



Hochschule für Technik
und Wirtschaft Berlin

University of Applied Sciences

Konzeption und Implementierung eines LoRaWAN-basierten Sensornetzes für das Monitoring von Umweltdaten im Technologiepark Adlershof

Masterarbeit

Name des Studiengangs

Wirtschaftsinformatik

Fachbereich 4

vorgelegt von

Maren Zaepernick

Datum:

Berlin, 12.01.2021

Erstgutachter: Prof. Dr. Olga Willner

Zweitgutachter: M.Sc. Lukas Becker

Danksagung

Vielen Dank an alle Personen, die mich während der Erstellung meiner Masterarbeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank geht an meine beiden Prüfer, Prof. Dr. Olga Willner und M.Sc. Lukas Becker, die sich immer Zeit für meine Fragen genommen haben und mir mit Ratschlägen und Feedback zur Seite standen.

Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Christopher Horz, Herrn M.Eng. Erik Zinger und Herrn Prof. Dr.-Ing. Nicolas Lewkowicz von der Beuth Hochschule für ihre technische Unterstützung bei der Hardwareauswahl, sowie der Hard- und Softwareentwicklung der Umweltsensoren.

Ebenfalls möchte ich mich bei den Mitarbeitern der Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz – Luftgütemessnetz bedanken insbesondere bei Herrn Marcel Krysiak, Herrn Philipp Tödter und Herrn Paul Herenz für ihre Unterstützung bei der Durchführung und Auswertung der Sensortests an mehreren Referenzstationen in Berlin.

Für die Ermöglichung der Datenerhebung in Adlershof und die Bereitstellung von Verkehrsdaten, sowie hilfreiche Hinweise zur Gehäuseentwicklung und Montage, bedanke ich mich außerdem bei Herrn Dipl.-Ing. Sebastian Schulz vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

Kurzfassung

Der Technologiepark Adlershof wächst rasant. Das führt zu einigen Mobilitätsproblemen. Das erhöhte Verkehrsaufkommen durch Mitarbeiter, Studenten und Bewohner könnte sich potenziell auf die Umwelt auswirken. Daher ist das Ziel dieser Masterarbeit ein Umweltmonitoring in Adlershof aufzubauen, welches als Datengrundlage für die Ableitung von Umweltmaßnahmen dienen soll. Außerdem soll der Zusammenhang zwischen Hauptverkehrszeiten und Schadstoffgehalten in der Luft untersucht werden.

Zunächst wird mithilfe einer Literaturrecherche festgestellt, welche Umweltparameter relevant sind und welche Grenzwerte es gibt. Für die Darstellung der Sensorik wird außerdem anhand von Experteninterviews, Literatur und Fallstudien eine Klassifikation der verschiedenen Sensoren nach Preissegmenten vorgenommen. Diese Klassifikation wurde dann als Grundlage für die Auswahl der Sensoren im Konzept verwendet, die spezifisch für den Anwendungsfall die gewünschten Anforderungen erfüllen. Ausgewählt wurden die Sensoren von Alphasense Ltd, die die Parameter PM₁₀, CO, NO₂ und O₃ messen. Zusätzlich zur Auswahl der Sensoren und Umweltparameter werden im Konzept alle relevanten Faktoren für eine Implementierung, wie Übertragungstechnik, Datenaufbereitung, Visualisierung, Gehäuse, Montage und Standortauswahl beleuchtet. Außerdem wurde das Konzept prototypisch für ein Sensorkpaket in Adlershof implementiert.

Die Auswertung der Sensordaten in Adlershof bestätigen, dass tendenziell ein Zusammenhang zwischen den Luftgehalten der Parameter CO, NO₂ und PM₁₀ und den Trends des Verkehrsaufkommens besteht. Einige Abweichungen in den Trends zeigen jedoch auf, dass davon ausgegangen werden muss, dass noch weitere Faktoren einen Einfluss auf die Luftparameter haben, wie z.B. meteorologische Bedingungen oder Industrien in der Umgebung.

Weitere Forschung könnte sich mit der Identifikation dieser Einflussfaktoren und einer Erweiterung der Analyse beispielsweise durch die Anbindung von weiteren Datenquellen wie meteorologische Daten beschäftigen.

Abstract

The technology park Adlershof (Berlin, Germany) is growing rapidly. That leads to some challenges concerning the mobility. The increased traffic volume by employees, students, and residents could potentially cause harm to the environment. Therefore, the aim of this master thesis is to establish an ecological monitoring in Adlershof that will serve as a database for the derivation of environmental measures. Furthermore, the correlation between the peaks of traffic and pollutant content of the air will be examined.

First, a literature research is used to determine which environmental parameters are relevant and what limit values exist. Then a classification of the various sensors by price segment is carried out on the basis of expert interviews, literature and case. This classification was then used as the basis for the selection of sensors in the concept. The sensors from Alphasense Ltd were selected because they meet the desired requirements for the application and measure the parameters PM10, CO, NO2 and O3. In addition to the selection of sensors and environmental parameters, the concept illuminates all relevant factors for an implementation, such as transmission technology, data preparation, visualization, casing, assembly and site selection. In addition, the concept prototype for a sensor package was implemented in Adlershof.

The examination and evaluation of the sensor data in Adlershof confirms that there tends to be a correlation between the air quality of the parameters CO, NO2 and PM10 and the trends in traffic volume. However, some variations in trends indicate that other factors have an impact on air parameters, such as meteorological conditions or surrounding industries.

Further research could involve the identification of these factors and extending the analysis, for example by connecting other data sources such as meteorological data.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	II
Kurzfassung	III
Abstract	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	X
Abkürzungsverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Motivation	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Forschungsfragen	4
3 Hintergrund	5
3.1 Umwelt	5
3.1.1 Umweltmonitoring	5
3.1.2 Relevante Umweltparameter für Luftqualität	5
3.1.3 Meteorologische Umweltparameter	10
3.1.4 Zertifizierte Messstationen	12
3.1.5 Kennzahlen und Grenzwerte	13
3.2 Sensorik	14
3.2.1 Sensornetze	14
3.2.2 Umweltsensoren für Luftqualität	14
3.2.2.1 Kategorie sehr günstig – 0,01-5,00€	16
3.2.2.2 Kategorie günstig – 5,01-50,00€	18
3.2.2.3 Kategorie mittelteuer – 50,01-400,00€	19

3.2.2.4	Kategorie mittelteure Komplettlösungen – 2.000,00-5.000,00€.....	21
4	Konzeption	23
4.1	Ablaufdiagramm.....	23
4.2	Auswahl der Umweltparameter.....	24
4.3	Auswahl der Sensoren.....	25
4.3.1	Vorauswahl und Nutzwertanalyse	25
4.3.2	Feldtest der Genauigkeit	32
4.3.3	Ergebnisse	38
4.4	Übertragungstechnik und Datenstrecke	39
4.4.1	thingsHub	41
4.4.2	TTN	42
4.5	Visualisierung und Auswertung der Daten	42
4.6	Auswahl der neuralgischen Punkte.....	46
4.7	Verpackung und Montage der Sensoren	48
4.7.1	Stromversorgung.....	48
4.7.2	Gehäuse.....	48
4.7.3	Montage	49
5	Implementierung des Umweltmonitorings	51
5.1	Allgemeines	51
5.1.1	Standort.....	51
5.1.2	Gehäuse.....	52
5.1.3	Montage und Stromversorgung.....	53
5.2	Hardware.....	54
5.2.1	Entwicklungsboard B-L072Z-LRWAN1	54
5.2.2	Sensoren.....	54
5.3	Software	59
5.3.1	Programmierung des Entwicklungsboards	59

5.3.2	thingsHub	64
5.3.3	Visualisierung	68
6	Ergebnisse	73
6.1	Datenanalyse	73
6.2	Bewertung der Daten	78
7	Zusammenfassung und Ausblick	88
	Literaturverzeichnis	91
	Anhang	98
A	Code	98
B	Daten	126
C	Interviewmaterial	132

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Funktionsweise eines Sensorknotens (Mattern & Romer, 2003)	14
Abbildung 2: BME680 (Bosch Sensortec GmbH)	16
Abbildung 3: HCHO-Sensor	18
Abbildung 4: NO ₂ Sensor (Alphasense Ltd, 2020).....	19
Abbildung 5: Hawa Dawa Sensorkpaket.....	21
Abbildung 6: Ablaufdiagramm des Konzepts	23
Abbildung 7: Referenztest NO ₂	34
Abbildung 8: Referenztest O ₃	35
Abbildung 9: Referenztest CO	36
Abbildung 10: Referenztest PM ₁₀	37
Abbildung 11: Beispiel LoRaWAN Architektur	40
Abbildung 12: Datenstrecke mit thingsHub (Quelle: Grafana Logo).....	41
Abbildung 13: Datenstrecke mit TTN (Quellen: The Things Network, Node-RED Resources, InfluxDB Logo, Grafana Logo)	42
Abbildung 14: Panelentwurf 1 – Luftgehalt PM ₁₀ als 1-Stunden-Mittel der letzten 24 Stunden.....	44
Abbildung 15: Panelentwurf 2 – Luftgehalt PM ₁₀ als Tagesmittel der letzten 7 Tage	45
Abbildung 16: Panelentwurf 3 – Luftgehalt PM ₁₀ als Tagesmittel der letzten 6 Monate.....	45
Abbildung 17: Verkehrsknotenpunkte in Adlershof.....	47
Abbildung 18: Gehäuse (schematisch).....	49
Abbildung 19 Montage des Sensorkpakets (integrierte Abbildung: Hermann, 2018)	49
Abbildung 20: Messbrücke DLR (Ernst-Ruska-Ufer/Albert-Einstein-Straße).....	51
Abbildung 21: Gehäuse Umweltsensoren - seitliche Ansicht	52
Abbildung 22: Gehäuse Umweltsensoren - Ansicht von unten und von oben.....	52
Abbildung 23: Montage der Sensoren in Adlershof	53
Abbildung 24: B-L072Z-LRWAN1 (Quelle: STMICROELECTRONICS, 2019).....	54
Abbildung 25: ADC	58
Abbildung 26: Vermessungsdatenblatt von Alphasense	60
Abbildung 27: Ablauf der Integration in thingsHub	64
Abbildung 28: thingsHub - Device anlegen (Schritte 1+2)	64
Abbildung 29: thingsHub - Device anlegen (Schritte 3+4)	64
Abbildung 30: Erstellung eines Drivers (Javascript)	65
Abbildung 31: thingsHub - Driver einem Device zuordnen	67
Abbildung 32: thingsHub - Erstellung einer Datentabelle	68
Abbildung 33: thingsHub Visualizer - Erstellung eines Dashboards.....	68
Abbildung 34: thingsHub Visualizer - Erstellung eines Panels	69
Abbildung 35: thingsHub Visualizer - Panel Registerkarte „General“	69
Abbildung 36: thingsHub Visualizer - Panel Registerkarte "Visualization"	69

