgebungsbedingungen, wobei die einzelnen Verläufe auf der Y-Achse verschoben sind. Hieraus folgt dass zumindest bei gleichbleibenden Umgebungsbedingungen für eine qualitative Messung eine Kalibrierung des Nullpunktes ausreichen sollte, um den Unterschied einzelner Sensoren untereinander zu kompensieren.

### Vergleichsmessung Gehäuseformen

Bei dem Vergleich von Gehäusen mit und ohne Lüfter zeigte sich ein Einfluss auf den Messwert. Dieser änderte sich abhängig von der Positionierung des Lüfters, wobei davon auszugehen ist, dass dieser Einfluss durch Änderungen der Temperatur des Sensors zustande kommt. Bei dem Bau von Gehäusen ist somit darauf zu achten dass eine ausreichende Belüftung des Sensors vorliegt, ohne diesen durch einen optionalen Lüfter direkt anzublasen.

In dem in Abbildung 5.7 zu sehenden Gehäuse ist dies umgesetzt, indem der Lüfter die Luft aus dem Gehäuse heraus saugt. Außenluft tritt so durch ein gegenüberliegendes Loch in das Gehäuse ein und strömt an dem Sensor vorbei, ohne ihn direkt anzublasen.

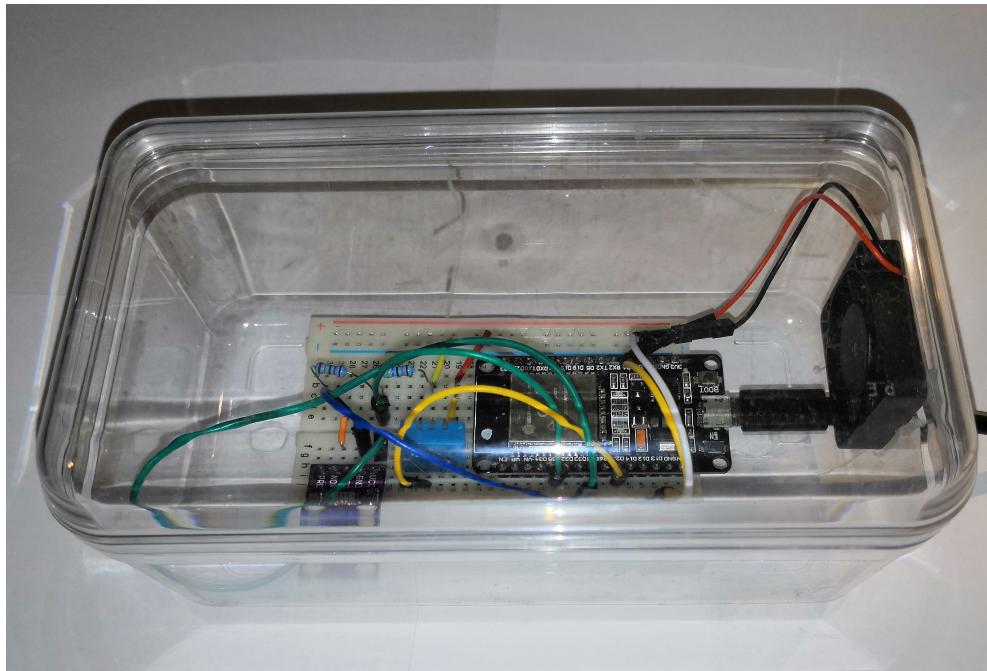


Abbildung 5.7.: Gehäuse mit Lüfter für die Messstation. Hergestellt wurde das Gehäuse aus einer alten Süßwarenverpackung.

### Untersuchung des Temperatureinflusses

Der Versuchsaufbau zur Messung des Temperatureinflusses ist in der Abbildung 5.8 dargestellt. Die Styroporbox wurde nach dem einbringen der Sensoren dicht mit Klebeband verschlossen und die Messdaten über einen Zeitraum von zwei Tagen erfasst.

Es zeigte sich dass die Temperatur einen annähernd linearen Einfluss auf den gemessenen Wert der untersuchten Sensoren hat. Der Verlauf des Messwertes in Abhängigkeit von der Temperatur ist in Abbildung 5.9 dargestellt. Auch zeigte sich ein abflachen des Einflusses im Temperaturbereich von unter 10 °C.

Hier ist in weiteren Versuchen zu klären, ob der Sensor unter 10 °C noch auf Änderungen der NO<sub>2</sub>

## 5. Implementierung

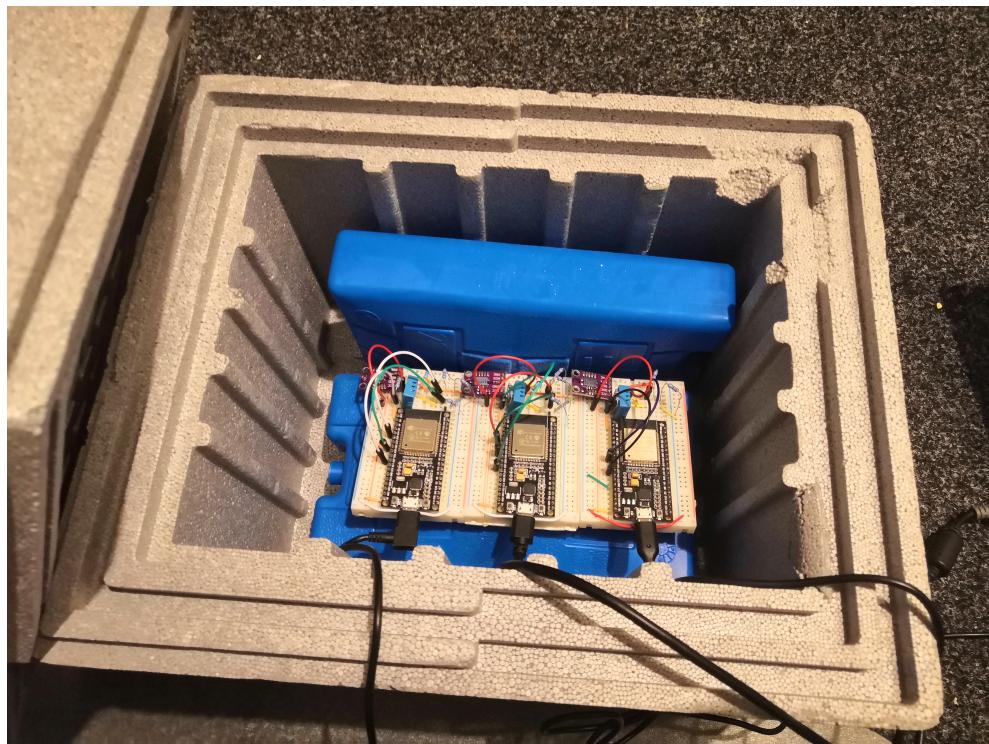


Abbildung 5.8.: Versuchsaufbau zur Ermittlung des Temperatureinflusses. Zu sehen sind die drei Messstationen und die beiden Gefrierakkus.

Konzentrationen reagiert, da er ansonsten für den tatsächlichen Einsatz eine zusätzliche Beheizung benötigt.

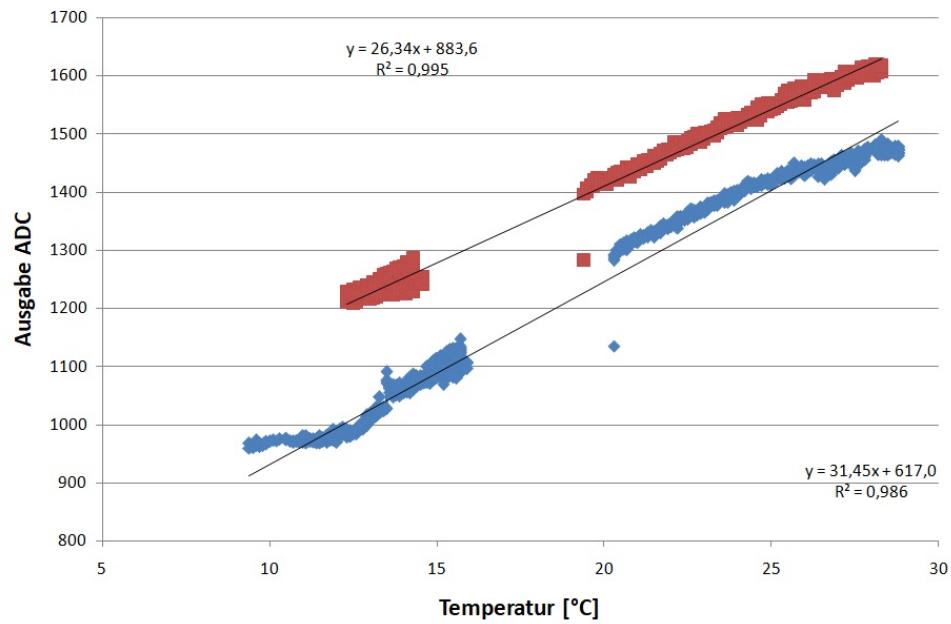


Abbildung 5.9.: Verlauf des Sensorwertes beim Test des Temperatureinflusses.

## Vergleichsmessung

Es wurden drei der Messstationen für den Vergleich mit dem eignungsgeprüften NO<sub>x</sub> Analysator der Firma Teledyne eingesetzt. Hierfür wurden diese Messstationen wie bereits bei den Vorversuchen innerhalb eines Exsikkators platziert, welcher Luftpumpe verschlossen wurde. Mithilfe eines Einsatzes wurde dieser anschließend an der Zuleitung vor dem Analysator angeschlossen, sodass die angesaugte Probe erst an den Messstationen vorbeiströmen muss bevor sie im Analysator gemessen wird. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.10 dargestellt. Aufgezeichnet wurden neben dem Sensorwert die Temperatur und Luftfeuchtigkeit, um diese Faktoren bei der Kalibrierung zu berücksichtigen.

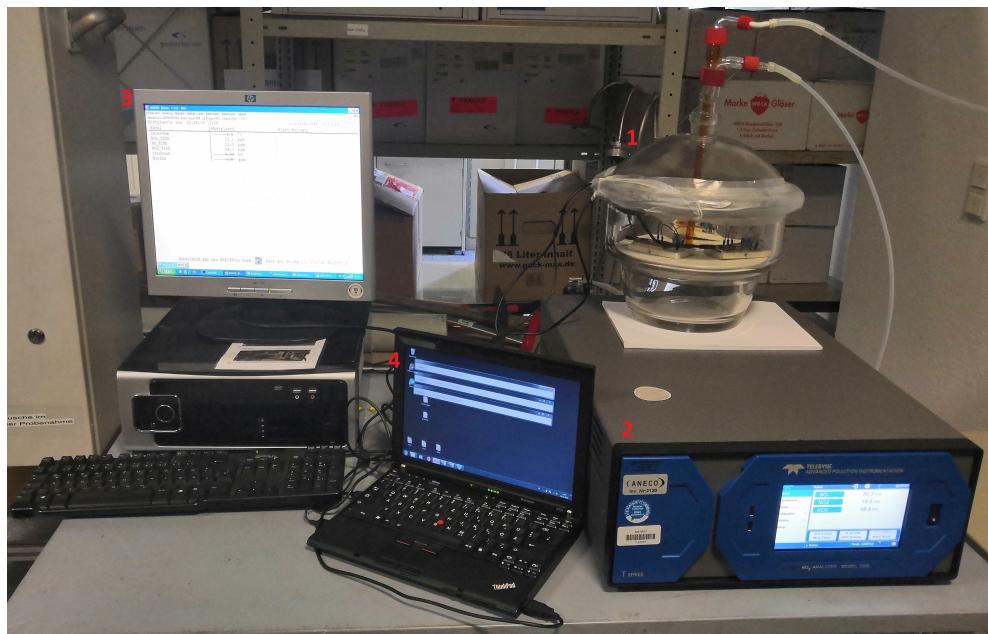


Abbildung 5.10.: Versuchsaufbau der Vergleichsmessung. Zu sehen ist der eignungsgeprüfte Analysator (2), darüber die drei untersuchten Messstationen im Exsikkator (1) und die zwei zur Datenaufzeichnung eingesetzten Rechner(3 und 4).