Abbildung 37: thingshub Visualizer - Einfügen eines Schwellwerts.....	70
Abbildung 38: thingsHub Visualizer - Panel Registerkarte "Queries"	70
Abbildung 39: PM10 Panel - 1-Stunden-Mittel der vergangenen 24 Stunden	71
Abbildung 40: PM10 Panel - Tagesmittel der vergangenen 7 Tage	71
Abbildung 41: PM10 Panel - Tagesmittel der vergangenen 6 Monate	72
Abbildung 42: PM10 Panel – aktueller Wert und Durchschnitt der vergangenen 12 Monate	72
Abbildung 43: Tagesmittel der Parameter CO und NO ₂	73
Abbildung 44: Tagesmittel der Parameter O ₃ und PM ₁₀	74
Abbildung 45: 1-Stunden-Mittel des Parameters CO am Donnerstag den 17.12.2020	75
Abbildung 46: 1-Stunden-Mittel des Parameters NO ₂ am Donnerstag den 17.12.2020	76
Abbildung 47: 1-Stunden-Mittel des Parameters O ₃ am Donnerstag den 17.12.2020	76
Abbildung 48: 1-Stunden-Mittel des Parameters PM ₁₀ am Donnerstag den 17.12.2020	77
Abbildung 49: Verkehrsdaten - Anzahl Fahrzeuge pro Tag (Wochentrend).....	79
Abbildung 50: Verkehrsdaten - Anzahl Fahrzeuge pro Stunde (Wochentrend)	79
Abbildung 51: Verkehrsdaten - Anzahl Fahrzeuge pro Stunde am Donnerstag den 17.12.2020 (Tagestrend) .	80
Abbildung 52: Vergleich der CO-Tagesmittel mit der Anzahl Fahrzeuge pro Tag.....	81
Abbildung 53: Vergleich der CO 1-Stunden-Mittel mit der Anzahl Fahrzeuge pro Stunde am Donnerstag den 17.12.2020	81
Abbildung 54: Vergleich der NO ₂ -Tagesmittel mit der Anzahl Fahrzeuge pro Tag	82
Abbildung 55: Vergleich der NO ₂ 1-Stunden-Mittel mit der Anzahl Fahrzeuge pro Stunde am Donnerstag den 17.12.2020	83
Abbildung 56: Vergleich der O ₃ -Tagesmittel mit der Anzahl Fahrzeuge pro Tag	83
Abbildung 57: Vergleich der O ₃ 1-Stunden-Mittel mit der Anzahl Fahrzeuge pro Stunde am Donnerstag den 17.12.2020	84
Abbildung 58: Vergleich der PM ₁₀ -Tagesmittel mit der Anzahl Fahrzeuge pro Tag	85
Abbildung 59: Vergleich der PM ₁₀ 1-Stunden-Mittel mit der Anzahl Fahrzeuge pro Stunde am Donnerstag den 17.12.2020	85

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der potenziell schädlichen Gase in der Luft 6

Tabelle 2: Übersicht der relevanten Messstationen 12

Tabelle 3: EU-Grenzwerte für Gase bzw. Partikel in der Luft 13

Tabelle 4: Matrix der Umweltparameter und ihren Anforderungen 24

Tabelle 5: Analyse der MUSS-Anforderungen..... 29

Tabelle 6: Bewertung der Anforderungen je Kategorie 30

Tabelle 7: Gewichtung der Anforderungen..... 31

Tabelle 8: Berechnung der Nutzwerte der Kategorien 31

Tabelle 9: Übersicht der Maßeinheiten der Mess- und Referenzdaten 33

Tabelle 10: Berechnung der Nutzwerte der Kategorien (inklusive Genauigkeit) 38

Tabelle 11: Übersicht ausgewählte Sensoren für die Implementierung 39

Tabelle 12: Übersicht Datenformat 39

Tabelle 13: Eigenschaften des Alphasense OPC-N3 Sensors 55

Tabelle 14: Eigenschaften des Alphasense CO-A4 Sensors..... 56

Tabelle 15: Eigenschaften des Alphasense NO2-A43F Sensors..... 57

Tabelle 16: Eigenschaften des Alphasense OX-A431 Sensors..... 57

Tabelle 17: Eigenschaften des Analogue Front Ends 58

Abkürzungsverzeichnis

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ *Mikrogramm pro Kubikmeter*

ADC *Analog-to-Digital Converter*

atm *physikalische Atmosphäre*

BLUME *Berliner Luftgüte Messnetz und Luftdaten*

CHB *Benzol*

CHT *Toluol*

CO *Kohlenmonoxid*

CO₂ *Kohlenstoffdioxid*

DLR *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*

EU *Europäische Union*

kPa *Kilo Pascal*

mg/m^3 *Milligramm pro Kubikmeter*

NO₂ *Stickstoffdioxid*

NO_x *Stickstoffoxide*

O₃ *Ozon*

PM *Particulate Matter (deutsch: Feinstaub)*

ppb *parts per billion*

ppm *parts per million*

SO₂ *Schwefeldioxid*

VOC *Volatile Organic Compound (deutsch: flüchtige organische Verbindung)*

WHO *World Health Organization*

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Motivation

Luftverschmutzung ist schädlich für die Umwelt und die Gesundheit der Menschen, insbesondere in städtischen Regionen, in denen viel Verkehr und viele Industrien auf begrenztem Raum existieren.¹ Es wurden Verbindungen zwischen Luftverschmutzung und akuten sowie chronischen Gesundheitsschäden aufgedeckt, diese reichen von kurzzeitigen Atemwegsinfektionen bis hin zu Herzkrankheiten, chronischer Bronchitis, Lungenkrebs oder Asthma.² In urbanen Regionen leiden 9 von 10 Menschen an den Auswirkungen der Luftverschmutzung und jedes Jahr sterben mehr als 3 Millionen Menschen an ihren Langzeitfolgen.³

All diese Erkenntnisse sind nicht neu, konkrete Empfehlungen der World Health Organization (WHO) für Emissionen sowie Grenzwerte für Gaskonzentrationen in der Luft kamen zu Beginn des 21. Jahrhunderts⁴, woraufhin die EU sukzessiv Richtlinien für die Luftqualität entwickelte, sodass mit der Zeit das Bewusstsein für die Notwendigkeit von einschränkenden Maßnahmen und Qualitätskontrollen gestiegen ist. Mittlerweile gibt es diverse Städte, die Sensoren einsetzen, um Umwelt- und Mobilitätsdaten zu beobachten und auch die Digitalisierung voranzutreiben, wie z.B. Hennef⁵ und Darmstadt⁶.

Berlin Adlershof ist der größten Wissenschafts- und Technologiepark Deutschlands und beschäftigt auf einer Fläche von 4,2km² etwa 23.500 Mitarbeiter, hinzu kommen rund 7.250 Studierende bzw. Auszubildende sowie ca. 4.000 Anwohner.⁷ In einer Studie zur Mobilität des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) wurde eine Prognose für den Verlauf dieser Zahlen und der parallel steigenden Verkehrsauslastung im Jahre 2030 erarbeitet. Das Jahr 2030 wurde gewählt, weil dann voraussichtlich der Standort komplett ausgelastet sein wird, was konkret bedeutet, dass alle freien Flächen bebaut sein werden. Prognostiziert wird

¹ Kurt, Zhang und Pinkerton (2016)

² Kampa und Castanas (2008)

³ Lim et al. (2012)

⁴ Chan (2006)

⁵ Stadt Hennef

⁶ Wissenschaftsstadt Darmstadt (2020)

⁷ WISTA Management GmbH

eine Verdopplung der Anzahl der Mitarbeiter und ein Anstieg der Studierenden- und Anwohnerzahlen auf ca. 10.000 Studierende und 11.000 Anwohner.⁸

Aus diesen Daten ergeben sich eine Reihe von Herausforderungen, sowohl bei der Mobilität als auch für die Umwelt. Auf den zweiten Punkt bezieht sich diese Masterarbeit, denn das steigende Verkehrsaufkommen auf einer begrenzten Fläche kann zu steigender Luftverschmutzung führen, die für die Menschen gefährlich sein könnte. Um diese Entwicklung zu beobachten soll ein Umweltmonitoring aufgebaut werden. Außerdem sollen mithilfe des Umweltmonitorings umgesetzte verkehrliche Maßnahmen auf ihre Wirkung geprüft und bewertet werden.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Das langfristige Ziel ist ein Umweltmonitoring in Adlershof als Datengrundlage und zur Ableitung und Bewertung von Maßnahmen. Dafür soll ein Umweltsensornetz aufgebaut werden, dass an verschiedenen Stellen im Technologiepark periodisch den Gehalt von Gasen in der Luft misst. In dieser Arbeit sollen dafür zunächst Grundlagen aus der Literatur erarbeitet werden und darauf basierend ein Konzept für die Implementierung des Umweltsensornetzes, sowie die prototypische Umsetzung des Konzepts an einem Standort in Adlershof.

Ziele im Kontext der theoretischen Grundlagen:

- Übersicht der relevanten Umweltparameter
- Klassifizierungsschema für die Umweltsensoren

Diese sind dann die Grundlage für die folgenden Ziele im Kontext der konzeptionellen und praktischen Umsetzung des Umweltmonitorings mit der WISTA Management GmbH:

- Anforderungsanalyse in Bezug auf Umweltparameter und Umweltsensoren
- Auswahl geeigneter Umweltparameter
- Auswahl der Sensoren (mithilfe des Klassifizierungsschemas)
- Prototypische Implementierung des Konzepts an einem ausgewählten Verkehrsknotenpunkt in Adlershof inkl. der Sensorik, Verwendung des lokalen

⁸ Krajzewicz, Heinrichs, Wagner und Flötteröd (2018)

LoRaWAN-Netzes und Visualisierung der erfassten Daten (über einen Zeitraum von mindestens einer Woche)

- Auswertung der Daten, insbesondere ihre Relation zu Verkehrsdaten

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist in drei Abschnitte unterteilt: Hintergrund, Konzeption und Umsetzung.

Der erste Teil sind theoretische sowie praktische Grundlagen. Zum ersten Thema Umwelt werden Umweltmonitoring sowie relevante Umweltparameter vorgestellt. Außerdem wird die Relevanz von Referenzstationen, Kennzahlen und Grenzwerten erläutert. Zum zweiten Thema Sensorik werden Vergleichskriterien dargestellt, die dann für die Klassifizierung der Luftsensoren verwendet werden. Zusätzlich werden komplementäre Sensoren beispielsweise für meteorologische Messwerte erläutert. Als drittes wird die Übertragungstechnik LoRaWAN vorgestellt.

Im zweiten Teil werden alle relevanten Komponenten für die Implementierung eines Umweltmonitorings erläutert. Dazu werden allgemeine Rahmenbedingungen wie Verpackung, Montage und Festlegung der Implementierungspunkte erläutert. Außerdem werden anforderungsbasierte Faktoren, wie die Auswahl der Umweltparameter und Sensoren, die Datenstrecke und die Auswertung der Daten beschrieben.

Im dritten Teil geht es um die praktische Implementierung in Adlershof. Dabei werden alle Punkte aus der Konzeption aufgegriffen und konkret beschrieben, wie diese umgesetzt werden. Dabei wird mithilfe von Bildern und detaillierten Beschreibungen auf die Hardware, Software, Übertragungstechnik, Visualisierung und das Gehäuse bzw. die Montage eingegangen.

2 Forschungsfragen

Die folgenden Forschungsfragen sollen im Laufe dieser Masterarbeit beantwortet werden.

1. In welcher Hinsicht unterscheiden sich Umweltsensoren verschiedener Preissegmente und anhand welcher Kriterien lassen sich diese klassifizieren?
 - a. Welche relevanten Anforderungen an Umweltsensoren, die sich für den Einsatz im städtischen Raum eignen, existieren?
 - b. Welche LoRaWAN-kompatiblen Umweltsensoren gibt es?
2. Welcher Zusammenhang kann aus den Hauptverkehrszeiten und den Höhepunkten der Umweltmesswerte abgeleitet werden?

3 Hintergrund

3.1 Umwelt

3.1.1 Umweltmonitoring

Das Umweltmonitoring ist ein breites Feld, das eine Reihe von natürlichen Umweltfaktoren, wie Pflanzen, Wasser, Boden und Luft, einschließt. Monitoring steht dabei für die Beobachtung und Gewinnung von Informationen über den Zustand der natürlichen Umwelt, sowie Veränderungen dieses Zustandes. Der technologische Fortschritt macht es möglich Daten über die Umwelt mit verhältnismäßig geringem Aufwand aufzuzeichnen. Eine langfristige Erhebung dieser Daten gibt Aufschluss über die optimalen natürlichen Bedingungen für die Umwelt und es können Maßnahmen ermittelt werden, sowie ihre ggf. positiven oder negativen Auswirkungen überprüft werden. Dabei spielen verschiedene Faktoren eine Rolle und beeinflussen sich gegenseitig, was das Vorhaben komplex gestaltet.⁹ Daher sollte jeweils vor Beginn des Monitorings festgelegt werden, was das Ziel ist und das Monitoring entsprechend danach definiert werden. In dieser Arbeit beispielsweise geht es speziell um das Monitoring der Luft, hierbei insbesondere um ihre Bestandteile wie Gase und Partikel.

3.1.2 Relevante Umweltparameter für Luftqualität

Im Folgenden werden die potenziell schädlichen Gase sowie Partikel, die in der Luft gemessen werden können, erläutert. Um einen Überblick zu bekommen wird in Tabelle 1 eine Übersicht derjenigen dargestellt, für die es eine Richtlinie der Europäischen Union (EU) zur Begrenzung in der Luft gibt, die im Regelfall auf einer Empfehlung der WHO basiert. Teilweise gibt es EU-Richtlinien, die sich nicht auf den Gehalt des jeweiligen Parameters in der Luft beziehen, sondern beispielsweise auf die Emission eines Gases. In diesen Fällen wird genaueres in den Anmerkungen erläutert.

Parameter	Grenzwerte in der Luft	Anmerkung
Feinstaub grob (PM ₁₀)	X	
Feinstaub fein (PM _{2,5})	X	
Kohlenstoffmonoxid (CO)	X	

⁹ Zierdt (1997, S. 47f.)

Kohlenstoffdioxid (CO ₂)		Spezielle Richtlinie für die Abgase von Autos: bezieht sich auf einen Gramm-pro-Kilometer-Wert ¹⁰
Ozon (O ₃)	X	
Stickstoffdioxid (NO ₂)	X	
Stickstoffoxide (NO _x)	X	
Schwefeldioxid (SO ₂)	X	
Toluol (CHT)		Spezielle Richtlinie zum Schutz von Gesundheit und Sicherheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch chemische Arbeitsstoffe bei der Arbeit ¹¹
Benzol (CHB)	X	
Flüchtige organische Verbindungen (VOC)		Spezielle Richtlinie für die Industrie: bezieht sich auf die Herstellung bzw. Verwendung von Farben, Lacken etc. ¹²

Tabelle 1: Übersicht der potenziell schädlichen Gase in der Luft

Alle diese Gase sind bei dauerhafter Einatmung potenziell schädlich für den Menschen und sollten somit in der Luft nur in geringen Mengen vorkommen (genaue Grenzwerte werden in Kapitel 3.1.5 Kennzahlen und Grenzwerte beschrieben).

Im Folgenden werden die einzelnen Luftbestandteile genauer erklärt. Dabei wird darauf eingegangen, um was genau es sich handelt, wodurch es erzeugt wird und eventuelle Besonderheiten in Bezug auf ihre Schädlichkeit.

Feinstaub:

Als Feinstaub oder englisch "Particulate Matter" (PM) bezeichnet man Teilchen in der Luft, die

¹⁰ Europäisches Parlament und Rat (2019)

¹¹ Europäische Kommission (2019)

¹² Europäisches Parlament und Rat (2004)

nicht sofort zu Boden sinken, sondern eine gewisse Zeit in der Atmosphäre verweilen. Die feinen Partikel sind im Allgemeinen nicht mit bloßem Auge wahrzunehmen. Unter bestimmten Wetterbedingungen kann man Ansammlungen von Feinstaubpartikeln in Form von sogenannte "Dunstwolken" erkennen.¹³

Je nach Korngröße der Staubteilchen wird der Feinstaub in so genannte Fraktionen unterteilt: Unter PM₁₀ versteht man alle Staubteilchen, deren aerodynamischer Durchmesser 10 Mikrometer (µm) oder kleiner ist. Mit PM_{2,5} sind alle Teilchen gemeint, deren Durchmesser 2,5 µm und kleiner sind. Entsprechend handelt es sich um eine Teilmenge der PM₁₀-Partikel. Es gibt noch weitere Einteilung wie PM₅, PM₁ und PM_{0,1}, diese sind jedoch eher selten und es gibt für sie auch keine offiziellen Grenzwerte.¹⁴¹⁵ Die Feinstaubpartikel stammen aus den im Folgenden dargestellten Quellen, die jeweiligen Anteile am gesamten Feinstaubgehalt wurden in der Studie von Karagulian et al. geschätzt. Demnach werden 25% der PM_{2,5}-Partikel vom Verkehr, 22% von nicht spezifizierten menschlichen Quellen, 20% von häuslichen Brennstoffen, 18% von natürlichem Staub und Salz und 15% von der Industrie erzeugt.¹⁶¹⁷

Da sich PM nur auf die Größe der Teilchen bezieht, sind diese nicht zwangsläufig schädlich, es werden auch organische Partikel wie Pollen oder ähnliches berücksichtigt. Um festzustellen, inwieweit der Feinstaub schädlich ist, müssten die Partikel aufgefangen und untersucht werden.¹⁸

Kohlenstoffmonoxid (CO):

CO ist eine chemische Verbindung, die bei der unvollständigen Verbrennung von Brenn- und Treibstoffen entsteht, wenn nicht genug Sauerstoff (O₂) vorhanden ist. Es wird hauptsächlich im Kraftfahrzeugverkehr erzeugt und ist in höherer Konzentration ein Atemgift. Außerdem trägt es zur Bildung von bodennahem Ozon (O₃) bei¹⁹, mehr dazu unter Ozon (weiter unten).

¹³ Bachmann und Lange (2013, S. 516)

¹⁴ Umweltbundesamt (2020a)

¹⁵ Kurt et al. (2016), Kapitel 2

¹⁶ Karagulian et al. (2015)

¹⁷ Kurt et al. (2016), Kapitel 2

¹⁸ Interview mit Guido Burger, 20.02.2020

¹⁹ Umweltbundesamt (2020b)

Kohlenstoffdioxid (CO₂):

CO₂ besteht aus CO und Sauerstoff (O₂) und ist mit einem Anteil von etwa 0,038% ein natürlicher Bestandteil der Luft. Es absorbiert Wärme, die von der Erde abgegeben wird und strahlt sie zurück auf die Erde, dadurch trägt es wesentlich zu unserem gemäßigten Klima bei. Es entsteht sowohl aus natürlichen Quellen wie bei der Atmung von Lebewesen und bei dem Zerfall von Vulkanasche, als auch aus Quellen wie der Verbrennung von Holz, Kohle, Öl oder Gas.²⁰ Da es sehr viele natürliche Erzeuger von CO₂ gibt, wurde von der EU kein Grenzwert für den Gehalt in der Luft festgelegt sondern für den Ausstoß von CO₂ beispielsweise von Kraftfahrzeugen.²¹

Ozon (O₃):

In Bodennähe auftretendes Ozon wird bei intensiver Sonneneinstrahlung durch photochemische Prozesse aus Vorläuferschadstoffen wie Stickstoffoxiden und flüchtigen organischen Verbindungen (siehe unten) gebildet.²² Ozon wird deshalb als sekundärer Schadstoff bezeichnet. Die Ozonvorläuferstoffe stammen hauptsächlich aus vom Menschen verursachten Quellen, wie z.B. dem Kraftfahrzeugverkehr.²³

Stickstoffoxide (NO_x):

Stickstoffoxid ist eine Sammelbezeichnung für verschiedene gasförmige Verbindungen, die aus den Atomen Stickstoff (N) und Sauerstoff (O) aufgebaut sind. Unter Anderem zählen die Verbindungen Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂) dazu.

Stickstoffoxide gehören zu den so genannten reaktiven Stickstoffverbindungen, die zu einer Vielzahl von negativen Umweltwirkungen führen können. Zusammen mit flüchtigen Kohlenwasserstoffen sind Stickstoffoxide für die sommerliche Ozonbildung verantwortlich. Die Hauptquellen von Stickstoffoxiden sind Verbrennungsmotoren und Feuerungsanlagen für

²⁰ Wagener (2019)

²¹ Europäisches Parlament und Rat (2019)

²² Chan (2006, S. 181)

²³ Umweltbundesamt (2020c)

Kohle, Öl, Gas, Holz und Abfälle. Dabei entstehen die Stickstoffoxide als unerwünschtes Nebenprodukt. In Ballungsgebieten ist der Straßenverkehr die bedeutendste NO_x-Quelle.²⁴

Stickstoffdioxid (NO₂):

NO₂ ist eine der Verbindungen, die oben unter NO_x zusammengefasst wurden.²⁵ Es wird hier nochmal separat erwähnt, weil es nicht nur Messstationen gibt, die Messwerte für die Gruppe NO_x angibt, sondern auch Messstationen die individuelle NO₂ Messwerte angeben.

Schwefeldioxid (SO₂):

Schwefeldioxid (SO₂) ist ein farbloses, stechend riechendes, wasserlösliches Gas, das Mensch und Umwelt beeinträchtigt. In der Atmosphäre aus Schwefeldioxid entstehende Sulfatpartikel tragen zudem zur Belastung mit Feinstaub (PM₁₀) bei. Schwefeldioxid entsteht überwiegend bei Verbrennungsvorgängen fossiler Energieträger wie Kohle und Öl durch Oxidation des im Brennstoff enthaltenen Schwefels.²⁶ In Europa wurden die Konzentrationen von SO₂ weitestgehend durch Regulationen und Umstieg auf andere Energieerzeuger gesenkt und sind seit einigen Jahren dauerhaft unter den Grenzwerten (s. Kapitel 3.1.5).²⁷

Toluol (CHT):

Toluol ist eine chemische Verbindung mit der Summenformel C₇H₈, die bei Raumtemperatur als farblose, stark riechende Flüssigkeit vorliegt. Es ist ein Bestandteil von Rohöl, Farben und Lacken, wird darüber hinaus aber auch für Produktionsprozesse verwendet. So gelangt es leicht in die Luft. Für den Menschen kann es eine lungenschädigende Wirkung haben. Atmet ein Mensch dauerhaft Toluol ein, z.B. bei der regelmäßigen Arbeit mit chemischen Stoffen, so verringert sich sein Atemvolumen.²⁸

²⁴ Umweltbundesamt (2020e)

²⁵ Umweltbundesamt (2020e)

²⁶ Umweltbundesamt (2020d)

²⁷ Umweltbundesamt (2020d, S. 194)

²⁸ Sagunski (1996)

Benzol (CHB):

Benzol ist eine geruchsstarke, organische, chemische Verbindung mit der Summenformel C_6H_6 . Es ist ebenso wie Toluol im Benzin für Kraftfahrzeuge enthalten und daher Bestandteil der entweichenden Abgase aus dem Auspuff.²⁹ Wobei das Verhältnis von Toluol/Benzol in der Abgasluft 2:1 beträgt.³⁰ Außerdem entsteht es durch Rauchen und als Abfallprodukt von Industrien. Für den Menschen kann es eine krebserregende Wirkung haben.³¹

Flüchtige organische Verbindungen:

Flüchtige organische Verbindungen werden auch VOCs (engl. Volatile Organic Compounds) genannt. Flüchtig bedeutet, dass die Verbindung bereits bei niedrigen Temperaturen verdampft und sich daher gasförmig in der Luft befindet. Organisch sind alle Verbindungen, die Kohlenstoffbindungen enthalten, darunter fallen beispielsweise Kohlenwasserstoffe, Alkohole und organische Säuren.³²

Da VOC ein Sammelbegriff organischer Verbindungen ist, gibt es diverse Quellen. Im Außenbereich gibt es biologische Quellen, wie Pflanzenstoffwechsel- oder Abbauprozesse, aber VOC tritt auch als Nebenprodukt beispielsweise im Kraftfahrzeugverkehr oder der Industrie auf.

In großen Mengen sind VOCs gesundheitsschädigend für den Menschen, allerdings wurden tatsächliche Grenzüberschreitungen bisher nur in Innenbereichen etwa kurz nach einer Renovierung aufgrund von Farben, Lacken und Staubabfällen festgestellt.³³

3.1.3 Meteorologische Umweltparameter

Zusätzlich relevant für das Monitoring der Luft könnte das Wetter bzw. meteorologische Umweltfaktoren sein, unabhängig davon, ob diese Daten durch Sensoren erhoben oder aus einer externen Quelle bezogen werden.