Für die Kalibrierung des Analysators wurde synthetische Luft als Nullgas und ein DAkkS zertifiziertes Prüfgas zum Einstellen des Endpunktes eingesetzt. Die Ergebnisse der Vergleichsmessung zeigen, dass die Sensoren bei gleichen Bedingungen an verschiedenen Tagen ähnliche Werte gemessen haben (Siehe Tabelle 5.2). Allerdings zeigte sich auch, dass der Zusammenhang zwischen Sensorwert und NO Konzentration größer ist als er im Datenblatt angegeben ist.

Tabelle 5.2.: Beispiele ADC Messwerte an Punkten, an welchen Temperatur, Luftfeuchtigkeit, NO<sub>2</sub> und NO Konzentration identisch sind.

Datum/Uhrzeit	ADC Werte	Temp.[°C]	Luftfeuchte	c <sub>NO<sub>2</sub></sub> [ppb]	c <sub>NO</sub> [ppb]	c <sub>NO<sub>x</sub></sub> [ppb]
26.11.2019 22:53	1130,5	26	30.00	31,7	24,4	56,1
27.11.2019 10:10	1118,5	26,7	30.00	29,9	25	54,9
23.11.2019 23:59	1066	24,6	26.00	37,6	22,2	59,8
24.11.2019 00:00	1065	24,5	26.00	37,4	22	59,4

Der Einfluss der NO Konzentration auf den Messwert des ADC ist hierbei entgegengesetzt zu dem Einfluss der NO<sub>2</sub> Konzentration (aus einer steigenden NO Konzentration resultiert ein steigender ADC Messwert, wohingegen eine Steigende NO<sub>2</sub> Konzentration ein fallenden Messwert zur Folge hat). Da

## 5. Implementierung

die Konzentration von NO und NO<sub>2</sub> nicht im selben Verhältnis ansteigt (ein hoher NO Wert sorgt erst zeitversetzt für einen Anstieg des NO<sub>2</sub> Wertes, da es sich erst über die Zeit hinweg umsetzt), ist dies ein Faktor welcher eine Kalibrierung verhindert. Daten, welche diesen Einfluss zeigen, sind in der Tabelle 5.3 aufgeführt.

Tabelle 5.3.: Eine Beispiel für Messwerte bei welchen alle Parameter außer der NO Konzentration identisch sind.

Datum/Uhrzeit	ADC Werte	Temp. [°C]	Luftfeuchte	cNO <sub>2</sub> [ppb]	cNO[ppb]	cNO <sub>x</sub> [ppb]
25.11.2019 21:43	1100	25,9	26.00	28,8	81,6	110,4
25.11.2019 22:53	1080	25,5	26.00	30,8	52,7	83,5
29.11.2019 09:55	930,5	25,4	26.00	31,1	11,6	42,7
29.11.2019 09:43	922,5	25,4	26.00	28,4	10,5	38,9

Ein Versuch, den Einfluss der einzelnen Messgrößen zu interpretieren, ist in den Abbildungen 5.11, 5.12 und 5.13 dargestellt. In allen drei Fällen wurden Messwerte ausgewählt, bei welchen alle Werte bis auf die beiden betrachteten möglichst gleich sind. Für NO<sub>2</sub>, NO und die Temperatur zeigte sich eine Korrelation, wobei die Gesamtmenge an Punkten, an welchen drei der vier Parameter(NO, NO<sub>2</sub>, Temperatur und Luftfeuchte) nahezu identisch sind, relativ klein ausfällt. Bei der Luftfeuchte gab es in dem Zeitraum der Vergleichsmessung nur sehr kleine Schwankungen, weshalb hier keine Interpretation des Einflusses durchgeführt werden kann.

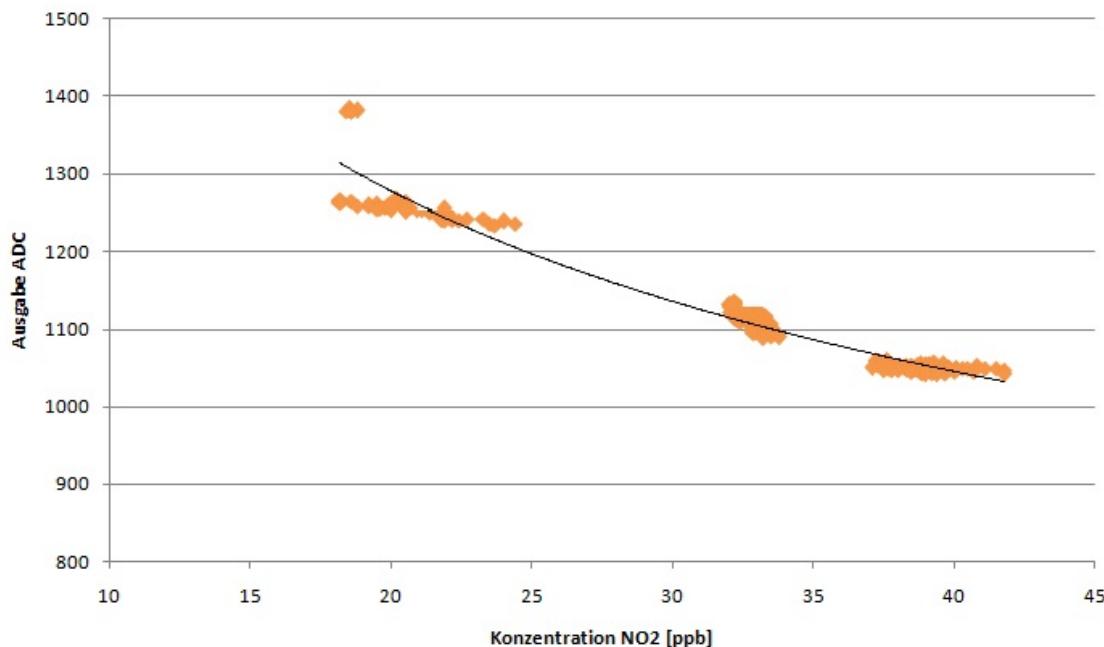


Abbildung 5.11.: Verlauf NO<sub>2</sub> Konzentration gegen ADC Messwert. Es wurden Messwerte gewählt, bei welchen alle anderen Parameter in einem ähnlichen Bereich liegen.

Möglichkeiten, das Problem des Einflusses von NO auf den Messwert zu lösen, können zum Beispiel im vorschalten eines Ozongenerators oder dem Einsatz von Kaliumpermanganat-Trägersorbentien liegen (welche das NO komplett zu NO<sub>2</sub> umsetzen). Beide Möglichkeiten würden allerdings die Zugänglichkeit verringern und den Preis erhöhen.

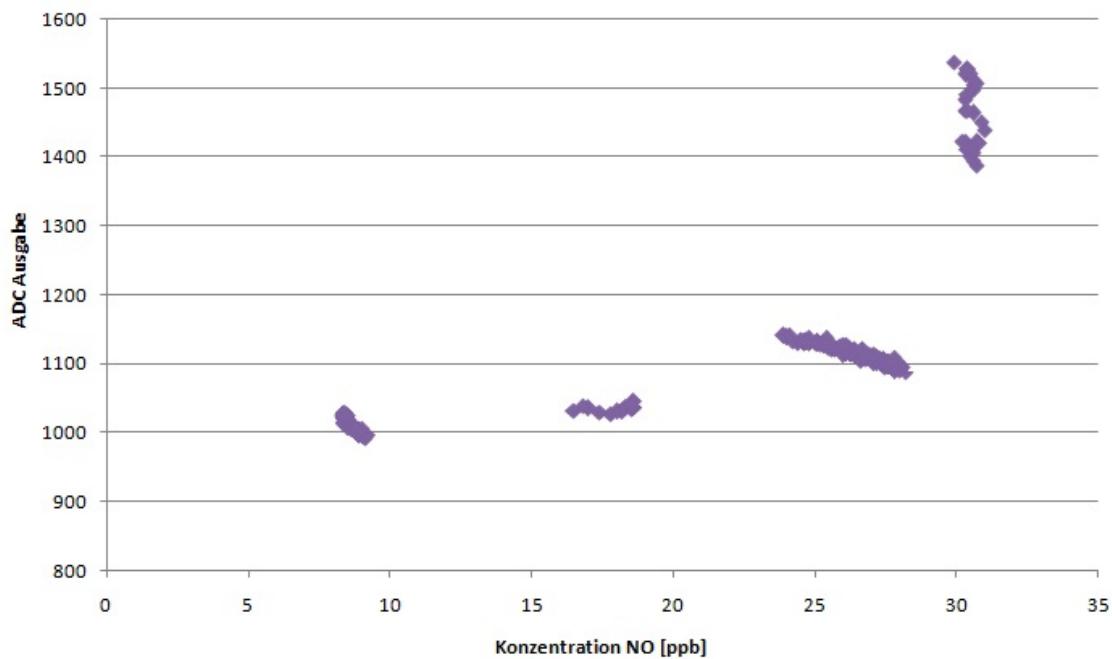


Abbildung 5.12.: Verlauf NO Konzentration gegen ADC Messwert. Es wurden Messwerte gewählt, bei welchen alle anderen Parameter in einem ähnlichen Bereich liegen.

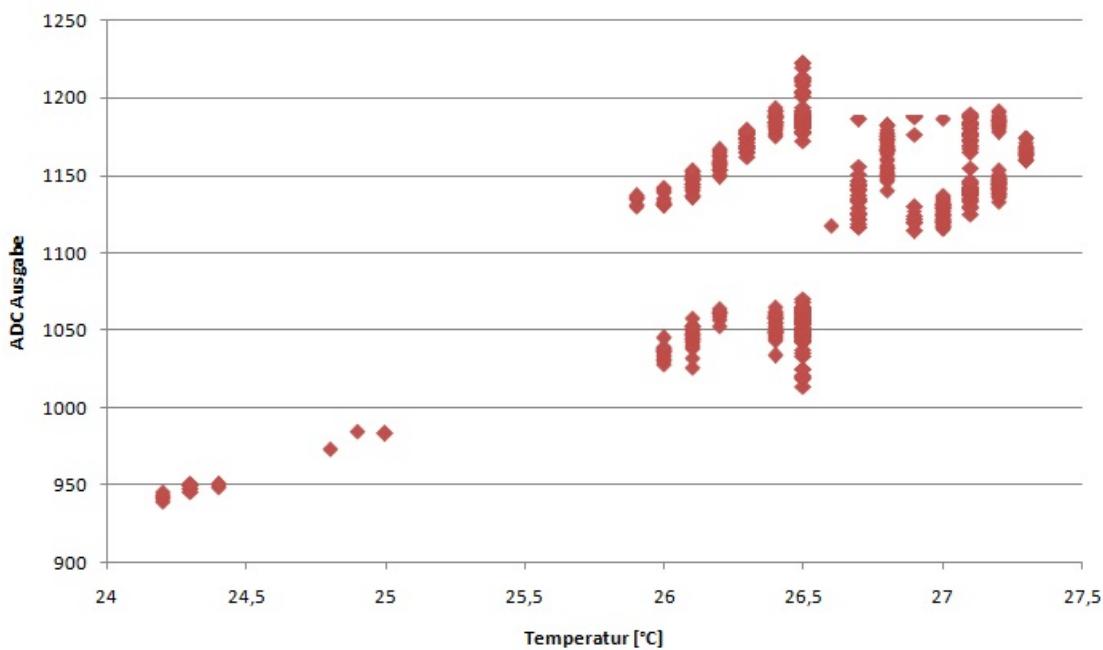


Abbildung 5.13.: Verlauf Temperatur gegen ADC Messwert. Es wurden Messwerte gewählt, bei welchen alle anderen Parameter in einem ähnlichen Bereich liegen.