²⁹ Umweltbundesamt (2020f)

³⁰ Sagunski (1996)

³¹ Chan (2006, S. 62)

³² Bachmann und Lange (2013, S. 516)

³³ Umweltbundesamt (2016)

Der Deutsche Wetterdienst beispielsweise veröffentlicht die meteorologischen Umweltparameter Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Windrichtung und Windstärke.³⁴

Temperatur:

Temperatur wird als Wärmezustand eines Stoffes, hier der Luft, definiert. Es gibt mehrere Temperaturskalen, in dieser Arbeit wird in Grad Celsius gemessen, da diese Temperaturskala in Europa am weitesten verbreitet ist.³⁵

Luftfeuchtigkeit:

Luftfeuchtigkeit ist der Anteil des Wasserdampfes an der Luft. Die Luftfeuchtigkeit kann absolut als Gramm pro Kubikmeter Luft oder relativ als das Verhältnis der vorhandenen zur maximal möglichen Luftfeuchtigkeit in Prozent angegeben werden. Diese maximal mögliche Luftfeuchtigkeit ist je nach Lufttemperatur unterschiedlich, je höher die Lufttemperatur, desto mehr Wasserdampf kann die Luft aufnehmen. Nimmt die Luft so viel Wasserdampf wie möglich auf, so entsteht ein thermodynamisches Gleichgewicht, in dem der Wasserdampfdruck vollständig gesättigt ist.³⁶

Luftdruck:

Durch die Erdanziehungskraft wird die Luft auf die Erde gedrückt. Der Luftdruck ist das Gewicht dieser Luftsäule (vom Erdboden bis zur Atmosphäre) pro Flächeneinheit. Die Standard-Maßeinheit für den Luftdruck ist Hektopascal (hPa). Im Durchschnitt kann in Meereshöhe von einem Luftdruck 1013.25 hPa ausgegangen werden.³⁷

Wind:

Der Wind beschreibt die Verlagerung von Luftteilchen in Bezug auf deren Richtung und Geschwindigkeit.³⁸ Die Windgeschwindigkeit ist die horizontale Verlagerung der Luftteilchen

³⁴ Deutscher Wetterdienst (2020a)

³⁵ Deutscher Wetterdienst (2020d)

³⁶ Deutscher Wetterdienst (2020c)

³⁷ Deutscher Wetterdienst (2020b)

³⁸ Deutscher Wetterdienst (2020e)

und kann in Meter pro Sekunde, Kilometer pro Stunde oder nautische Meile pro Stunde angegeben werden.³⁹ Die Windrichtung basiert auf dem Polarwinkel und beschreibt die Richtung aus der der Wind weht. Dabei wird von der 360 Grad Skala des Kreises ausgegangen, welcher in 8, 16 oder 32 Teile geteilt wird. Eine häufige Einteilung ist die 8-teiligen Windrose mit den Richtungen Nordost, Ost, Südost, Süd, Südwest, West, Nordwest und Nord. Nord ist dabei 0 Grad und die Skala verkehrt im Uhrzeigersinn, entsprechend wäre Nordost ein Winkel von 45 Grad, Ost ein Winkel von 90 Grad usw.⁴⁰

3.1.4 Zertifizierte Messstationen

Für einen Vergleich, welche Parameter von zertifizierten Messstationen gemessen werden wird in Tabelle 2 dargestellt, welche Gase bzw. Schadstoffe von Messstationen des Umweltbundesamtes (UBA) und der Stadt Berlin erhoben werden, sowie die Zusammensetzung der ermittelten Luftqualitätsindices (LQI), denn es werden nicht alle Messwerte zur Ermittlung der LQI herangezogen.

	Messwerte (UBA)	Luftqualitätsindex (UBA)	Messwerte Berlin	Luftqualitätsindex Berlin
PM ₁₀	X	X	X	X
PM _{2,5}				
CO	X		X	X
CO ₂				
O ₃	X	X	X	X
NO ₂	X	X	X	X
NO _x			X	
SO ₂	X		X	
CHT (Toluol)			X	
CHB (Benzol)			X	
VOC				

Tabelle 2: Übersicht der relevanten Messstationen^{41,42}

³⁹ Deutscher Wetterdienst (2020f)

⁴⁰ Deutscher Wetterdienst (2020g)

⁴¹ Umweltbundesamt (2020g)

⁴² BerlinOnline Stadtportal GmbH & Co. KG (2020b)

3.1.5 Kennzahlen und Grenzwerte

Die Tabelle 3 zeigt die aktuell von der EU festgelegten Grenzwerte.

Parameter	1-Stunden-Wert	Überschreitungen im Jahr	8-Stunden-Mittelwert (gleitend)	Überschreitungen im Jahr	Tages-Mittelwert	Überschreitungen im Jahr	Jahres-Mittelwert
PM₁₀ ⁴³					50 µg/m ³	35	40 µg/m ³
PM_{2,5} ⁴⁴							25 µg/m ³
CO ⁴⁵			10 mg/m ³				
O₃ *1 s. unten	180 µg/m ³	0	120 µg/m ³	25			
SO₂ ⁴⁶	350 µg/m ³	24			125 µg/m ³	3	20 µg/m ³
NO₂ ⁴⁷	200 µg/m ³	18					40 µg/m ³
NO_x *2 s. unten							30 µg/m ³
Benzol ⁴⁸							5 µg/m ³

Tabelle 3: EU-Grenzwerte für Gase bzw. Partikel in der Luft⁴⁹

*1 Die Werte für Ozon sind aktuell keine absoluten Grenzwerte, sondern Zielwerte. Für die Ozonkonzentration gibt es eine Informationsschwelle von 180 µg/m³ (1-Stunden-Wert) und eine Alarmschwelle von 240 µg/m³ (1-Stunden-Wert). Ab einem Ozonwert von 180 µg/m³ werden außerdem über die Medien Verhaltensempfehlungen an die Bevölkerung gegeben.⁵⁰

*2 Der Jahresmittelwert für NO_x ist kein Grenzwert, sondern ein kritischer Wert zum Schutz der Vegetation.⁵¹

⁴³ Umweltbundesamt (2020a)

⁴⁴ Umweltbundesamt (2020a)

⁴⁵ Umweltbundesamt (2020b)

⁴⁶ Umweltbundesamt (2020d)

⁴⁷ Umweltbundesamt (2020e)

⁴⁸ Umweltbundesamt (2020f)

⁴⁹ BerlinOnline Stadtportal GmbH & Co. KG (2020a)

⁵⁰ Umweltbundesamt (2020c)

⁵¹ Umweltbundesamt (2020e)

3.2 Sensorik

3.2.1 Sensornetze

Ein Sensornetz besteht aus mehreren Sensorknoten. Ein einzelner Sensorknoten befolgt im Allgemeinen die folgenden Schritte:⁵²

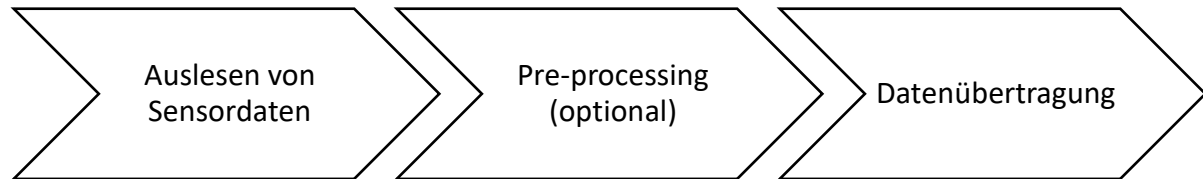


Abbildung 1: Funktionsweise eines Sensorknotens (Mattern & Romer, 2003)

In einem Sensornetz werden mehrere Sensorknoten in einem Gebiet implementiert, um so die gewünschte Dichte zu erreichen. Dadurch gewinnt ein Sensornetz an Komplexität. Ein Vorteil eines Sensornetzes ist seine Fähigkeit, durch das Sammeln der Daten mehrerer Knoten, Zusammenhänge aufzudecken⁵³. Ein Beispiel wäre das Sammeln von Umweltdaten an einer Verkehrskreuzung und in einer wenig befahrenen Nebenstraße. Weisen die Daten der Nebenstraße zu Verkehrszeiten dauerhaft niedrigere Werte auf als die Daten der Kreuzung, so könnte ein Zusammenhang zwischen Kraftfahrzeugen und Umweltdaten bestehen. Je mehr Sensorknoten Daten sammeln, desto fundiertere Hypothese können entstehen und desto mehr Zusammenhänge können aufgedeckt werden.

3.2.2 Umweltsensoren für Luftqualität

Für die spätere Auswahl der Sensoren werden sie in Preisklassen klassifiziert und anhand von im Folgenden definierten Kriterien verglichen. Es gibt Luftsensoren in einer Preisspanne von einem Euro bis zu mehreren Tausend Euro. Da die spätere Anwendung eine portable Lösung benötigt, werden Lösungen auf dem Niveau zertifizierter Messstationen hier nicht berücksichtigt. Für die Kategorien sehr günstig, günstig und mittelteuer werden nur die Sensoren ohne Mikrocontroller und LoRaWAN Zubehör betrachtet. Kann ein Sensor mehrere individuelle Parameter messen, so wird der Preis des Sensors durch die Anzahl Parameter dividiert. Wenn ein Sensor aus einem Messwert mehrere Parameter berechnen kann, gelten diese nicht als individuelle Parameter und der Preis des Sensors wird nicht dividiert.

⁵² Mattern und Romer (2003)

⁵³ Akyildiz, Su und Sankarasubramaniam (2002)

Versandkosten werden nicht berücksichtigt. In Kategorie mittelteure Komplettlösungen ist die Preisberechnung pro Parameter komplexer, da eine Gesamtlösung inklusive Mikrocontroller, LoRaWAN Zubehör, Gehäuse etc. geliefert wird. Oft gibt es auch ein Standardumfang an Parametern, die nicht zwangsläufig individuell angepasst werden können. Daher wird diese Kategorie eine größere Preisspanne umfassen, welche sich auf den Gesamtpreis der Lösung bezieht.

Der folgende Abschnitt stellt verschiedene Umweltsensoren vor, die auf Basis einer Literaturrecherche und Experteninterviews identifiziert wurden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die Sensoren anhand der folgenden Kriterien klassifiziert.

Ein Kriterium ist die Trennschärfe. In Bezug auf Gassensoren ist damit die Fähigkeit gemeint, verschiedene Gase in der Luft zu unterscheiden. Je höher die Trennschärfe desto spezifischer die Detektion des Sensors.⁵⁴

Ein weiteres Kriterium ist der mit der Implementierung verbundene Aufwand. Dazu gehört die zusätzliche Hardware, die benötigt wird, damit der Sensor messen und die Messwerte übertragen kann. Außerdem ist auch der Konfigurationsaufwand inbegriffen, der benötigt wird, um den Sensor zum Laufen zu bringen. Zusätzlich benötigen viele Sensoren vor dem Einsatz eine Kalibrierung, die sehr aufwändig ist.⁵⁵ Die Messwerte von Sensoren können durch Herstellertoleranzen von den realen Werten abweichen.⁵⁶ Eine Kalibrierung ist ein Test unter den Bedingungen von bekannten Werten mit Messwerten des Sensors.⁵⁷ Es werden also genau diese Abweichungen bestimmt. Für ein Thermometer würde beispielsweise für jeden Grad Celsius als Sollwert der dazugehörige Messwert des Sensors gemessen. Aus diesen Werten wird dann eine Kennlinie gezeichnet. Wie viele Werte gemessen werden müssen, also jedes Grad Celsius oder in fünf Grad Celsius Schritten, hängt von dem jeweiligen Anwendungsfall ab und inwiefern Toleranzen akzeptabel sind.⁵⁸ Es gibt mehrere Verfahren für die Kalibrierung, eins davon ist die Vergleichskalibrierung. Dabei würde beispielsweise ein Temperatursensor gemeinsam mit einem Normalthermometer in eine Umgebung gebracht

⁵⁴ Liu et al. (2012)

⁵⁵ Eigener Ansatz

⁵⁶ Bernhard (2004, S. 432)

⁵⁷ Cable (2005, S. 1)

⁵⁸ Bernhard (2004, S. 435)

werden, die konstant temperiert werden kann. In dieser Umgebung werden dann nacheinander und für einen bestimmten Zeitraum verschiedene Temperaturen eingestellt und die Anzeigen des Temperatursensors dokumentiert. Es ist dabei wichtig, dass dem Sensor genug Zeit gegeben wird, sich auf die Umgebung einzustellen und die Temperatur anzunehmen.⁵⁹ Im Idealfall sollten jedoch mehrere Werte verwendet werden und eine Kalibrierung sowohl im Labor als auch unter Realbedingungen durchgeführt werden, um auch äußere Einflüsse mit einzubeziehen.⁶⁰

Ein weiteres Kriterium ist die Genauigkeit der Sensoren. Eine große Abdeckung von Luftqualitätssensoren ist für die Datensammlung von Vorteil. Dafür müssen die Daten von adäquater Genauigkeit bzw. Qualität sein, sowie einheitlich bzw. vergleichbar. Die Anwendung im Außenbereich eröffnet einer Reihe von schwer berechenbaren Faktoren wie Wetter die Möglichkeit die Ergebnisse zu beeinflussen, daher sollten die Sensorumgebungen so einheitlich wie möglich aufgebaut sein. Mit Sensorumgebung ist hier z.B. das Gehäuse und die Montage gemeint. Außerdem spielt die, unter Aufwand beschriebene, Kalibrierung der Sensoren eine Rolle für die Genauigkeit, je sorgfältiger die Kalibrierung desto genauere Werte liefert der Sensor. Nach Möglichkeit sollte die Kalibrierung in der Sensorumgebung durchgeführt werden, die für die spätere Implementierung vorgesehen ist.⁶¹

3.2.2.1 Kategorie sehr günstig – 0,01-5,00€

Beschreibung: Diese Kategorie beinhaltet sehr günstige Mikrochips, die mit etwas Elektronik in kleinen Modulen zu einem Preis von weniger als 5€ pro Parameter verkauft werden. Oft haben diese Mikrochips mehrere Funktionen. Der Sensor Bosch BME 680 beispielsweise gibt die Temperatur, den Luftdruck, die Luftfeuchtigkeit und VOCs aus.⁶²

Teilweise sind diese Mikrochips oder Module fest



Abbildung 2: BME680 (Bosch Sensortec GmbH)

⁵⁹ Bernhard (2004, S. 439-440)

⁶⁰ Lewis und Edwards (2016)

⁶¹ Lewis und Edwards (2016)

⁶² Bosch Sensortec GmbH (2017)

in Entwicklungsboards verbaut, wie z.B. der Bosch BME 680 Sensor im IoT Octopus Development Board.⁶³

Umweltparameter: Es gibt keine Trennschärfe zwischen verschiedenen Gasen, nur VOCs als Gesamtmenge an Gasen in der Luft. Die meteorologischen Parameter Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit sind ebenfalls in dieser Kategorie erhältlich.

LoRaWAN-Kompatibilität: Ja, aber nicht integriert.

Aufwand für die Implementierung: Im Preis ist nur das jeweilige Sensormodul enthalten. Für die Implementierung werden entsprechend noch ein Mikrocontroller, Kabel, sowie Zubehör für die Übertragung der Sensordaten. Je nachdem wie das Sensormodul aufgebaut ist, können Kabel für den Anschluss der Sensoren an den Mikrocontroller verwendet werden, es ist aber auch möglich, dass dafür gelötet werden muss. Außerdem fällt pro Sensor noch Programmieraufwand für die Auslesung der Sensordaten an und eine Kalibrierung ist ebenfalls notwendig.⁶⁴

Genauigkeit: Die Kennzahl VOCs gibt Aufschluss über die Gesamtmenge an flüchtigen kohlenstoffhaltigen Verbindungen, daher können bei konstantem Messen der VOCs Unterschiede wie Erhöhungen und Senkungen dieses Wertes beobachtet werden. Ein einzelner VOC-Messwert ist daher nicht sehr genau. Das gilt auch für die meteorologischen Parameter. Für eine grobe Einschätzung sind sie geeignet, aber nicht für einen genauen Wert. Es muss berücksichtigt werden, dass beispielsweise die Temperatur stark durch Wärme, die von der Elektronik abgegeben wird, beeinträchtigt wird und keine Widerspiegelung der Umgebungstemperatur ist.⁶⁵

⁶³ Fab-Lab.eu (2015)

⁶⁴ Bosch Sensortec GmbH (2017)

⁶⁵ Interview mit Guido Burger, 20.02.2020

3.2.2.2 Kategorie günstig – 5,01-50,00€

Beschreibung: Diese Kategorie beinhaltet günstige Mikrochips, die mit ein wenig Elektronik in kleinen Modulen zu einem Preis von 5-50€ pro Parameter verkauft werden. Auch hier gibt es Mikrochips, die mehrere unterschiedliche Gase messen und ausgeben können, oder auch Module, in denen mehrere Mikrochips verbaut sind. Teilweise gibt es unterschiedliche Mikrochips, die den gleichen Parameter messen. In den meisten Fällen



Abbildung 3: HCHO-Sensor

(Seeed Technology Co., 2020b)

unterscheiden sich diese Mikrochips nicht in ihrer Vorgehensweise und auch nicht in ihrer Genauigkeit. Es bedeutet nur, dass es verschiedene Hersteller gibt.

Umweltparameter: Temperatur, Luftfeuchtigkeit, PM₁₀, PM_{2,5}, VOC, NO₂, CO, O₃ und CO₂ können mit Sensoren dieser Kategorie gemessen werden.⁶⁶⁶⁷⁶⁸⁶⁹ Benzol, Toluol werden von VOC-Sensoren inkludiert, allerdings nicht individuell gemessen.⁷⁰

LoRaWAN-Kompatibilität: Ja, aber nicht integriert.

Aufwand für die Implementierung: Im Preis ist nur das jeweilige Sensormodul enthalten. Für die Implementierung werden entsprechend ein Mikrocontroller, Kabel, sowie Zubehör für die Übertragung der Sensordaten. Je nachdem wie das Sensormodul aufgebaut ist, können Kabel für den Anschluss der Sensoren an den Mikrocontroller verwendet werden, es ist aber auch möglich, dass dafür gelötet werden muss. Außerdem fällt pro Sensor noch Programmieraufwand für die Auslesung der Sensordaten an. Dieser Aufwand unterscheidet sich stark zwischen verschiedenen Anbietern der Module. Der Anbieter Grove verwendet Kabelanschlüsse und sendet auch ein Kabel pro Sensor mit. So ist der Hardwareaufbau sehr simpel. Auf ihrer Webseite ist sehr gut dokumentiert, wie die Daten ausgelesen werden können. Dazu wird im Normalfall eine Bibliothek benötigt, die heruntergeladen werden muss. Zusätzlich gibt es Beispiel Code für die Auslesung der Daten. Die meisten anderen Anbieter

⁶⁶ Seeed Technology Co. (2020b)

⁶⁷ Seeed Technology Co. (2020e)

⁶⁸ Seeed Technology Co. (2020d)

⁶⁹ aliexpress.com (2020)

⁷⁰ Seeed Technology Co. (2020c)

stellen, abgesehen vom Datenblatt des Mikrochips, wenig bis gar keine Dokumentation zur Verfügung, was den Aufwand, um den Sensor in Betrieb zu nehmen erheblich höher macht.⁷¹

Genauigkeit: Für die Genauigkeit der Sensoren spielen die Umgebung sowie umweltbedingte Faktoren eine Rolle. Bei hoher Luftfeuchtigkeit kann es beispielsweise sein, dass der günstige Feinstaubsensor eine höhere Anzahl misst, weil er die Wasserteilchen in der Luft als Partikel wahrnimmt. Das ist per Definition nicht falsch, kann aber zu Unklarheiten bei der Datenauswertung führen. Allgemein gilt, dass die Sensoren nicht unter Realbedingungen getestet wurden und es keine Möglichkeit gibt, eine Aussage über ihre Genauigkeit zu treffen, ohne einen derartigen Test durchzuführen. Es wäre sinnvoll die Tests am geplanten Implementierungsort oder einem ähnlichen Ort durchzuführen, da wie oben beschrieben wetter- und umgebungsbedingte Faktoren eine Rolle spielen können. Um diese Faktoren genau zu identifizieren sollten die Tests folglich unter möglichst realen Bedingungen und über einen längeren Zeitraum erfolgen.⁷²

3.2.2.3 Kategorie mittelteuer – 50,01-400,00€

Beschreibung: Die Anbieter dieser Kategorie stellen die einzelnen Sensoren plus Standardzubehör zur Verfügung, sodass der Nutzer die Hardware nur noch zusammenbauen muss. Dann müssen die Daten nur noch ausgelesen werden. Da es sich hier um Anbieter handelt, die selbst Hersteller und nicht nur Händler sind, wird auf Bestellung produziert.⁷³ Außerdem steht der Anbieter für Support zur Verfügung und bietet ausführliche Dokumentationen an. Ein weiterer großer Vorteil ist, dass die Sensoren bereits vorkalibriert sind.⁷⁴



Abbildung 4: NO₂ Sensor
(Alphasense Ltd, 2020)

Umweltparameter: PM₁₀, PM_{2,5}, VOC, SO₂, NO₂, CO, O₃, CO₂, NO können von den Sensoren dieser Kategorie gemessen werden.⁷⁵

⁷¹ Seeed Technology Co. (2020a)

⁷² Interview mit Guido Burger, 20.02.2020

⁷³ Alphasense Ltd (2020)

⁷⁴ Alphasense Ltd (2014, S. 7)

⁷⁵ Alphasense Ltd (2020)

LoRaWAN-Kompatibilität: Ja, aber nicht integriert.

Aufwand für die Implementierung: Im Preis ist nur das jeweilige Sensormodul mit Elektronik enthalten. Für die Implementierung werden entsprechend ein Mikrocontroller, Kabel, sowie Zubehör für die Übertragung der Sensordaten. Je nachdem wie das Sensormodul aufgebaut ist, können Kabel für den Anschluss der Sensoren an den Mikrocontroller verwendet werden, es ist aber auch möglich, dass dafür gelötet werden muss. Außerdem fällt pro Sensor noch Programmieraufwand für die Auslesung der Sensordaten an. Dieser Aufwand unterscheidet sich stark zwischen verschiedenen Schnittstellen. Die mitgelieferten Dokumentationen sowie die Möglichkeit den Anbieter zu kontaktieren erleichtern den Aufbau und die Konfiguration der Sensoren. Ein weiteres großes Aufwandsersparnis bieten die mitgelieferten Spezifikationen der bereits durchgeführten Kalibrierung, denn eine eigene Kalibrierung durchzuführen ist sehr aufwändig, da eine vollständige Testumgebung aufgebaut werden müsste.⁷⁶

Genauigkeit: Die durchgeführte Kalibrierung sollte die Genauigkeit der Sensoren, zumindest im Vergleich zu Sensoren der Kategorien sehr günstig und günstig, verbessern. Dennoch gibt es nur vereinzelte Aussagen zur Genauigkeit dieser Sensoren. Ein 12-wöchiges Experiment in einer ländlichen Gegend in Kalifornien teste zwei Feinstaubsensoren dieser Kategorie und befand ihre Genauigkeit und Präzision als gut für kurzfristige Feinstaubanstiege, sofern richtig kalibriert und eine Korrektur je nach relativer Luftfeuchtigkeit vorgenommen wurde. Diese Aussage bezieht sich jedoch auf eine sehr spezielle Testumgebung und kann deshalb nicht als allgemeingültig gewertet werden.⁷⁷

⁷⁶ Interview mit Krzysztof Janiuk, 20.04.2020

⁷⁷ Mukherjee, Stanton, Graham und Roberts (2017)

3.2.2.4 Kategorie mittelteure Komplettlösungen – 2.000,00-5.000,00€

Beschreibung: Es gibt Anbieter, die Komplettlösungen zu einem Festpreis zur Verfügung stellen und dann zusätzlich eine jährliche Gebühr erheben, für den Service der Datenübermittlung und Kalibrierung der Daten. Die initialen Kosten liegen bereits mindestens bei 1000€ und es wird auch nicht nach Aufwand bezahlt, sondern es gibt ein Standardpaket mit festgelegten Sensoren. Wenn die gewünschten Parameter nicht enthalten sind, kostet das extra, sofern die gewünschten Parameter angeboten werden. Das Sensorpaket wird im Regelfall