### Netzmessung

Für die Netzmessung war vorgesehen, Arbeitskollegen welche im Stadtgebiet von Mönchengladbach wohnen, die zum Bau der Messtation nötigen Komponenten zu geben. Diese hätte nach dem Zusammenbau der Messtation, mithilfe der Anleitung, diese angemeldet und in ihren Fenstern aufge-

## 5. Implementierung

hangen um so ihre Messdaten an den Webservice zu übermitteln. Hierbei wäre das Ziel gewesen, acht Messstationen auszubringen, welche in unterschiedlichen räumlichen abständen voneinander gemessen hätten. Anhand der Messdaten eines Monats sollte ermittelt werden ob es eventuell wiederkehrende Quellen für NO<sub>2</sub> gibt, welche sich auf der Karte von Mönchengladbach zeigen.

Da die Kalibrierung allerdings aufgrund der NO-Abhängigkeit des Sensors nicht möglich war, wurde diese Netzmessung nicht durchgeführt. Ohne Kalibrierung haben die Messdaten der Messtationen keinerlei Aussagekraft.

### 5.1.4. Bauanleitung

Um die Schwierigkeit des Zusammenbaus der Messstation möglichst gering zu halten, wurde sich für einen Ansatz entschieden, welcher auf Steckplatinen setzt. Dies ermöglicht einen Zusammenbau ohne Lötkolben, was die Zugänglichkeit erhöhen soll. Die Bauanleitung selbst besteht aus einer Teileliste, einer bebilderten mehrschrittigen Anleitung wie die Teile auf der Steckplatine anzuordnen sind und einer Anleitung zum Aufspielen der Firmware. Zum Erstellen der Bilder für die einzelnen Schritte der Anleitung wurde die Software „Fritzing“ verwendet. Ein Beispiel für ein solches Bild ist in Abbildung 5.14 zusehen.

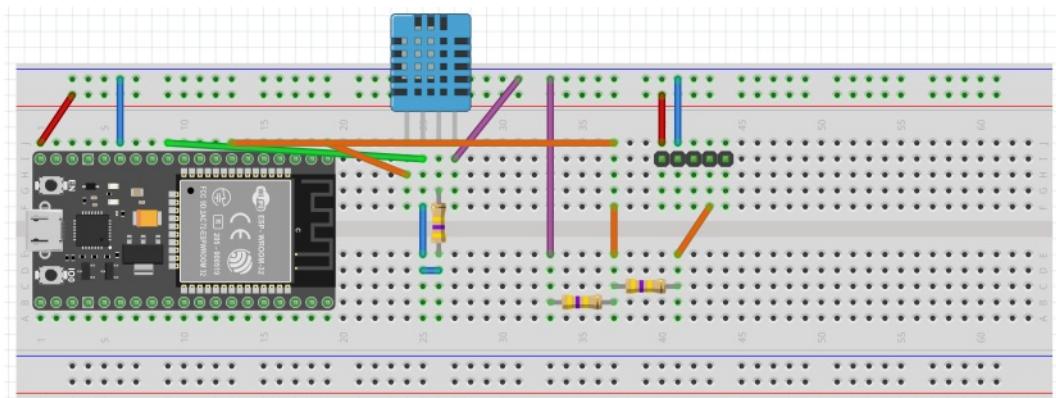


Abbildung 5.14.: Beispiel für ein Bild aus einem Zwischenschritt der Anleitung.

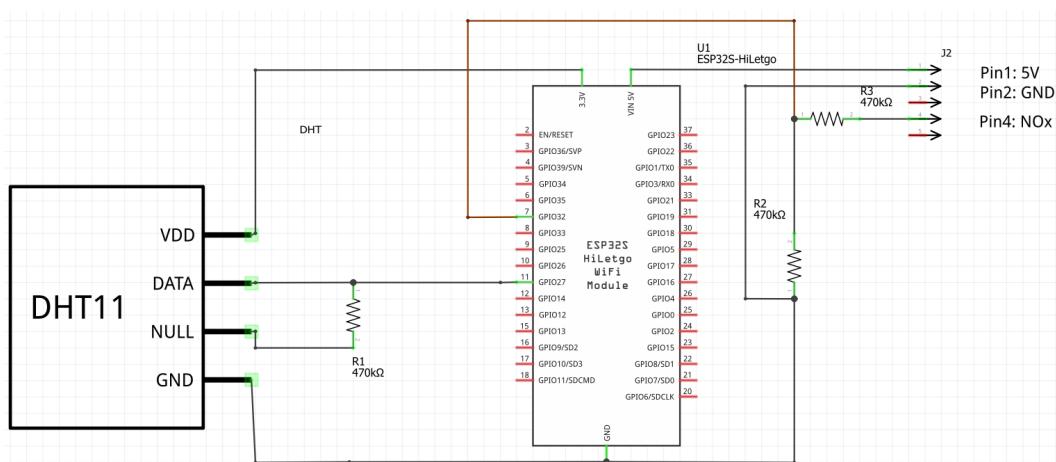


Abbildung 5.15.: Beispiel für den von Fritzing erstellten Schaltplan.

Fritzing erstellt aus dem Steckplatinenaufbau zusätzlich auch einen Schaltplan, welcher in Abbildung 5.15 dargestellt ist. Ein Foto der fertig aufgebauten Messstation ist in Abbildung 5.16 zusehen.

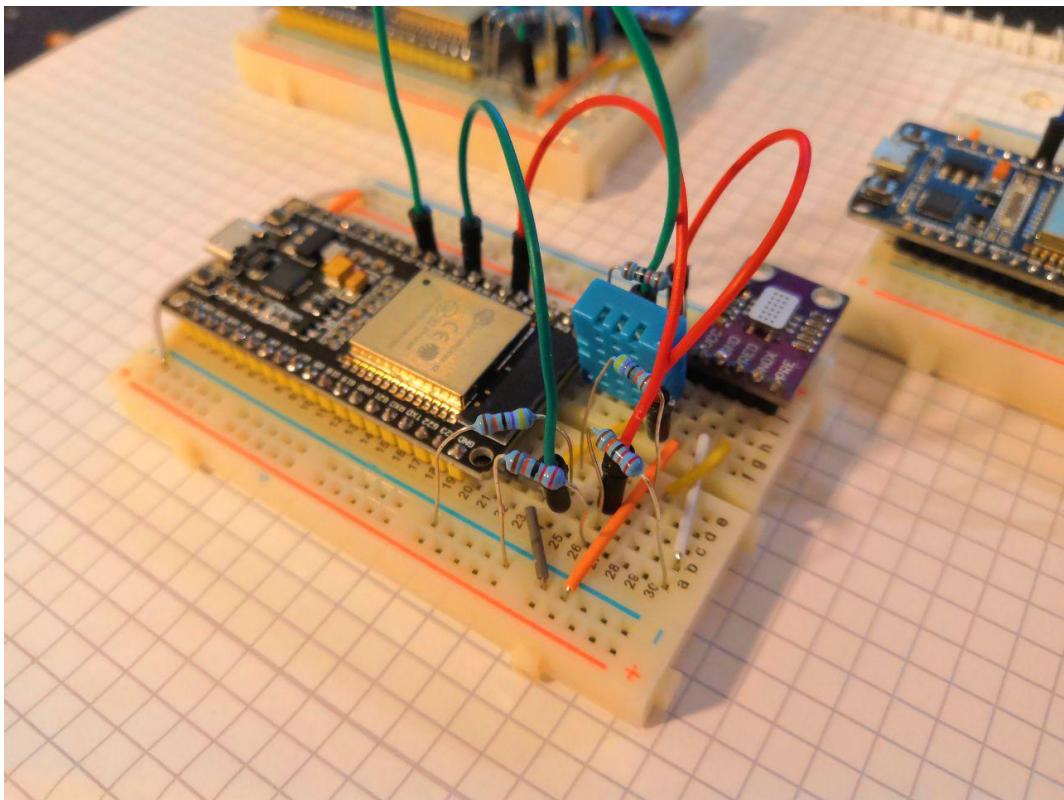


Abbildung 5.16.: Fertig aufgebaute Messtation ohne Gehäuse.

## 5.2. Webservice

Im folgenden Kapitel wird die Implementierung des Webservice behandelt. Es wird mit der Auswahl der verwendeten Softwarebasis und Bibliotheken begonnen und anschließend die Implementierung der API und der Webanwendung behandelt. Ein schematischer Aufbau der Komponenten, aus welchen sich der Webservice zusammensetzt, ist in der Abbildung 5.17 dargestellt.

### 5.2.1. Node.js

Als Basis für die API und die Webanwendung wurde Node.js gewählt.

Bei Node.js, im folgenden Node, handelt es sich um eine serverseitige, asynchrone, Event-basierte Laufzeitumgebung, welche speziell für die Entwicklung von skalierbaren Netzwerkanwendungen entworfen wurde. Es verfolgt hierbei ein Konzept, bei welchem eine Anwendung so lange in einem Ruhezustand verweilt, bis eine neue Anfrage eintrifft.

Zusammen mit Node wird der sogenannte Node Package Manager (npm) ausgeliefert. Bei dem npm handelt es sich um eine Software zum Verwalten und Installieren von Node Paketen, welche zusätzliche Funktionen, zum Beispiel Datenbankzugriffstools oder Verschlüsselungsfunktionen, zur Verfügung stellen. [NOD]

Node ist Open Source und unter der MIT-Lizenz veröffentlicht.

### Express.js

Bei Express.js, im folgenden Express, handelt es sich um ein Web-Framework für Node, welches das einfache erstellen von Webanwendungen, API's und Middleware ermöglicht. Hierbei können verschie-

## 5. Implementierung

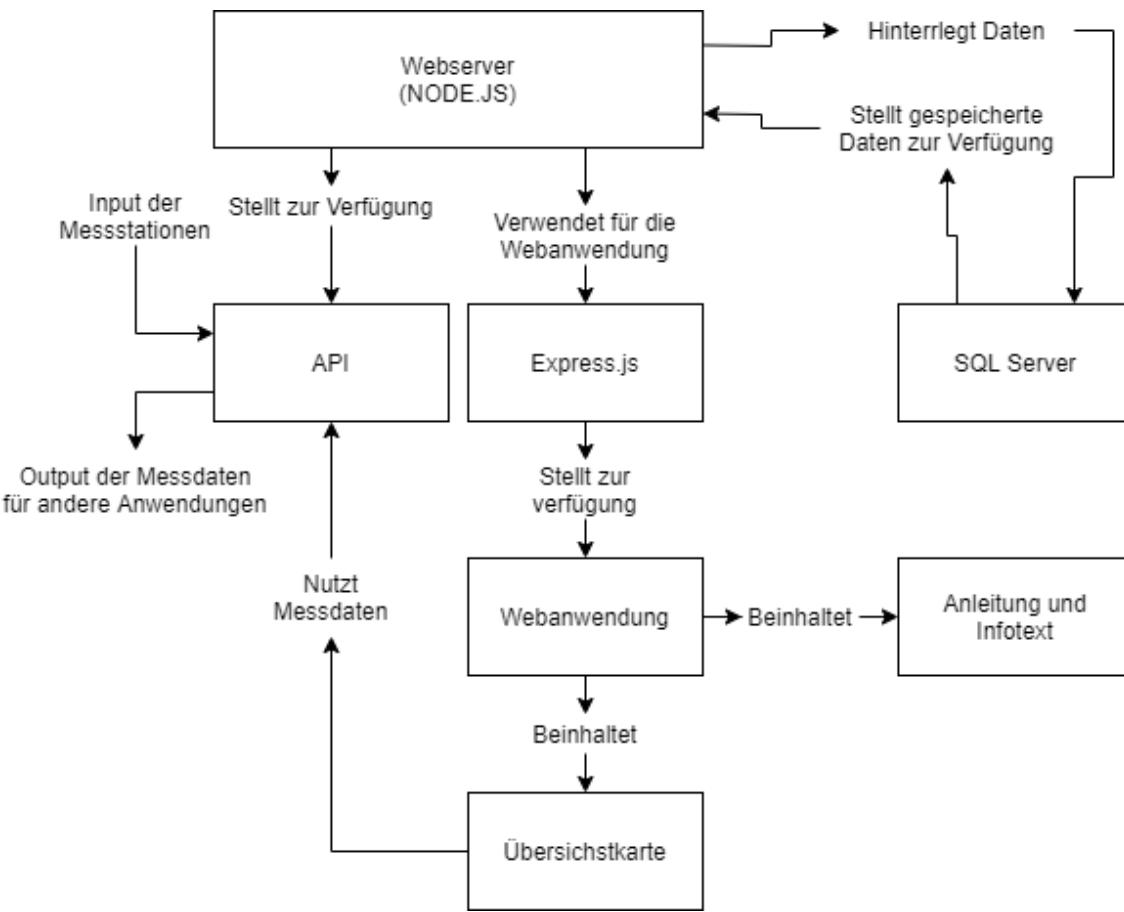


Abbildung 5.17.: Übersicht über die Architektur des Webservice.

dene sogenannte Routen definiert und Anfragen an diese abgefangen, ausgewertet und beantwortet werden. Auch ermöglicht es mithilfe des beinhalteten Pug.js, einer template engine, das Definieren von Seitenansichten(„Views“ genannt) welche zur Laufzeit in entsprechende HTML Dokumente übersetzt werden.