Abbildung 5: Hawa Dawa Sensorpaket

(Hawa Dawa GmbH, 2020)

inklusive Gehäuse und Montagevorrichtung geliefert und kann direkt in Betrieb genommen werden. Die jährliche Gebühr, die man als Abonnement der Daten bezeichnen könnte, hat Vor- und Nachteile. Ein Nachteil ist, dass die Sensoren eine Art Black Box sind, was bedeutet, dass die Programmierung und Funktionsweise nicht eingesehen werden und entsprechend nicht verändert werden kann. Ein weiterer Nachteil ist die Abhängigkeit vom Anbieter. Die Hardware gehört dem Nutzer zwar, aber sobald das Abonnement beendet wird, erhält der Nutzer keine Daten mehr und kann folglich die Hardware nicht mehr verwenden. Der Vorteil des Abonnements ist, dass der Anbieter jegliche Wartungen übernimmt und bei Problemen einen Support zur Verfügung stellt. Außerdem liegt die Verantwortung für die Daten beim Anbieter.⁷⁸⁷⁹⁸⁰⁸¹

Umweltparameter: Temperatur, Luftfeuchte, PM₁₀, PM_{2,5}, NO₂ und O₃ können von Sensoren dieser Kategorie gemessen werden, von einigen Anbietern können auch Luftdruck, CO, CO₂, NO, SO₂ und VOC gemessen werden.⁸²⁸³

⁷⁸ Breeze Technologies (2020)

⁷⁹ Interview mit Robert Heinecke, 22.05.2020

⁸⁰ Hawa Dawa GmbH (2020)

⁸¹ Interview mit Karim Tarraf, 26.05.2020

⁸² Breeze Technologies (2020)

⁸³ Hawa Dawa GmbH (2020)

LoRaWAN-Kompatibilität: Ja, bereits integriert.⁸⁴⁸⁵

Aufwand für die Implementierung: Der Aufwand bei diesen Komplettlösungen ist minimal, da weder Hardware- noch Softwarekonfigurationen vorgenommen werden müssen. Das Gehäuse muss anhand der Montageanleitung montiert und an eine Stromquelle angeschlossen werden und kann dann direkt verwendet werden.⁸⁶⁸⁷

Genauigkeit: Nach Inbetriebnahme benötigen die Sensoren ein paar Tage, um richtig kalibriert zu werden. Dann versprechen die Anbieter eine hohe Genauigkeit, die durch regelmäßige Kalibrierungen und Datenaufbereitungen sichergestellt werden. Dennoch gibt es keine Feldexperimente zur Genauigkeit dieser Sensoren. Daher kann nicht mit Sicherheit gesagt werden, wie die Genauigkeit dieser Sensoren im Verhältnis zu den anderen Kategorien abschneiden würde.⁸⁸⁸⁹⁹⁰⁹¹

⁸⁴ Breeze Technologies (2020)

⁸⁵ Hawa Dawa GmbH (2020)

⁸⁶ Interview mit Robert Heinecke, 22.05.2020

⁸⁷ Interview mit Karim Tarraf, 26.05.2020

⁸⁸ Breeze Technologies (2020)

⁸⁹ Interview mit Robert Heinecke, 22.05.2020

⁹⁰ Hawa Dawa GmbH (2020)

⁹¹ Interview mit Karim Tarraf, 26.05.2020

4 Konzeption

4.1 Ablaufdiagramm

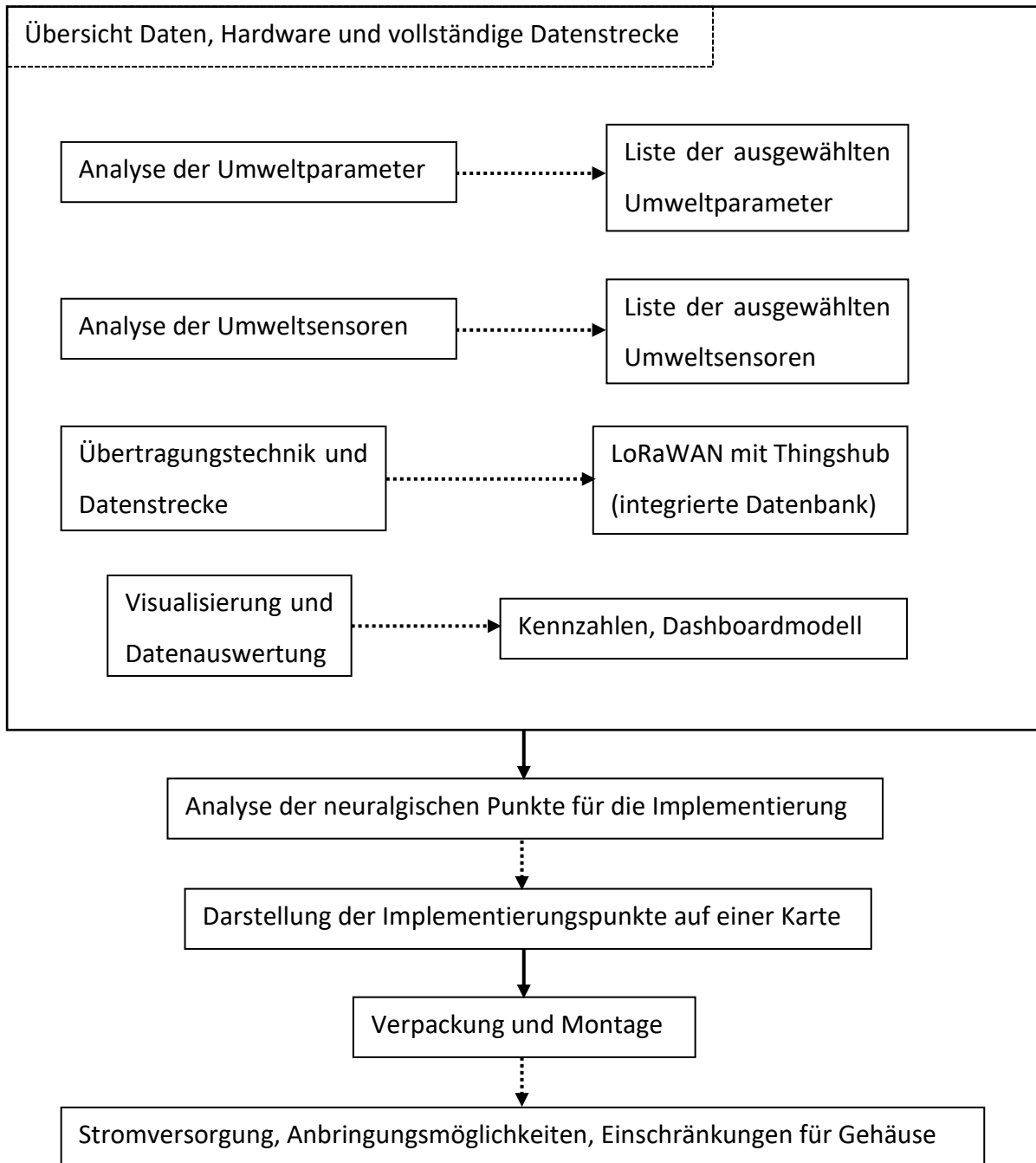


Abbildung 6: Ablaufdiagramm des Konzepts

4.2 Auswahl der Umweltparameter

Für die Auswahl geeigneter Umweltparameter werden zunächst in Zusammenarbeit mit WISTA Anforderungen definiert. Die Umweltparameter werden dann in einer Matrix anhand der Anforderungen bewertet.

Die erste Anforderung ist, dass es festgelegte Grenzwerte der EU für die Umweltparameter gibt, und zwar für den Gehalt des jeweiligen Parameters in der Luft, nicht für die Emission. Die zweite Anforderung ist, dass der jeweilige Parameter zumindest teilweise durch den Kraftfahrzeugverkehr erzeugt wird. Die dritte Anforderung ist, dass er eine Relevanz für Gesundheitsschädigung von Menschen hat. Damit die Genauigkeit der Messwerte überprüft werden kann, ist die vierte Anforderung, dass es eine lokale Referenzstation in Berlin gibt, die den jeweiligen Wert validieren kann. Da sich an Messstationen vom Land Berlin orientiert werden soll, ist die fünfte Anforderung, dass der Parameter ein Teil des LQI des Land Berlins ist.

	EU-Grenzwert	Messwert einer Referenzstation	Teil des LQI Berlin	Durch Verkehr erzeugt	Potenziell gesundheits-schädigend	Score
PM₁₀	X	X	X	X	X	5
PM_{2,5}	X			X	X	1
CO	X	X	X	X	X	5
CO₂				X	X	2
O₃	X	X	X	X	X	5
NO₂	X	X	X	X	X	5
NO_x	X	X		X	X	4
SO₂	X	X		X	X	4
Toluol		X		X	X	3
Benzol	X	X		X	X	4
VOC				X	X	2

Tabelle 4: Matrix der Umweltparameter und ihren Anforderungen

NO₂, O₃, CO und PM₁₀ erfüllen alle Anforderungen und sind daher am besten geeignet. Es sind außerdem genau die Parameter, die für die Berechnung des LQI des Landes Berlin verwendet werden. Die Auswahl der Parameter kann eventuell von der Auswahl der Sensoren

eingeschränkt werden, sofern es keine entsprechenden Sensoren gibt, die den Anforderungen entsprechen.

4.3 Auswahl der Sensoren

In diesem Unterkapitel werden zunächst die Anforderungen an die Sensoren definiert. Dann werden die möglichen Sensoren der jeweiligen Preisklassen erklärt. Mithilfe einer Nutzwertanalyse wird dann der Nutzwert jeder Kategorie ermittelt, die Kategorie bzw. Sensoren mit dem höchsten Gesamtnutzwert werden ausgewählt. Da es einige KO-Kriterien gibt, wird eine Vorauswahl durchgeführt. Nur die Sensoren, die die Vorauswahl bestehen, werden in der Nutzwertanalyse bewertet.

4.3.1 Vorauswahl und Nutzwertanalyse

Im Folgenden werden die Anforderungen der WISTA an die Sensoren erläutert. Einige Anforderungen, die das implementierungsfertige Sensorpaket erfüllen muss, werden hier nicht als MUSS-Anforderung gesehen, da sie auch durch eigenen Aufwand im Nachgang hinzugefügt werden können und daher nicht vom Sensoranbieter erfüllt werden müssen. Die hier als MUSS-Anforderungen definierten Kriterien sind KO-Kriterien, ohne deren Erfüllung der Anbieter grundsätzlich nicht geeignet ist.

MUSS-Anforderungen:

- Gesamtkosten nicht über 1000€ (für eine Ausführung des kompletten Sensorpakets)
- Grundsätzliche Eignung für die Verwendung im Außenbereich
- Kompatibilität mit der Übertragungstechnik LoRaWAN
- Keine Herstellerbindung
- Folgenden Parameter können gemessen werden: NO₂, O₃, CO, PM₁₀
- Liefert Messwerte in 1-stündiger Frequenz

Sonstige Anforderungen:

- Hohe Genauigkeit der Messwerte
- Gesamtpaket nicht größer als 50x50x50 cm
- Liefert Messwerte in 15-minütiger Frequenz
- Eignung für eine langfristige Einsatzzeit
- Geringer Stromverbrauch
- Geringer Wartungsaufwand: maximal einmal jährlich
- Gehäuse
- Montage
- Integrierte Stromversorgung
- Hohe Konfigurationsmöglichkeiten

Kategorie sehr günstig:

Angebote von Sensoren der Kategorie sehr günstig beinhalten nur die Sensormodule mit minimaler Elektronik, was bedeutet, dass keine zusätzlichen Extras wie Übertragungstechnik, Programmierung, Gehäuse, Kalibrierung inklusive sind. Es bedeutet aber auch, dass keine Herstellerbindung besteht und alles weitere uneingeschränkt vom Anwender definiert und umgesetzt werden kann. Der Gesamtpreis liegt bei weit unter der festgelegten Obergrenze von 1000€ bei ca. 70€. Die Haupteinschränkung ist, dass keine individuellen Gase gemessen werden können, sondern nur VOCs.

Kategorie günstig:

Analog zu Kategorie sehr günstig beinhalten Angebote von Sensoren der Kategorie günstig nur minimale Elektronik und keine zusätzlichen Extras wie Übertragungstechnik, Programmierung, Gehäuse, Kalibrierung. Auch besteht keine Herstellerbindung und alles kann uneingeschränkt vom Anwender definiert und umgesetzt werden, was einen hohen initialen Konfigurationsaufwand bedeutet. Zur Genauigkeit der Sensoren gibt es keine relevanten Erfahrungswerte. Die Kosten hängen von der Anzahl Sensoren und Zusätzen, wie z.B. eine LoRaWAN Antenne, ein Mikrocontroller und ein Gehäuse ab. Der Gesamtpreis sollte aber weit unter 1000€ in einem Bereich zwischen 100€ und 200€. Anders als bei Kategorie sehr günstig

können die Sensoren der Kategorie günstig grundsätzlich individuelle Gase messen. Zwar gibt es nicht für jeden Parameter einen Sensor, aber alle 4 gewünschten Parameter können individuell gemessen werden.