Express ist Open Source und unter der MIT-Lizenz veröffentlicht.

### Verwendete Node npm Pakete

In der Tabelle 5.4 sind die für den Webservice und dessen API verwendeten npm Pakete ohne ihre indirekten Abhängigkeiten aufgelistet.

#### 5.2.2. API

Die Funktionen der API des Webservices sind in der Tabelle 5.5 aufgeführt.

Die zum Speichern der Daten notwendigen Datenstrukturen sind in Abbildung 5.18 dargestellt. Jedem Nutzer(Tabelle „users“) ist eine aktive Messtation zugeordnet. Jede Messtation (Tabelle „stations“) hat einen Verweis auf den Nutzer, welchem sie gehört, und die Positionsdaten, welche ihren Standort angeben. Jede Messung (Tabelle „measurements“) ist einer Station zugeordnet und enthält neben dem übermittelten NO<sub>2</sub> Wert auch den gemessenen Rohwert, die Luftfeuchte, Temperatur und einen Zeitstempel. Der Aufbau der Datenbank ermöglicht es auch Messtationen zu hinterlegen, welche keinem Nutzer zugeordnet sind. Auf diese Weise können vom Webservice zum Beispiel die behördliche Messtationen angelegt und verwaltet werden. Auch eröffnet dies in Zukunft die Möglichkeit, dass

Tabelle 5.4.: Übersicht über alle verwendeten npm Pakete

Packetname	Funktion
pg	Ermöglicht es Zugriff auf eine PostgreSQL zu erhalten und Querys durchzuführen.
nodemailer	Stellt Funktionen zum versenden von E-Mails zur Verfügung.
crypto	Kryptografische Funktionen um Passwörter zu verschlüsseln.
csv-parse	Parser für CSV Dateien, erstellt aus einer CSV einen zweidimensionalen Array.
Express	Erstellung der API und Bereitstellung der Webanwendung.
cron	Ermöglicht das erstellen zeitgesteuerter Ereignisse.
cookie-parser	Verwaltet Cookies auf dem Rechner des Nutzers.
express-session	Verwaltet zusammen mit dem Packet cookie-parser Logins von Nutzern.
express-validator	Enthält Hilfsfunktionen zum überprüfen von Nutzereingaben.

ein Nutzer oder eine Institution mehrere Messstationen mit einem Account betreiben kann.

Die Tabelle „transactions“ enthält die Daten, welche für den Aufruf der API-Funktion „verifymail“ notwendig sind. Wird die Funktion „verifymail“ mit einem „transactioncode“ aufgerufen, welcher sich in der Tabelle „transactions“ befindet, wird der zugehörige „query“ ausgeführt und der Nutzer auf die in „responsepage“ hinterlegte Seite weitergeleitet.

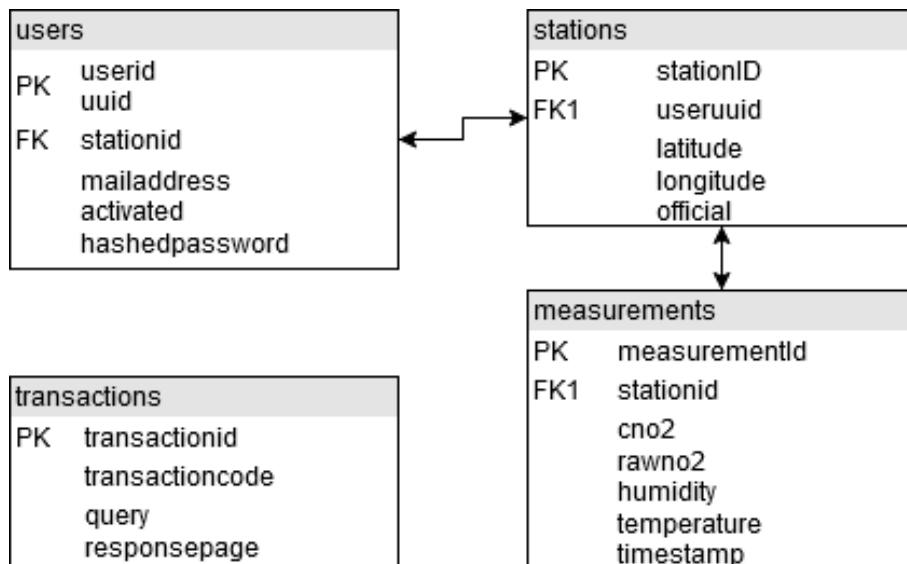


Abbildung 5.18.: Struktur der Datenbank zur Erfassung der Messdaten.

## 5. Implementierung

API Aufruf	Parameter und Beschreibung	
	Übermittelt Messwerte an den Webservice.	
/api/post	UUID	Die den Nutzer zugehörige UUID.
	cno2	NO <sub>2</sub> Konzentration in µg/m <sup>3</sup> .
	rawno2	Die Rohdaten des NO <sub>2</sub> Sensors.
	humidity	Die gemessene Luftfeuchtigkeit.
	temperature	Die gemessene Temperatur.
	Registriert einen neuen Nutzer/sendet Aktivierungslink.	
/api/register	mail	Die zu registrierende Mailadresse.
	password	Das durch den Nutzer gewählte Passwort.
	latitude	Die Latitude der Messstation des Nutzers.
	longitude	Die Longitude der Messstation des Nutzers.
	Löscht einen registrierten Nutzer.	
/api/unregister	mail	Die Nutzermailadresse.
	password	Das vom Nutzer gewählte Passwort.
/api/verifymail	Ermöglicht das Aktivieren des Accounts.	
	transactioncode	Versandter Transactionscode.
/api/requestpw	Sendet einen Link zum Passwortzurücksetzen.	
	mail	Die Mailadresse des Nutzers.
	Legt ein neues Passwort fest. (Login erforderlich)	
/api/changepassword	oldpassword	Das alte Passwort des Nutzers.
	newpassword	Das neue Passwort.
/api/setsensorpos	Verändert den Standort des Sensors. (Login erforderlich)	
	latitude	Die neue Latitude der Messstation.
	longitude	Die neue Longitude der Messstation.
/api/getmeasurements	Ausgabe einer JSON aller aktuellen Messwerte	
/api/gethistoric/:stationID	Gibt alle Messwerte einer Messtation zurück.	
	stationid	Die ID der Messstation.

Tabelle 5.5.: Übersicht aller API Aufrufen des Webservices

## Datenfluss der NO<sub>2</sub> Messtationen und API

Der Datenfluss des Webservice/API ist in Abbildung 5.19 dargestellt. Der Webservice soll in regelmäßigen Abständen die Messdaten der offiziellen Messstationen abfragen und diese in einer SQL-Datenbank hinterlegen. Die NO<sub>2</sub> Messstationen sollen ihre Messdaten über die API an den Webservice übermitteln, welcher anschließend auch diese in der SQL-Datenbank hinterlegt.

Für diese Datenübermittlung kommt eine TCP/IP Verbindung mit Handshake in Frage, welche die Implementierung eines eigenen Protokolls voraussetzt. Alternativ können die Messdaten zusammen mit einer dem Nutzer fest zugeordneten UUID (Unique User Identifier) als HTTP GET oder POST request übermittelt werden. Dies hat den Vorteil, dass eine einfache Übermittelung der Parameter ermöglicht wird und der Aufwand, welcher durch ein eigenes Protokoll entstehen würde, entfällt.

Über die API stehen die Messdaten anderen Anwendungen und der Webanwendung zur Verfügung. Um das Arbeiten mit den Messdaten möglichst einfach zu halten, sollen diese als JSON bereitgestellt werden.

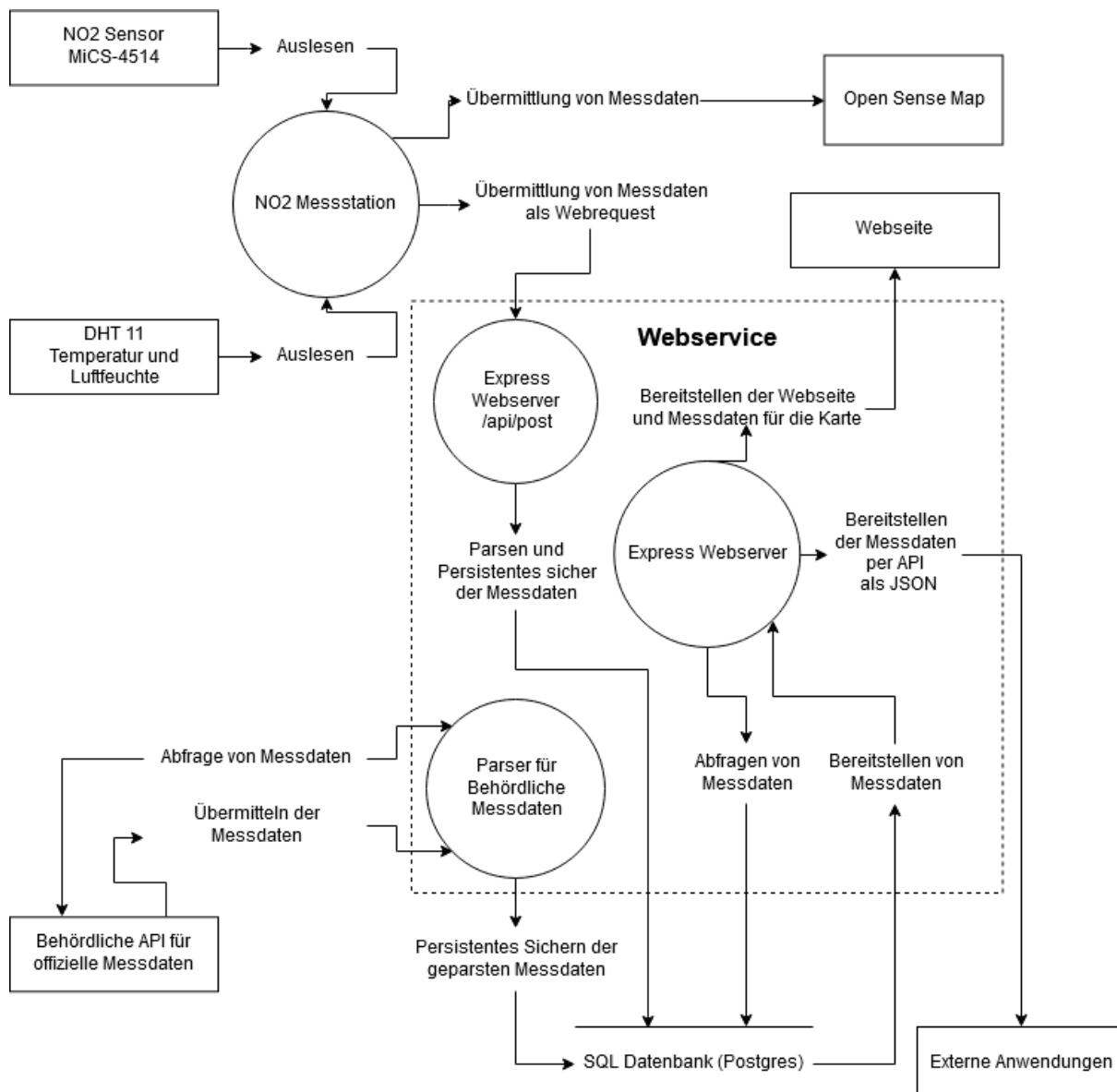


Abbildung 5.19.: Datenfluss der NO<sub>2</sub> Messtationen und des Webservice/API.

Die zu erwartende Datenmenge pro Messstation im Input beläuft sich bei einer Messung pro Minute

## 5. Implementierung

auf etwa 100 Byte. Bei der Datenausgabe an die Webanwendung ist ebenfalls von 100 Byte Pro Messstation auszugehen. Hierdurch liegt die erwartete Datenmenge, welche die API ausgehend von 1000 Messtationen, an die Übersichtskarte der Webanwendung ausgeben muss, bei ca 100 kB. Hierbei könnten zukünftig weitere API Abfragen vorgesehen werden um zum Beispiel vorsortierte und gemittelte Daten bereitzustellen.

### Behördliche Messdaten

Der Abruf von Messdaten der behördlichen Messstationen in Deutschland ist nicht einheitlich geregelt. Jedes Bundesland nutzt ein eigenes System, eigene Lizenz und ein anderes Datenformat. Niedersachsen zum Beispiel nutzt ein JSON Format und stellt hierbei zusätzlich auch weitere Metadaten, wie den Standort des Sensors, zur Verfügung. Sachsen stellt die Daten der letzten 24 Stunden lediglich auf einer Webseite der Messstation zur Verfügung, bietet aber keine Möglichkeit des Abrufs über eine API und gibt auch keine Lizenz für die ermittelten Daten an.

NRW hingegen stellt die Messdaten der letzten 24 h unter der „Datenlizenz Deutschland Namensnennung 2.0“ als CSV zur Verfügung. Diese Messdaten werden online als nicht abschließend validierter Stundenmittelwert zur Verfügung gestellt. In der CSV mit den Messdaten fehlen die exakten Positionen der Messstationen, allerdings sind diese im ebenfalls zur Verfügung gestellten Jahresbericht hinterlegt. Auch wird die Möglichkeit geboten, alle historischen Messwerte seit Messbeginn zu downloaden.[NRW]

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Abruf der Messdaten der Messtationen in NRW implementiert.

## 5.3. Webanwendung

Für die Umsetzung des Designs der Webanwendung wurde das W3.CSS eingesetzt, welches ohne Lizenz frei verfügbar und einsetzbar ist. Außerdem wurde eine der frei verfügbaren Vorlagen als Grundlage für die Umsetzung des Layouts eingesetzt[W3C]. Das Layout inklusive der Menüleiste wurde als PUG-Template umgesetzt und wird auf jeder Seite eingebunden.

### 5.3.1. Übersichtskarte

Für die Darstellung der Karte wird die Javascript Bibliothek Leaflet eingesetzt, welche das einfache Einfügen angepasster Karten ermöglicht. Hierbei besteht die Möglichkeit, verschiedenes Kartenmaterial einzubinden und Markierungen auf der Karte zu setzen. Auch stehen verschiedene Plugins zur Verfügung, welche zum Beispiel die Darstellung einer Heatmap als Kartenoverlay ermöglichen.

Leaflet selbst hat lediglich eine Größe von 38 KB und ist unter der „2-clause BSD“ Lizenz verfügbar [LEAa]. Als Quelle für das Kartenmaterial wird die OpenStreetMap verwendet, eine Open Data Karte der Welt, welche unter der „Creative-Commons“-Lizenz mit Namensnennung verfügbar ist.

Als grafische Darstellung der Messwerte wurde die eine Heatmap in Kombination mit Markern gewählt, wobei unterschiedlich gefärbte Marker für die Messtationen von Teilnehmern und Behörden verwendet werden. Ein Klick auf einen der Marker zeigt den aktuellen NO<sub>2</sub> Messwert der entsprechenden Station. Umgesetzt wurde die Heatmap mithilfe des Plugins Heatmap.js [HEA]. Als Maximalwert für die Färbung der Heatmap wird von 100 µg/m<sup>3</sup> ausgegangen. Dies liegt zwar unter dem behördlichen Stundenmittelwert von 200 µg/m<sup>3</sup>, verbessert allerdings die Visualisierung, da davon auszugehen ist, dass die meisten Stationen von Teilnehmern nicht direkt an Verkehrsknotenpunkten stehen und somit tendenziell niedrigere Werte messen werden.

Ein weiterer Plugin namens „leaflet-search“ [LEAb], welcher unter der MIT Lizenz veröffentlicht ist, wurde eingesetzt um die Suche nach Orten zu implementieren.

Ein Screenshot der Implementierung ist in Abbildung 5.20 dargestellt.

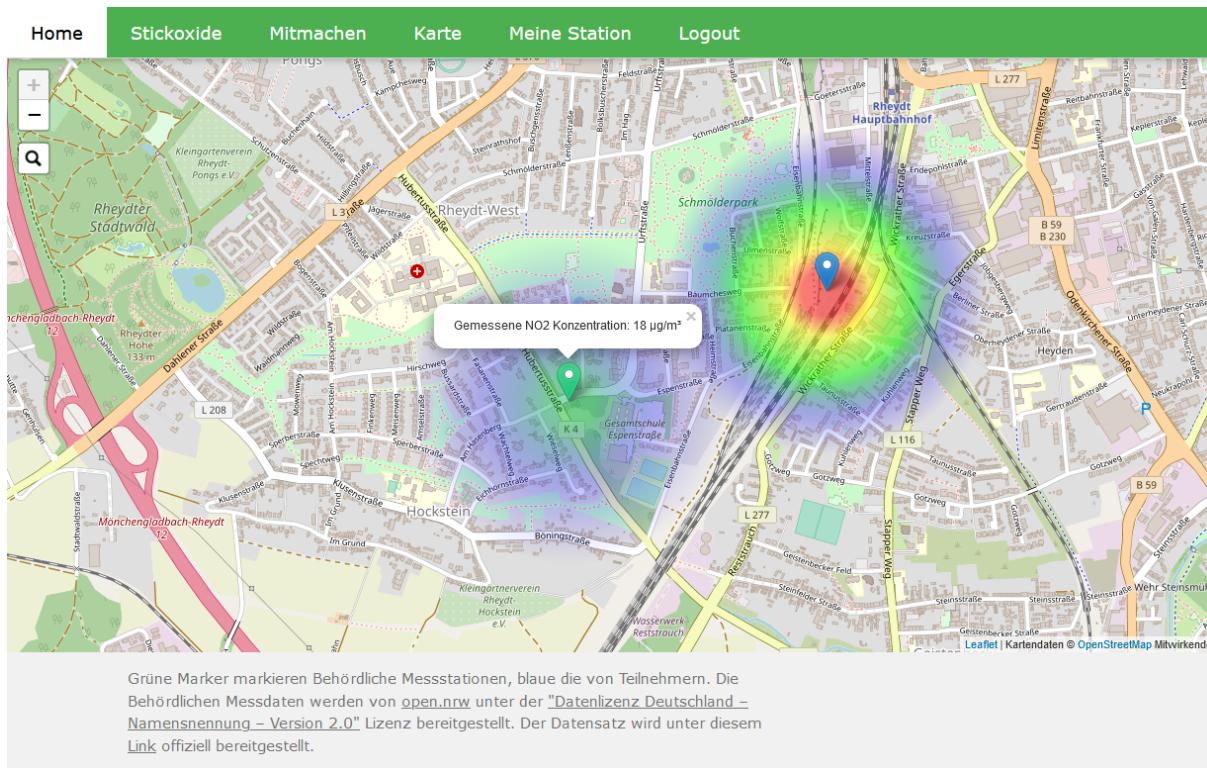


Abbildung 5.20.: Ansicht der fertigen Übersichtskarte. Behördliche Messtationen werden grün, die von Teilnehmern blau gefärbt. Ein Popup zeigt den aktuellen Messwert der behördlichen Messtation.

### 5.3.2. Seite: Registrierung

Um das Finden der eigenen Koordinaten für den Anmeldeprozess zu vereinfachen, wurde für die Registrierung ein Locationpicker eingesetzt. Hierbei können durch das Klicken auf eine Karte, welche mit Leaflet erstellt wurde, die Positionsdaten für die Messstation direkt ausgewählt werden.

### 5.3.3. Seite: Meine Messstation

Nach erfolgreichem Login steht einem die Übersichtsseite „Meine Messstation“ zur Verfügung, welche einem die Messwerte der eigenen Messstation visuell mit Hilfe von Graphen darstellt. Zum Erzeugen der Graphen wurde Chart.js eingesetzt, welches unter der MIT Lizenz veröffentlicht ist.[CHA] Auch wird eine Möglichkeit angeboten die Messwerte direkt zu downloaden.

Außerdem enthält diese Unterseite zusätzliche Funktionen, welche durch die API bereit gestellt werden. So ermöglicht es zum Beispiel ein Locationpicker die Position der Messstation auf der Karte zu verändern. Ein Screenshot der Seite ist in Abbildung 5.21 zu sehen.

## 5. Implementierung

Home Stickoxide Mitmachen Karte Meine Station Logout

### Meine Station:

Hier findest du alle Informationen zu deiner Messstation! Die UUID welche du benötigst damit deine Messstation ihre Daten korrekt übermittel kann, lautet wie folgt:

UUID: Mb1xUyMgWh1ogMxPVpzLMQICXwlq5HyD

Im folgenden siehst du den Verlauf der durch deine Messstation erfassten Messdaten:

NO<sub>2</sub> Konzentrationsverlauf

Konzentration NO<sub>2</sub>

Bei den Messwerten der Messstation handelt es sich um Qualitative Messwerte, welche einen sehr großen Fehler aufweisen können! Der Einfluss der Luftfeuchtigkeit und Temperatur wird zwar zum Teil kompensiert, allerdings bleibt dennoch eine große Unsicherheit!

Die ID deiner Messstation ist die 46, diese wird gegebenenfalls benötigt um dir im falle von Problemen zu helfen.

### Sensorposition ändern

Latitude  
51.319

Longitude  
6.5123

Die Sensorposition kann entweder mit einem Rechtsklick auf die Karte oder durch langes drücken auf Touchscreens festgelegt werden!

Abbildung 5.21.: Ansicht der „Meine Messstation“ Seite.

## 5.4. Übersicht Lizenzen

Für diese Arbeit wurde nur frei verfügbare Software und Datenquellen eingesetzt. Eine Übersicht über die Lizenzen der eingesetzten Bibliotheken und Software findet sich in der Tabelle A.2 im Angang. Es wurde versucht wenn möglich Alternativen zu wählen, welche unter der MIT-Lizenz veröffentlicht wurden.

## 5.5. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die konkrete Umsetzung der Messstation und des Webservice mit Webanwendung behandelt. Als Methode zum konfigurieren der Messstation wurde ein Webinterface gewählt, da dieses die Konfiguration ohne zusätzliche Software ermöglicht. Zur Übertragung der Messdaten an den Webservice wurde eine Methode gewählt, bei welcher die Messdaten mithilfe der HTTP POST Parameter übertragen werden. Bei den Versuchen den Sensor zu kalibrieren, zeigte sich, dass der für die Messstation gewählte Metalloxidsensor aufgrund seiner Querempfindlichkeit gegenüber Stickstoffmonoxid nicht ohne weitere Komponenten eingesetzt werden kann.