Kategorie mittelteuer:

Ein Anbieter der Kategorie mittelteuer ist Alphasense Ltd. Die Sensoren von Alphasense ähneln den Kategorien sehr günstig und günstig, in dem Sinne, dass kein Gehäuse und auch keine Montage inkludiert ist. Zusätzlich zu den Sensoren, die die gewünschten Umweltparameter CO, NO₂, O₃, PM₁₀ und SO₂ messen, bietet Alphasense ein Analogue Front End, auf das die Gassensoren zu einem Gesamtmodul zusammengesteckt werden. Dieses Modul sowie der PM-Sensor müssen dann noch an einen Mikrocontroller montiert und programmiert werden. Dazu bietet Alphasense Software und Dokumentation. Wie bei den Kategorien sehr günstig und günstig besteht keine Herstellerbindung und diese flexible Handhabung der Sensoren bietet die Möglichkeit die Messfrequenz selbstständig einzustellen, LoRaWAN Komponenten zu verbauen, sowie eine Stromversorgung zu integrieren. Der Stromverbrauch der Gassensoren ist gering, der PM-Sensor hat einen Lüfter und benötigt daher etwas mehr Strom. Im Gegensatz zu den Sensoren der Kategorien sehr günstig und günstig sind Sensoren von Alphasense bereits kalibriert und sollten daher eine höhere Genauigkeit erzielen können, aber auch hier gibt es keine validierten Erfahrungswerte. Die Kalibrierung müsste außerdem regelmäßig wiederholt werden. Die Sensoren sind klein, aber da es auf die Anzahl Sensoren ankommt und kein festes Gehäuse inkludiert ist, kann hier nur geschätzt werden, aber es wird kleiner als 50 x 50 x 50 cm sein. Die Kosten sind ebenfalls variabel. Der PM-Sensor kostet 344€, die Gassensoren jeweils 48€ bzw. 50€ (für O₃) und die Analogue Front End für zwei Gase 124€, für drei Gase 134€ und für vier Gase 152€. Für drei Gassensoren (inklusive O₃) und einen PM-Sensor wären die Kosten 344€ + 134€ + (48€ + 48€ + 50€) = 624€. Die Kosten pro Parameter wären entsprechend 624€ / 4 = 156€ oder bei ein individuellen Betrachtung des PM-Sensors, läge der Preis pro Parameter der Gassensoren bei (134€ + 48€ + 48€ + 50€) / 3 = 93,33€. Dazu kommen noch das Gehäuse, sowie ein Mikrocontroller und LoRaWAN Zubehör. Insgesamt wird die Schwelle von 1000€ voraussichtlich nicht überschritten.

Kategorie mittelteure Komplettlösungen:

Für Sensoren der Kategorie mittelteure Komplettlösungen gibt es verschiedene Anbieter, im Folgenden werden zwei dieser Anbieter genauer erklärt.

Breeze Technologies bietet ein fertiges Sensorpaket, das die gewünschten Umweltparameter CO, NO₂, O₃, SO₂, PM₁₀ misst, sowie die Umgebungsparameter Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Es wird inklusive Gehäuse mit einer Größe von ca. 18 x 10 x 10 cm geliefert und für einen Aufpreis kann auch die Montage übernommen werden. Es besteht eine Herstellerbindung, da die Sensoren die Daten in Echtzeit an eine Cloud von Breeze Technologies sendet, die Daten dort kalibriert werden und dann an die WISTA im ausgewählten Format, z.B. Excel, geliefert werden. Eine Einbindung der Daten über eine Programmierschnittstelle ist ebenfalls möglich. Die Messfrequenz der Daten liegt im einminütigen Bereich und übertrifft somit die Anforderung von 15-minütig. Die Voraussetzungen für LoRaWAN als Übertragungstechnik sind gegeben, dafür müsste das lokale LoRaWAN-Netz eingebunden werden. Außerdem bietet Breeze Technologies auch eine Auswertung und grafische Darstellung der Daten an. Nach der Implementierung braucht das Sensorpaket etwa 2-7 Tage, um sich auf die Umgebung einzustellen und richtig kalibriert zu werden, um eine hohe Genauigkeit der Daten zu erlangen. Das Sensorpaket ist für den Außenbereich geeignet, allerdings muss eine Stromquelle in der Nähe sein, da keine autarke Stromversorgung inkludiert ist. Der Stromverbrauch beträgt ca. 4,5-4,7 Watt. Die Gesamtkosten beinhalten eine initiale Zahlung von 1000€ und dann jährliche Kosten von 990€. Eine minimale Laufzeit von einem Jahr kostet entsprechend 1990€. Eventuelle Wartungskosten sind darin enthalten.

Hawa Dawa bietet ebenfalls eine Komplettlösung, die die Umweltparameter NO₂, O₃ und PM₁₀ sowie die Umgebungsparameter Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchte misst. Geliefert werden die Sensoren mit einem ca. 40 x 30 x 10 cm großem Gehäuse und einer Montageanleitung. Die Sensoren sind bereits kalibriert und bieten eine hohe Genauigkeit der Daten, welche regelmäßig von Hawa Dawa überprüft wird. Eine Übertragung der Daten per LoRaWAN wird als Standard angeboten. Die Messfrequenz beträgt einmal pro Stunde. Die Daten können über eine Datenmanagement Plattform oder über eine Programmierschnittstelle abgerufen werden. Das Sensorpaket ist für den Außenbereich geeignet und enthält auch eine Batterie. Diese ist für den Einsatz von wenigen Stunden ausreichend, für eine langfristige Einsatzzeit muss es jedoch an eine dauerhafte

Stromversorgung angebunden werden. Es besteht eine Herstellerbindung und die Gesamtkosten dieser Lösung betragen 2500€ pro Jahr.

Vorauswahl anhand der MUSS-Anforderungen:

Alle Anforderungen müssen erfüllt werden, damit der Anbieter infrage kommt. Anforderung erfüllt = 1 Punkt und Anforderung nicht erfüllt = 0 Punkte.

MUSS-Anforderung	Kategorie sehr günstig	Kategorie günstig	Kategorie mittelteuer: Alphasense	Hawa Dawa	Breeze Technologies
LoRaWAN-kompatibel	1	1	1	1	1
Outdoor-geeignet	1	1		1	1
4 Messwerte aus {NO ₂ , NO _x , O ₃ , CO, PM ₁₀ , SO ₂ , Benzol}	0	1	1	1	1
Kosten < 1000€	1	1	1	0	0
Keine Herstellerbindung	1	1	1	0	0
Messfrequenz: min. 1-stündig	1	1	1	1	1
Summe:	5	6	6	4	4

Tabelle 5: Analyse der MUSS-Anforderungen

Nutzwertanalyse:

Die beiden Gewinner der Vorauswahl, Kategorie günstig und Kategorie mittelteuer: Alphasense werden nun anhand der Anforderungen bewertet. Wobei sich die Punktzahl je nach Erfüllungsgrad zwischen 0 und 1 befindet. Ist der Erfüllungsgrad unbekannt, so steht in dem Feld ein Fragezeichen.

Anforderung	Kategorie günstig	Kategorie mittelteuer: Alphasense
Hohe Genauigkeit der Messwerte	?	?
Größe des gesamten Sensorpaketes	1	1
Messfrequenz	1	1
Langfristige Einsatzzeit	1	1
Geringer Stromverbrauch	0,75	0,5
gering Wartungsaufwand (max. einmal jährlich)	1	1
Inkludiertes Gehäuse	0	0
Montage durch Anbieter	0	0
Integrierte Stromversorgung	0	0
Konfigurationsmöglichkeiten	0,5	1
Geringe Kosten	1	0,5
Summe:	6,25	6

Tabelle 6: Bewertung der Anforderungen je Kategorie

Diese Summen sind basieren auf der Annahme, dass alle Anforderungen gleich relevant sind. Für eine genauere Bewertung werden die Anforderungen im nächsten Schritt gewichtet. Diese Gewichtung sollte, um die Objektivität der Analyse zu gewährleisten, erst nach der Anforderungsdefinition durchgeführt werden. Dazu werden die zur Verfügung stehenden 100% auf die einzelnen Anforderungen aufgeteilt. Die Gewichtung der Anforderungen wird in Tabelle 7 dargestellt.

Anforderung	Gewichtung
Hohe Genauigkeit der Messwerte	15,00 %
Größe des gesamten Sensorpaketes	7,50 %
Messfrequenz	7,50 %
Langfristige Einsatzzeit	10,00 %
Geringer Stromverbrauch	10,00 %
gering Wartungsaufwand (max. einmal jährlich)	12,50 %
Inkludiertes Gehäuse	5,00 %
Montage durch Anbieter	2,50 %

Integrierte Stromversorgung	7,50 %
Konfigurationsmöglichkeiten	10,00 %
Geringe Kosten	12,50 %
Summe:	100,00 %

Tabelle 7: Gewichtung der Anforderungen

Im letzten Schritt werden die jeweiligen Gewichtungen der Anforderungen mit den Punktzahlen der Kategorien multipliziert und pro Kategorie aufsummiert. Das Ergebnis ist der Prozentsatz, zu dem die Kategorie bzw. der Anbieter die spezifischen Anforderungen an das Projekt erfüllen. Werden für die Bewertung Punktzahlen außerhalb von 0-1 gewählt, so müssen die Ergebnisse normiert werden, um den Prozentsatz der Gesamtanforderungserfüllung abzubilden.

Anforderung	Gewichtung	Kategorie günstig	Kategorie mittelteuer: Alphasense
Hohe Genauigkeit der Messwerte	15,00 %	?	?
Größe des gesamten Sensorpaketes	7,50 %	1	1
Messfrequenz	7,50 %	1	1
Langfristige Einsatzzeit	10,00 %	1	1
Geringer Stromverbrauch	10,00 %	0,75	0,5
gering Wartungsaufwand (max. einmal jährlich)	12,50 %	1	1
Inkludiertes Gehäuse	5,00 %	0	0
Montage durch Anbieter	3,00 %	0	0
Integrierte Stromversorgung	7,50 %	0	0
Konfigurationsmöglichkeiten	10,00 %	0,5	1
Geringe Kosten	12,00 %	1	0,5
Summe:	100,00 %	0,625	0,58

Tabelle 8: Berechnung der Nutzwerte der Kategorien

Hier erfüllt Kategorie günstig die Anforderungen zu 62,5 % und der Anbieter Alphasense (Kategorie mittelteuer) zu 58 %. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass die Anforderung der Genauigkeit der Messwerte nicht mit einbezogen wurden.

Die Ergebnisse der beiden Kategorien liegen 0,045 Punkt auseinander. Die Anforderung der Genauigkeit ist jedoch bei beiden Sensoren fraglich. Da die Gewichtung dieser Anforderung mit 15,00 % sehr hoch ist, kann sie das Ergebnis maßgeblich beeinflussen. Deshalb soll ein Feldtest durchgeführt werden.

4.3.2 Feldtest der Genauigkeit

Die Genauigkeit ist ein Faktor, der für die Bewertung der Sensoren eine große Bedeutung hat. Da es in der Literatur bisher nur wenige Erfahrungswerte gibt, soll die Genauigkeit der Sensoren sowie ihre Konsistenz unter verschiedenen meteorologischen Bedingungen mithilfe eines Feldexperiments getestet werden.

In Anlehnung an die Vergleichskalibrierung werden die Sensoren der Kategorie mittelteuer von Alphasense und die Sensoren der Kategorie günstig für etwa 7 Tage vom 12.11.2020 bis zum 19.11.2020 direkt auf dem Dach eine offizielle Messstation mit zertifizierten Werten montiert. Die verwendete Referenzstation ist der Messwagen 088 des Berliner Luftgüte Messnetz und Luftdaten (BLUME) und befindet sich direkt an der Leipziger Str. vor Hausnummer 20 in Berlin-Mitte. Es handelt sich hier um eine mehrspurige Hauptverkehrsstraße im Innenstadtbereich mit hohem Verkehrsaufkommen.