Der Webservice, welcher die Messdaten sammelt und die Webanwendung bereitstellt, wurde mithilfe von NODE und dem Express Framework umgesetzt. Er bietet eine zum sammeln der Messdaten und dem registrieren von Messstationen notwendige API. Zusätzlich werden in regelmäßigen Abständen die Messdaten von offiziellen Messstationen abgefragt und zusammen mit den durch die anderen Messstationen ermittelten Daten in einer PostgreSQL Datenbank gespeichert.

Für die Webanwendung wurde einen Infotext über Stickstoffdioxid und eine Anleitung zum Nachbau der Messstation erstellt. Es wurde eine Übersichtskarte programmiert, welche die Messdaten der Messstationen als Heatmap mit Markern darstellt. Außerdem beinhaltet die Webanwendung ein Interface, welches das Registrieren mithilfe der API des Webservice ermöglicht.

# 6. Schlussfolgerungen

## 6.1. Zusammenfassung

In dieser Bachelorarbeit wurde eine Messtation für Stickstoffdioxid in Kombination mit einem Webservice zum Sammeln und erfassen der gemessenen Daten erstellt. Hierbei wurden die folgenden Fragen behandelt:

### **FF 1: Wie muss eine Citizen Science Messstation für Stickoxide aufgebaut sein?**

Zum beantworten dieser Frage wurden die zugehörigen Teilfragen beantwortet und eine Messstation zum Messen von Stickstoffdioxid entworfen.

#### **FF 1.1: Welche Anforderungen müssen Hardwarekomponenten und Sensoren für eine solche Messstation erfüllen?**

Es wurden die Anforderungen zum Bau der Messtation festgelegt, wobei Preis und freie Verfügbarkeit der Komponenten als wichtigste Kriterien gewählt wurden. Als Basis für die Messstation wurde ein ESP32 ausgewählt, da er die Meisten der notwendigen Funktionen von sich aus mitbringt.

#### **FF 1.2 Welcher Sensortyp ist für die Messung von NO<sub>2</sub> am besten geeignet?**

Als Sensor für NO<sub>2</sub> wurden neben dem Referenzmessverfahren der Chemilumineszenz auch Elektrochemische und Metalloxidsensoren vorgestellt. Entschieden wurde sich für einen Metalloxidsensor vom Typ MiCS-4514, da er gut verfügbar und günstig zu erwerben ist.

#### **FF 1.3 Wie kann eine Kalibrierung durchgeführt werden, welche behördlichen Anforderungen entspricht?**

Bei der Beantwortung dieser Frage zeigte sich, dass eine Kalibrierung des Sensors ohne weitere Hardware aufgrund einer Stickstoffmonoxid Querempfindlichkeit nicht möglich ist. Die aus dieser Frage folgenden Teilfragen wurden wie folgt beantwortet:

##### **FF 1.3.1 Welche Messgrößen beeinflussen das Messergebnis des gewählten Sensors?**

Es zeigte sich, dass der Sensorwert, neben der NO<sub>2</sub> Konzentration, auch durch die Luftfeuchtigkeit, Temperatur und die NO Konzentration beeinflusst wird. Dies führte zu einem Problem, da die NO<sub>2</sub> und NO Konzentration den Sensorwert gegenläufig beeinflusst. Da beide Stoffe gleichzeitig in verschiedenen Verhältnissen auftreten und sich nicht ohne weiteres einzeln messen lassen, steht dies einer Kalibrierung ohne weitere Komponenten im Wege.

##### **FF 1.3.2 Wie müssen Versuche zum ermitteln einer Kalibrierfunktion aussehen?**

Es wurden die folgenden Versuche durchgeführt, um Messdaten zur Ermittlung einer Kalibrierfunktion zu sammeln

- Mehrere Sensoren welche zu verschiedenen Zeitpunkten gekauft wurden (um Chargenunterschiede zu berücksichtigen), sind zusammen bekannten Konzentrationen von NO<sub>2</sub>, bei unter ansonsten identischen Bedingungen, ausgesetzt worden. Hierbei zeigte sich, dass abgesehen von einer sensorabhängigen Verschiebung, die Sensoren vergleichbare Ergebnisse liefern.
- Um den Temperaturverlauf zu untersuchen, wurden mehrere Sensoren in einer verschlossenen Styroporbox zusammen mit Kühlakkus platziert, welche langsam auftauen und somit einen Temperaturgradienten erzeugen. Hierbei zeigte sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Sensorwert.

- Eine Vergleichsmessung unter realen Bedingungen mit einem eignungsgeprüften Analysator wurde durchgeführt, wobei sich ein störender und nicht ohne weiteres Equipment kompensierbarer Einfluss von NO (Stickstoffmonoxid) zeigte.
- Es wurde der Einfluss des Gehäuses auf den Messwert untersucht und festgestellt, dass ein Lüfter nicht direkt auf den Sensor gerichtet sein sollte, da dies zu einer Änderung des Messwertes führte. Dies ist vermutlich auf eine Änderung der Temperatur durch Abkühlung zurückzuführen

#### **FF 1.3.3 Wie muss ein Versuche zum ermitteln der Performance unter realen Bedingungen aussehen?**

Es sollte eine Netzmessung innerhalb von Mönchengladbach durchgeführt werden, welche allerdings aufgrund der fehlgeschlagenen Kalibrierung nicht durchgeführt wurde.

#### **FF 1.3.4 Wie sind die behördlichen Anforderungen an die Datenqualität?**

Die behördliche Anforderung an die Datenqualität wurde mithilfe der 39. BlmSchV festgelegt. Laut ihr darf der Messfehler maximal 25% des Messwertes betragen, damit die Daten als orientierende Messung eine Relevanz für Behörden haben.

#### **FF 1.4 Welche Erweiterungen/Modifikationen der Messtation sind möglich?**

Mögliche Modifikationen der Messtation umfassen neben weiteren Sensoren auch die Möglichkeit, sie mobil einzusetzen. Hierfür kommt zum Beispiel ein ESP32 Modul mit zusätzlichen SIM900 Modul als UMTS Modem in Frage. Auch könnte durch das hinzufügen einer SD-Karte und Real Time Clock das lokale persistente speichern der Messdaten ermöglicht werden.

#### **FF 1.5 Wie können die Messwerte an andere Open Source Projekte übermittelt werden?**

Um dieser Frage Rechnung zu tragen wurde die Funktion implementiert, die Messdaten an das OpenSenseMap Projekt zu übermitteln.

#### **FF 2 Welche Anforderungen muss ein Webservice zum sammeln von Messdaten bieten?**

Die aus dieser Frage ermittelten Teilfragen wurden wie folgt beantwortet:

##### **FF 2.1 Wie können die Messdaten von der Messtation an den Webservice übermittelt werden?**

Da die gesamte Anwendung auf einem Webserver läuft, wurde festgelegt dass die Messdaten per Webrequest übertragen werden. Dies hat den Vorteil, dass hierfür kein eigenes Protokoll erstellt werden muss.

##### **FF 2.2 Wie können die übermittelten Messdaten persistent gesichert werden?**

Um die Messdaten persistent zu Speichern wird ein PostgreSQL Server eingesetzt, welcher die übermittelten Messwerte in einer festgelegten Datenstruktur in der Datenbank ablegt.

##### **FF 2.3 Wie können die Messdaten Anwendungen zur Verfügung gestellt werden?**

Um die Messdaten anderen Anwendungen zur Verfügung zu stellen wurde eine API definiert, welche das abfragen der aktuelle Messwerte aller und der historischen Messdaten einzelner Stationen ermöglicht.

##### **FF 2.4 Inwiefern lassen sich offizielle behördliche Messdaten einbinden?**

Die Messdaten der offiziellen Messtationen in NRW werden abgefragt, um die selbstgebauten Messtationen zu ergänzen. Die Messdaten anderer Bundesländer wurden hierbei nicht berücksichtigt, da nicht jedes Bundesland die Messdaten veröffentlicht und keine einheitliche API zum Messdatenabruft existiert. Um die übermittelten und abgefragten Messdaten persistent zu sichern, werden sie in einer PostgreSQL Datenbank abgelegt.

#### **FF 3 Welche Funktionalitäten muss eine Webanwendung für den Nutzer bieten?**

Da auch diese Frage in Teilfragen zerlegt wurde, wird auf diese im Folgenden eingegangen:

## 6. Schlussfolgerungen

### **FF 3.1 Wie können einem Anwender die Informationen bereitgestellt werden, welche er benötigt um die Gefahren durch Luftschadstoffe nachvollziehen zu können?**

Hier wurde ein Infotext in der Webanwendung als Bereitstellungsform gewählt, welcher über die Gefahren und Ursachen von Luftschadstoffen aufklärt.

### **FF 3.2 Welche von anderen Projekten genutzte Darstellungsformen für Messdaten können für dieses Projekte genutzt werden?**

Es wurden verschiedene Darstellungsformen für Messdaten verglichen und eine ausgewählt. Die in Kombination mit dem Webservice entwickelte Webanwendung stellt die Messdaten grafisch auf einer Karte da. Hierbei wurde eine Heatmap in Kombination mit Markern als Visualisierung gewählt, da sie einen schnellen Überblick über die Standorte der Messstationen und deren gemessene Daten ermöglicht. Zusätzlich hierzu wurde im Webservice eine Anleitung zum Nachbau der Messstation und einen Infotext, welcher die Problematik des Luftschadstoffes Stickstoffdioxid erklärt, erstellt.

### **FF 3.3 Wie kann eine Anleitung gestaltet werden, welche es einem Anwender ermöglicht, an dem Projekt teilzunehmen?**

Die Wahl fiel hier auf einen Anleitung mit Bildern, welche den Zusammenbau der Messstation Schritt für Schritt erklären. Die Bilder wurden hierbei mit Fritzing erstellt und stellen den schrittweise Zusammenbau der Messtation grafisch da.

## 6.2. Diskussion

Während die Vorversuche mit den eingesetzten Sensoren des Types MiCS-4514 gute Ergebnisse lieferten, zeigte sich bei dem Versuch eine Kalibrierfunktion zu ermitteln, dass eine vorhandene NO Querempfindlichkeit eine Kalibrierung verhindert. Ohne eine erfolgreiche Kalibrierung war eine Netzmessung nicht möglich, weshalb hier mit höchster Priorität angesetzt werden muss.

Möglichkeiten hier Abhilfe zu schaffen liegen in einem zusätzlichen Sensor, welcher selektiv nur NO misst, oder in einer vorherigen kompletten Umsetzung des NO in NO<sub>2</sub> mithilfe von zum Beispiel eines Ozongenerators. Eine weitere Möglichkeit zur Lösung dieses Problems könnte der Einsatz eines anderen Sensortyps sein, wobei dies den Preis der Messtation signifikant erhöhen kann. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig, um eine funktionsfähige und kostengünstige Methode zu identifizieren. Ist eine solche identifiziert, können im Anschluss weitere Versuche der Kalibrierung unternommen werden. Hierbei ist das Ziel die 25 % Abweichung, welche durch die 39.BImSchV vorgegeben werden zu erreichen, damit die Messdaten sinnvoll auswertbar sind.

Aufgrund der Fragen und Korrespondenz nach dem von mir beim 36C3 gehaltenen Vortrages mit dem Titel Äufbau eines Sensornetzes für die Messung von Stickstoffdioxid und des Vortrages der OpenSenseMap Macher, zeigten sich zwei dinge:

- Viele Teilnehmer anderer Projekte wie Luftdaten.info oder der OpenSenseMap würden eine Messtation für alles bevorzugen.
- Andere Projekte scheinen weiterhin wenig Augenmerk auf die Datenqualität zu legen.

Hier sollte in Zukunft gemäß dem Motto "No data is better than poor data," verstärktes Augenmerk auf die Qualität und Messfehler der Messdaten gelegt werden. Auch sollte in Zukunft eine Erweiterung der Messtation um weitere Messgrößen fokussiert werden.

Sollte es in Zukunft gelingen eine solchen günstigen Sensor erfolgreich zu kalibrieren und die Umgebungseinflüsse durch günstige Maßnahmen zu kompensieren, bieten diese theoretisch neben dem Citizen Science Ansatz auch für Umweltämter die Möglichkeit, ihr Messnetz feinmaschiger zu gestalten.

Bei der Webanwendung wurden verschiedene Darstellungsformen für Messdaten vorgestellt und ei-

ne Heatmap mit Markern als Darstellungsform für die Implementierung gewählt. Diese hat in ihrer aktuellen Form das Problem, dass sie aufgrund des durch die Heatmap Bibliothek generierten Farbverlaufes das Gefühl vermittelt, dass die Konzentration mit abnehmender Distanz zum Messort abnimmt, was nicht zwingend der Fall ist. Die erstellte Anleitung und der Infotext erfüllen zwar ihren Zweck, allerdings wären hier Möglichkeiten sinnvoll, welche interessierten die Option gibt an weitere, tiefer in die Materie gehende Informationen zu kommen.

Die beim Webservice für die Übertragung der Messdaten gewählte Methode, die Messwerte als POST-Parameter zu übertragen, erzeugt einen größeren Overhead durch das Parsen. Diese Methode ist zwar einfach in der Umsetzung, könnte mit ansteigender Anzahl an Messstationen in Zukunft zu Problemen führen.

### 6.3. Ausblick

Um kostengünstige Sensoren wie den untersuchten Metalloxidsensor nützlich einsetzen zu können sind weitere Untersuchungen notwendig. Hierzu sollten Versuche mit Ozongeneratoren zum umsetzen von NO zu NO<sub>2</sub> und anderen Sensoren unter Bedingungen durchgeführt werden, wie sie in der DIN EN 14793:2017 beschrieben sind. Die Folgenden Kalibrierversuche sollten hierbei einen größeren Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsbereich abdecken, wobei der Einsatz einer Klimakammer, zur Simulation von Umwelteinflüssen, eine große Hilfe wäre. Dies ist wichtig um die Daten verschiedener Sensoren vergleichbar zu machen. Bei der Messstation sollte die Unterstützung für weitere Sensoren vorab einprogrammiert werden, um Nutzern mit wenig Aufwand eine breitere Auswahl an Messdaten zu bieten.

Auch das anlegen einer Datenbank um die Messdaten aller offiziellen Messstationen in Deutschland zentral zusammenzuführen und einheitlich nutzbar zu machen sollte angestrebt werden. Hier wäre zwar eine Lösung durch offizielle Stelle wünschenswert, allerdings ist es unwahrscheinlich dass eine solche zentrale Datenbank ohne politischen Druck umgesetzt wird, da die Umweltämter der Bundesländer unabhängig voneinander agieren.

Der Webservice sollte auf seine Performance untersucht werden, um frühzeitig sicherstellen zu können, dass er auch große Datenaufkommen effizient verwalten kann ohne unter der Last zusammenzubrechen.

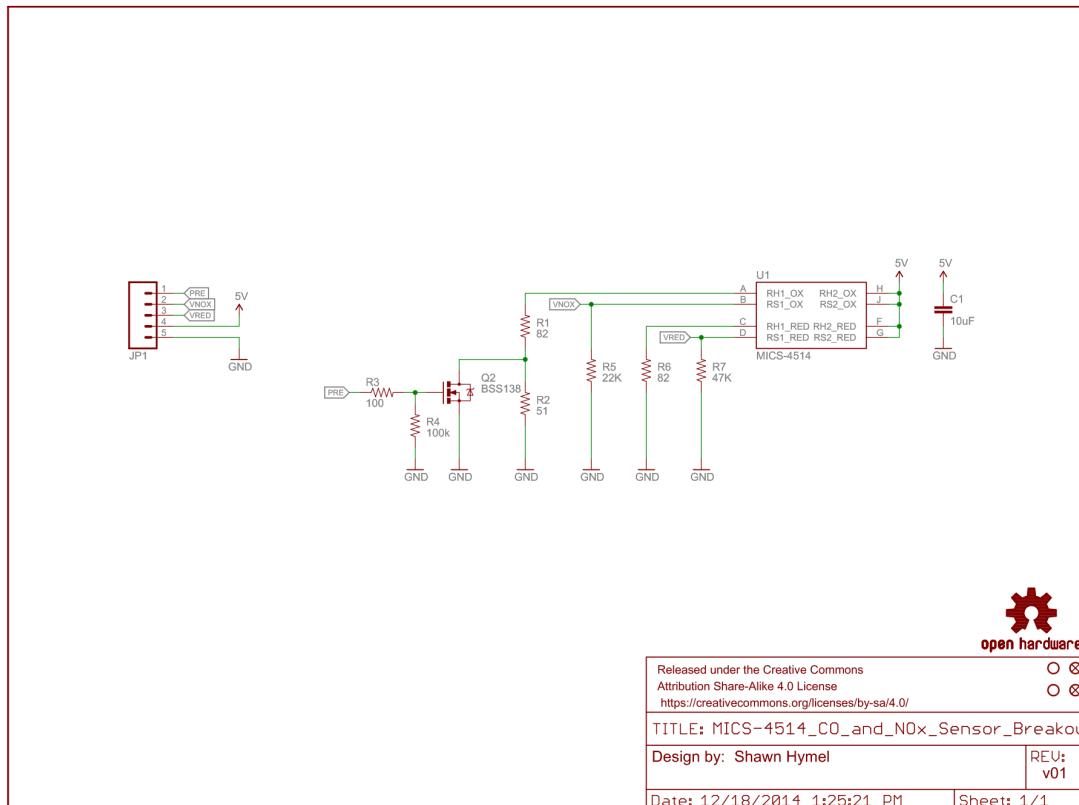
Die Übersichtskarte zur Darstellung der Messdaten sollte um weitere Funktionen, wie eine Infoseite einzelner Messstationen die den Verlauf der NO<sub>2</sub> Konzentration, Temperatur und Luftfeuchtigkeit anzeigt, erweitert werden. Auch sollte Möglichkeiten implementiert werden, den Standort der Messstation durch eine Reihe an Auswahlmöglichkeiten detaillierter festzulegen, da die Positionierung der Messstation einen großen Einfluss auf die Messergebnisse hat.

Die Anleitung und der Infotext sollten auf Usability untersucht und optimiert werden. Hierfür sollten Tests mit Laien durchgeführt werden, mit deren Ergebnissen Optimierungen an den beiden Texten durchgeführt werden können. Hier wäre auch eine Befragung von Teilnehmern durchzuführen, welche über ihre Erfahrungen beim Zusammenbau berichten könnten.

Um den Bekanntheitsgrad des Projektes zu erhöhen, sollten weitere Veranstaltungen wie der 36C3 besucht und das Projekt vorgestellt werden. Auch könnte der Kontakt zu anderen Projekten, wie Luftdaten.info, genutzt werden um den Bekanntheitsgrad zu erhöhen.

# A. Anhang

## A.1. Weitere Materialien



12/22/2014 12:26:39 PM C:\Users\shawn.hymel\Documents\GitHub\MiCS-4514\_CO\_and\_NOx\_Sensor\_Breakout\Hardware\MiCS-4514\_CO\_and\_NOx\_Sensor\_Breakout

Abbildung A.1.: Schaltplan für das MiCS-4514 Breakout Board [BRE]

Tabelle A.1.: Technische Spezifikationen des RED Sensors des MiCS-4514. R<sub>0</sub> ist hierbei der Sensorwiderstand an der Luft ohne Beheizung. [MiC]

	Symbol	Min	Max	Einheit
Sensorwiderstand an Luft	R <sub>0</sub>	100	1500	KΩ
Typischer CO Messbereich	FS	1	1000	ppm
Sensitivity factor	S <sub>R</sub>	1.2	-	-

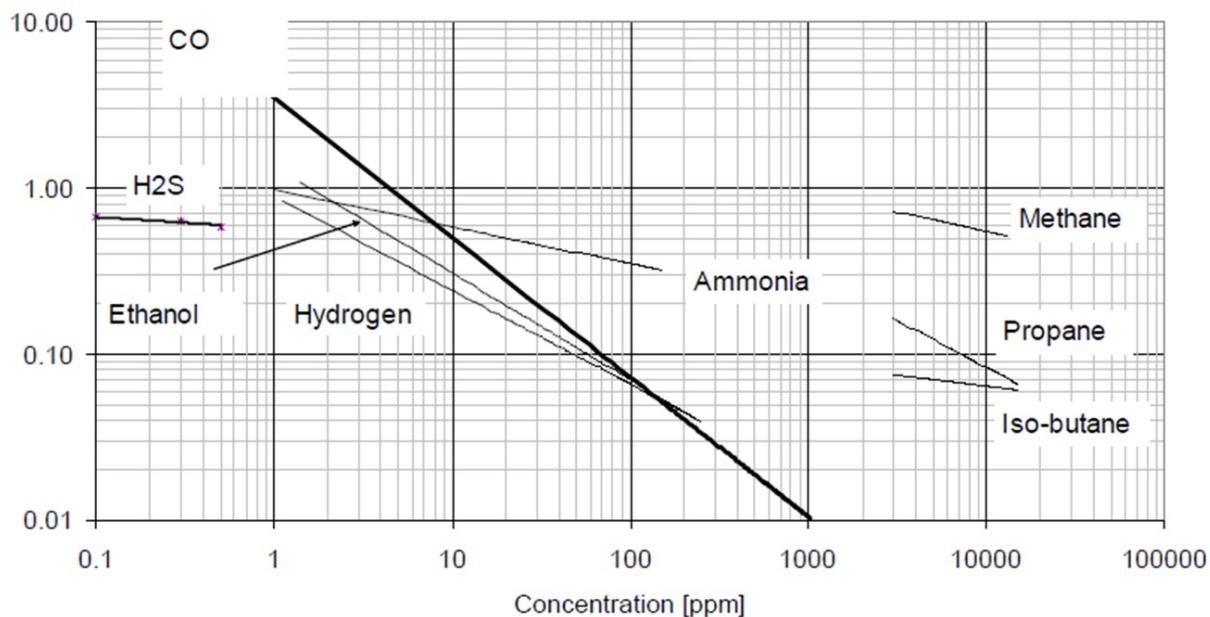


Abbildung A.2.: Ansprechverhalten des MiCS-4514 RED Sensors bei konstant eingeschalteter Beheizung, 25 °C Umgebungstemperatur, 50 % relative Luftfeuchte [MiC]

Tabelle A.2.: Übersicht aller verwendeten Bibliotheken/Software und ihrer zugehörigen Lizenzen.

Bibliothek	Lizenz
Arduino	LGPL Lizenz
dht	MIT Lizenz
NODE.js	MIT Lizenz
Express	MIT Lizenz
pg	MIT Lizenz
nodemailer	MIT Lizenz
csv-parse	MIT Lizenz
cron	MIT Lizenz
cookie-parser	MIT Lizenz
express-session	MIT Lizenz
express-validator	MIT Lizenz
chart.js	MIT Lizenz
leaflet.js	BSD-Lizenz
heatmap.js	MIT Lizenz
openstreetmap	Open Database Licence (ODbL) 1.0
Messdaten NRW	Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0



# Literaturverzeichnis

- [ACKA<sup>+</sup>11] Zorana Andersen, Luise C Kristiansen, Klaus Andersen, Tom S Olsen, Martin Hvidberg, Steen Jensen, Matthias Ketzel, Steffen Loft, Mette SØrensen, Anne TjØnneland, Kim Overvad, and Ole Raaschou-Nielsen. Stroke and long-term exposure to outdoor air pollution from nitrogen dioxide a cohort study. *Stroke; a journal of cerebral circulation*, 43:320–5, 11 2011.
- [AEG] airqualityegg.com. <https://airqualityegg.com>. Abgerufen: 02.08.2019.
- [AIR] air-q. air-q.com. Abgerufen: 02.08.2019.
- [ALP] How electrochemical gas sensors work.  
[http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2013/07/AAN\\_104.pdf](http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2013/07/AAN_104.pdf). Abgerufen: 12.08.2019.
- [AQM] Aqmesh. <https://www.aqmesh.com/>. Abgerufen: 27.08.2019.
- [ARD] Arduino entwicklungsumgebung. <https://www.w3schools.com/w3css/default.asp>.
- [AS118] Quantifizierung von umweltbedingten krankheitslasten aufgrund der stickstoffdioxid-exposition in deutschland.  
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/quantifizierung-von-umweltbedingten>, 2018. Abgerufen: 04.08.2019.
- [BJG] Gesetz zum schutz vor schädlichen umwelteinwirkungen durch luftverunreinigungen, geräusche, erschütterungen und ähnliche vorgänge.  
<http://www.gesetze-im-internet.de/bimschg/index.html>. Abgerufen: 03.08.2019.
- [BJV10] Gesetze im internet: Neununddreißigste verordnung zur durchführung des bundes-immissionsschutzgesetzes. [https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv\\_39](https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_39), 2010. Abgerufen: 03.08.2019.
- [BRE] Mics breakout board.  
[https://github.com/ShawnHymel/MICS-4514\\_CO\\_and\\_NOx\\_Sensor\\_Breakout](https://github.com/ShawnHymel/MICS-4514_CO_and_NOx_Sensor_Breakout). Abgerufen: 03.08.2019.
- [CEM10] Ulrich Müller Charles E. Mortimer. *Chemie: Das Basiswissen der Chemie*. Thieme, 2010.
- [CHA] Chart.js. <https://www.chartjs.org/>.
- [CRDS<sup>+</sup>16] Nuria Castell, Franck R Dauge, Philipp Schneider, Matthias Vogt, Uri Lerner, Barak Fishbain, David Broday, and Alena Bartonova. Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environment International*, 99, 12 2016.
- [ESP] Esp32 data sheet.  
[https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf). Abgerufen: 02.08.2019.
- [EU018] Richtlinie 2008/50/eg des europäischen parlaments und des rates vom 21. mai 2008 über luftqualität und saubere luft für europa.  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0050&qid=1419250736800&from=DE>, 2018. Abgerufen: 04.08.2019.
- [FFMCAB10] George F Fine, Leon M Cavanagh, Ayo Afonja, and Russell Binions. Metal oxide semi-conductor gas sensors in environmental monitoring. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 10:5469–502, 06 2010.
- [HAC] Hackair. [www.hackair.eu](http://www.hackair.eu). Abgerufen: 02.08.2019.
- [HEA] Heatmap.js. <https://www.patrick-wied.at/static/heatmapjs/de/>.
- [LEAa] Leaflet, an open-source javascript library for mobile-friendly interactive maps.  
<https://leafletjs.com/>. Abgerufen: 13.09.2019.
- [LEAb] Leaflet-search. <https://labs.easyblog.it/maps/leaflet-search/>. Abgerufen: 09.11.2019.
- [LUF] Luftdaten.info. [Luftdaten.info](http://Luftdaten.info). Abgerufen: 30.06.2019.
- [MiC] Mics data sheet.  
[https://www.sgxsensorstech.com/content/uploads/2014/08/0278\\_Datasheet-MiCS-4514.pdf](https://www.sgxsensorstech.com/content/uploads/2014/08/0278_Datasheet-MiCS-4514.pdf).

Abgerufen: 02.08.2019.

- [NOD] Node.js. <https://nodejs.org/de/>. Abgerufen: 13.09.2019.
- [NRW] Messdaten des kontinuierlichen luftqualitätsüberwachungsmessnetzes.  
<https://open.nrw/dataset/2b80d500-3c5b-42bc-9a4b-94043e11b653bkg>. Abgerufen: 01.09.2019.
- [PAHG<sup>+</sup>17] Phil Peterson, Amrita Aujla, Kirsty H. Grant, Alex G. Brundle, Martin R. Thompson, Joshua Vande Hey, and Roland J. Leigh. Practical use of metal oxide semiconductor gas sensors for measuring nitrogen dioxide and ozone in urban environments. *Sensors*, 17:1653, 07 2017.
- [RAS] Raspberry pi documentation and faqs. <https://www.raspberrypi.org/documentation/faqs/>. Abgerufen: 14.09.2019.
- [SCV<sup>+</sup>17] Philipp Schneider, Nuria Castell, Matthias Vogt, Franck R. Dauge, W Lahoz, and Alena Bartonova. Mapping urban air quality in near real-time using observations from low-cost sensors and model information. *Environment International*, 106, 06 2017.
- [SEN] Opensensemap. <https://opensensemap.org/>. Abgerufen: 10.08.2019.
- [UBAa] Luftmessnetz: Wo und wie wird gemessen?  
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/luftmessnetz-wo-wie-wird-gemessenabgerufen>. Abgerufen: 03.08.2019.
- [UBAb] Stickstoffoxide.  
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/stickstoffoxide>. Abgerufen: 03.08.2019.
- [UBAc] Warum sind stickstoffoxide schädlich? <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/warum-sind-stickstoffoxide-schaedlich>. Abgerufen: 03.10.2019.
- [W3C] W3.css. <https://www.w3schools.com/w3css/default.asp>.

# Abbildungsverzeichnis

Entwicklung der NO <sub>2</sub> -Exposition zugeordneten Todesfälle in Deutschland [AS118] . . . . .	16
Das Blockdiagramm eines Chemilumineszenz Messgerätes. . . . .	18
Foto eines Passivsammlers. . . . .	19
Aufbau eines elektrochemischen Sensors. Die „Wetting filters“ enthalten das Elektrolyt um den Kontakt zwischen den Elektroden herzustellen. [ALP] . . . . .	30
Aufbau und Interaktionen mit der Atmosphäre eines Metalloxid Sensors [PAHG <sup>+</sup> 17] . . . . .	31
Verschiedene Möglichkeiten Messwerte für Luftschadstoffe auf einer Karte darzustellen. Zu sehen sind die verwendeten Methoden von hackAIR (Oben links), Luftdaten.Info(Oben rechts) und OpenSenseMap (Unten) . . . . .	33
Darstellung von Messdaten als Heatmap. Zu sehen ist eine Kombination aus Leaflet und heatmap.js, welche als Beispiel zur Verfügung steht. . . . .	34
Das Ergebnis des Zusammenführens von Messdaten und Modellrechnung auf einer Karte von Oslo.[SCV <sup>+</sup> 17] . . . . .	35
Ansichtsskizze der Desktopversion der Webanwendung . . . . .	36
Ansichtsskizze der Mobilen Version der Webanwendung. Links ist die Grundansicht und rechts die Ansicht mit expandiertem Menü dargestellt . . . . .	37
Ansprechverhalten des NOX Sensors des MiCS-4514 bei konstant eingeschalteter Beheizung, 25 °C Umgebungstemperatur, 50 % relative Luftfeuchte [MiC] . . . . .	40
Aufbau eines Spannungsteilers. Bei R <sub>1</sub> und R <sub>2</sub> handelt es sich um zwei in reihe geschaltete Widerstände. . . . .	41
Aufbau des in der für die Messstation verwendeten Spannungsteilers. RS ist hierbei der Widerstand des Sensors, R <sub>1</sub> der 22 KΩ Widerstand des Breakout Boards. R <sub>2</sub> und R <sub>3</sub> sind die beiden Widerstände des Spannungsteilers. . . . .	42
Flussdiagramm der NO <sub>2</sub> Messstation. . . . .	43
Aufbau des Vorversuches mit Gasmischstation. . . . .	44
Ergebnisdiagramm des Vorversuches bei 30 °C und 0 % Luftfeuchtigkeit . . . . .	44
Gehäuse mit Lüfter für die Messstation. Hergestellt wurde das Gehäuse aus einer alten Süßwarenverpackung. . . . .	45
Versuchsaufbau zur Ermittlung des Temperatureinflusses. Zu sehen sind die drei Messstationen und die beiden Gefrierakkus. . . . .	46
Verlauf des Sensorwertes beim Test des Temperatureinflusses. . . . .	46
Versuchsaufbau der Vergleichsmessung. Zu sehen ist der eignungsgeprüfte Analysator (2), darüber die drei untersuchten Messstationen im Exsikkator (1) und die zwei zur Datenaufzeichnung eingesetzten Rechner(3 und 4). . . . .	47
Verlauf NO <sub>2</sub> Konzentration gegen ADC Messwert. Es wurden Messwerte gewählt, bei welchen alle anderen Parameter in einem ähnlichen Bereich liegen. . . . .	48
Verlauf NO Konzentration gegen ADC Messwert. Es wurden Messwerte gewählt, bei welchen alle anderen Parameter in einem ähnlichen Bereich liegen. . . . .	49
Verlauf Temperatur gegen ADC Messwert. Es wurden Messwerte gewählt, bei welchen alle anderen Parameter in einem ähnlichen Bereich liegen. . . . .	49
Beispiel für ein Bild aus einem Zwischenschritt der Anleitung. . . . .	50

Beispiel für den von Fritzing erstellten Schaltplan. . . . .	50
Fertig aufgebaute Messtation ohne Gehäuse. . . . .	51
Übersicht über die Architektur des Webservice. . . . .	52
Struktur der Datenbank zur Erfassung der Messdaten. . . . .	53
Datenfluss der NO <sub>2</sub> Messtationen und des Webservice/API. . . . .	55
Ansicht der fertigen Übersichtskarte. Behördliche Messtationen werden grün, die von Teilnehmern blau gefärbt. Ein Popup zeigt den aktuellen Messwert der behördlichen Messtation.	57
Ansicht der „Meine Messstation“ Seite. . . . .	58
Schaltplan für das MiCS-4514 Breakout Board [BRE] . . . . .	64
Ansprechverhalten des MiCS-4514 RED Sensors bei konstant eingeschalteter Beheizung, 25 °C Umgebungstemperatur, 50 % relative Luftfeuchte [MiC] . . . . .	65

# Tabellenverzeichnis

Stickstoffdioxidgrenzwerte laut 39. BImSchV [BJV10] . . . . .	17
Datenqualitätsziele für Messdaten von Stickoxiden [BJV10] . . . . .	19
Übersicht der zuvor genannten Projekte. Die Basisversion umfasst nur eine kleine Auswahl der aufgezählten Sensoren . . . . .	23
Übersicht über den Messdatenzugriff der zuvor genannten Projekte . . . . .	24
Anforderungsdefinition als Userstorys für Bürger . . . . .	25
Anforderungsdefinition als Userstorys für Interessenten . . . . .	25
Anforderungsdefinition als Userstorys für Teilnehmer . . . . .	25
Anforderungsdefinition als Userstorys für Programmierer . . . . .	26
Technische Spezifikationen des RaspberryPi Zero W [RAS] . . . . .	28
Technische Spezifikationen des ESP32 [ESP] . . . . .	28
Technische Spezifikationen des MiCS-4514. $R_0$ ist hierbei der Sensorwiderstand an Luft ohne Beheizung. [MiC] . . . . .	39
Beispiele ADC Messwerte an Punkte, an welchen Temperatur, Luftfeuchtigkeit, $\text{NO}_2$ und NO Konzentration identisch sind. . . . .	47
Eine Beispiel für Messwerte bei welchen alle Parameter außer der NO Konzentration identisch sind. . . . .	48
Übersicht über alle verwendeten npm Pakete . . . . .	53
Übersicht aller API Aufrufen des Webservices . . . . .	54
Technische Spezifikationen des RED Sensors des MiCS-4514. $R_0$ ist hierbei der Sensorwiderstand an der Luft ohne Beheizung. [MiC] . . . . .	64
Übersicht aller verwendeten Bibliotheken/Software und ihrer zugehörigen Lizenzen. . . . .	65



# Abkürzungsverzeichnis

ADC	Analog Digital Konverter
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BUND	Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland
GPIO	General Purpose Input and Output
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
NO	Stickstoffmonoxid
npm	Node Package Manager
ppb	Parts per billion
ppm	Parts per million
RTC	Real Time Clock
UUID	Unique User IDentifier



Name: Patrick Römer

Matrikelnummer: 9595805

### **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit, dass ich diese Bachelorarbeit selbstständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Hagen, den .....

Datum

Patrick Römer