Für den technischen Aufbau wird die Datenstrecke mit TTN (siehe Kapitel 4.4.2) in Verbindung mit einem Raspberry Pi verwendet. Da es aufgrund der Entfernung zum nächsten LoRaWAN Gateway leider nicht möglich ist eine stabile, lückenlose Übertragung per LoRaWAN zu gewährleisten, werden die Daten zusätzlich auf einer SD-Karte gespeichert. Es wurde im 1-Minuten-Intervall gemessen.

Die Referenzstation stellt die korrespondierenden zertifizierten Messwerte zur Verfügung. Die höchste mögliche Frequenz ist im 5-Minuten-Intervall. Für die Auswertung werden die gemessenen Werte daher ebenfalls in 5-Minuten-Intervalle zusammengefasst. Dafür wird jeweils der Durchschnitt von fünf Werten gebildet. Für 15:30 Uhr beispielsweise der Durchschnitt der Messwerte von 15:26 Uhr, 15:27 Uhr, 15:28 Uhr, 15:29 Uhr und 15:30 Uhr.

Um einen Vergleich zwischen Referenz- und Messdaten herzustellen, müssen die Daten in einheitliche Maßeinheiten umgerechnet werden, die Zieleinheit ist jeweils die der Referenzdaten.

	PM₁₀	NO₂	O₃	CO
Messdaten Alphasense	µg/m ³	ppb	ppb	ppb
Messdaten Kategorie günstig	µg/m ³	ppm	ppb	ppm
Referenzdaten	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	mg/m ³

Tabelle 9: Übersicht der Maßeinheiten der Mess- und Referenzdaten

Die Umrechnung von ppb (parts per billion, also $1/10^9$) und ppm (parts per million, also $1/10^6$) nach $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Mikrogramm pro Kubikmeter) hängt von der Molmasse (M) des jeweiligen Stoffes ab. Die Formel ist $\mu\text{g}/\text{m}^3 = (\text{ppb}) * (12,187) * (M) / (273,15 + 20^\circ\text{C})$, dabei wird analog zu den Berechnungen der Referenzwerte des BLUME von einem Luftdruck von 1 atm (physikalische Atmosphäre), was 101.325 kPa (Kilo Pascal) entspricht, und einer Temperatur von 20°C ausgegangen. Weiterhin ist $1 \text{ ppm} = 1000 \text{ ppb}$. Die Molmassen M sind $\text{O}_3 = 48 \text{ g/mol}$, $\text{CO} = 28,01 \text{ g/mol}$ und $\text{NO}_2 = 46,0055 \text{ g/mol}$.

Für die Auswertung muss zunächst überprüft werden, ob Daten gesendet wurden und wenn ja, ob diese plausibel sind, nur dann können sie verwendet werden. Der Feinstaubsensor der Kategorie günstig hat ab 14.11.2020 19:27 Uhr nur noch den Wert 0 geliefert. Da er bis dahin konstant Werte zwischen 29 und 87 geliefert hat, ist von einem Fehler am Sensor auszugehen. Außerdem wurden einzelne Werte, die außerhalb des vom Sensor möglichen Messbereichs liegen, manuell von der Auswertung ausgeschlossen. Weiterhin muss definiert werden, wie die Genauigkeit ausgewertet wird. Am wichtigsten ist dabei, dass Trends und Tendenzen abgebildet werden können. Dafür werden Trendlinie der Mess- und Referenzwerte gebildet und ausgewertet, ob z.B. Hoch- und Tiefpunkte analog verlaufen. Als zusätzliche Kennzahl wird die durchschnittliche absolute Abweichung von den Referenzwerten gewählt. Dazu wird zunächst für jeden gemessenen Wert die Abweichung vom Referenzwert gemessen, also $\text{ABS}(\text{Messwert} - \text{Referenzwert})$, dann wird der Mittelwert all dieser Abweichungen berechnet.

Für die endgültige Auswertung der Nutzwertanalyse wird für jeden Parameter und Sensor eine Punktzahl zwischen 0 und 1 festgelegt. Pro Kategorie wird dann der Durchschnitt aus den vier Parametern berechnet und als Punktzahl vergeben.

NO₂:

Die folgende Abbildung zeigt einen 24 Stunden Ausschnitt der NO₂ Daten des Referenztests zur Veranschaulichung.

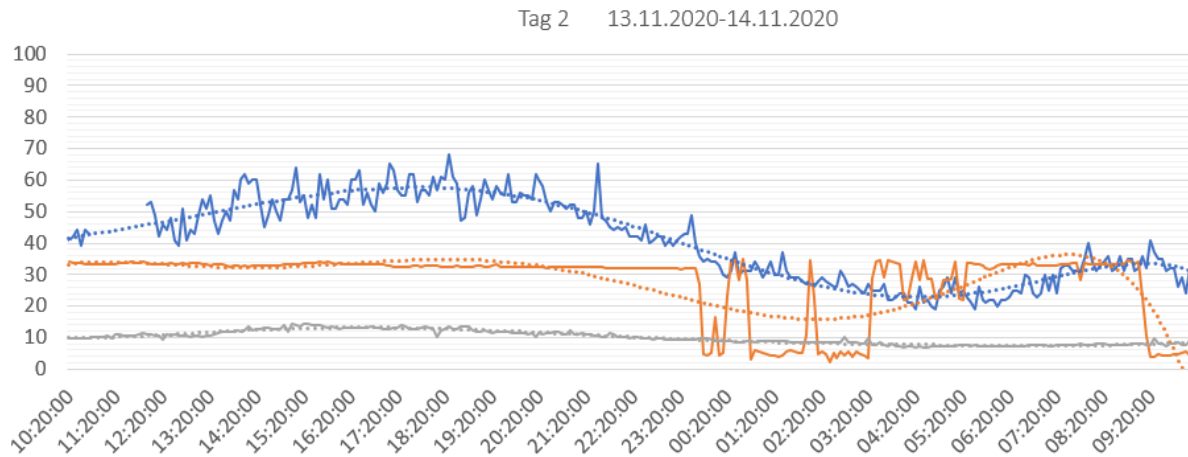


Abbildung 7: Referenztest NO₂

In blau sind die Referenzdaten, in orange die Daten des Alphasense NO₂ Sensors und in grau die Daten des günstigen Grove Multichannel Gassensors von einem Tag zu sehen. Jeweils als gepunktete Linie sind die polynomischen Trendlinien Grad 6 eingezeichnet.

Die Trendlinie der Referenzdaten hat zwei Hochpunkte gegen 19 Uhr und 9 Uhr und dazwischen einen Tiefpunkt gegen 5 Uhr, der Trend der Werte liegt etwa zwischen 42 µg/m³ und 58 µg/m³. Die Trendlinie des Alphasense NO₂ Sensors ist zunächst linear und beginnt dann zu sinken. Gegen 2:30 Uhr kommt es zum Tiefpunkt, gefolgt von einem Hochpunkt gegen 7:30 Uhr. Es ist also eine grob ähnliche Tendenz zu den Referenzdaten zu sehen, diese ist allerdings nicht konstant und die Hoch- und Tiefpunkte verlaufen versetzt zu den Referenzdaten. Die Messwerte des günstigen Grove Multichannel Gassensors weisen dagegen liegen insgesamt unter den Referenzdaten und schwanken fast gar nicht zwischen etwa 7 µg/m³ und 13 µg/m³. Es kann also kein signifikanter Zusammenhang erkannt werden.

Die durchschnittliche absolute Abweichung des Grove Multichannel Gassensors beträgt 22,13 µg/m³, während die durchschnittliche absolute Abweichung des Alphasense NO₂ Sensors 15,13 µg/m³ beträgt.

Der Alphasense Sensor schneidet also insgesamt besser ab, wenngleich seine Genauigkeit nicht sehr gut ist, und wird mit einer Punktzahl von 0,5 bewertet. Der Grove Multichannel Gassensors wird mit 0 Punkten bewertet.

O₃:

Die folgende Abbildung zeigt einen 24 Stunden Ausschnitt der O₃ Daten des Referenztests zur Veranschaulichung.

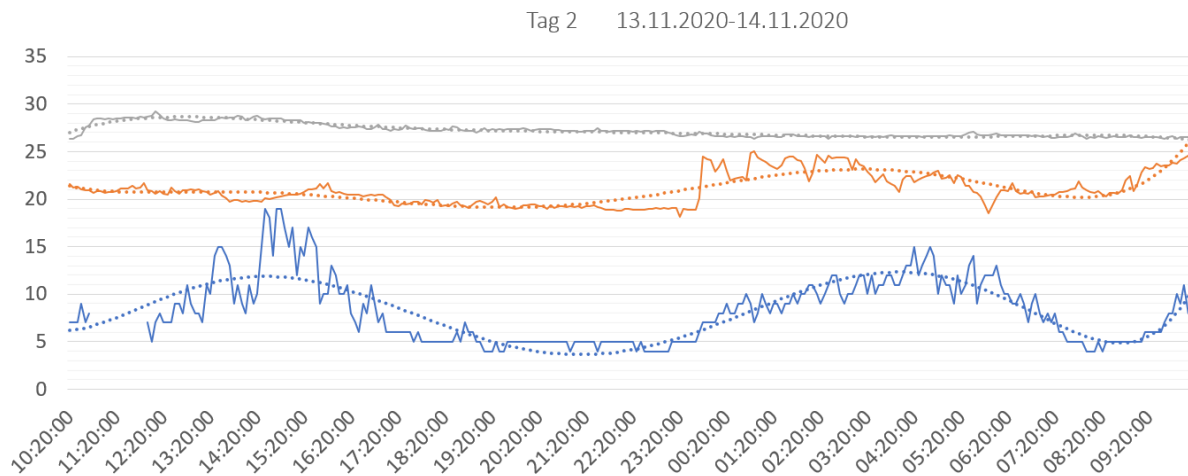


Abbildung 8: Referenztest O₃

In blau sind die Referenzdaten, in orange die Daten des Alphasense O₃ Sensors und in grau die Daten des günstigen MQ131 Ozon Gassensors von einem Tag zu sehen. Jeweils als gepunktete Linie sind die polynomischen Trendlinien Grad 6 eingezeichnet.

Die Trendlinie der Referenzdaten hat zwei Hochpunkte gegen 15 Uhr und 5 Uhr und zwei Tiefpunkte gegen 22 Uhr und 9:30 Uhr. Die Trendlinie des Alphasense O₃ Sensors verläuft zunächst relativ linear, ab etwa 1 Uhr steigt sie jedoch und spiegelt ab dann den zweiten Hoch- und Tiefpunkt der Referenzdaten wider, wobei die Tendenzen weniger ausgeprägt sind. Während die Differenz zwischen dem zweiten Hoch- und Tiefpunkt bei den Referenzdaten etwa 7,5 µg/m³ beträgt, so liegt diese Differenz bei den Messwerten des Alphasense O₃ Sensors nur bei etwa 3,5 µg/m³. Die Messwerte des günstigen MQ131 Ozon Gassensors weisen dagegen keine Hoch- und Tiefpunkte auf, sondern verläuft fast linear. Es kann also kein signifikanter Zusammenhang erkannt werden.

Die durchschnittliche absolute Abweichung des günstigen MQ131 Ozon Gassensors beträgt 12,22 µg/m³, während die durchschnittliche absolute Abweichung des Alphasense O₃ Sensors 9,74 µg/m³ beträgt.

Der MQ131 Ozon Gassensor wird mit 0 Punkten bewertet und der Alphasense O₃ Sensor mit 0,75 Punkten.

CO:

Bei CO gibt es die Besonderheit, dass die Referenzdaten in der Einheit mg/m^3 und mit nur einer Nachkommastelle geliefert werden. Daher wurden die Messdaten zunächst ebenfalls in dieses Format umgeformt. Die Rundung der Messwerte führt dabei zu einer weniger detaillierten Auswertung, wie bei den anderen Parametern. Die folgende Abbildung zeigt einen 24 Stunden Ausschnitt der CO Daten des Referenztests zur Veranschaulichung.

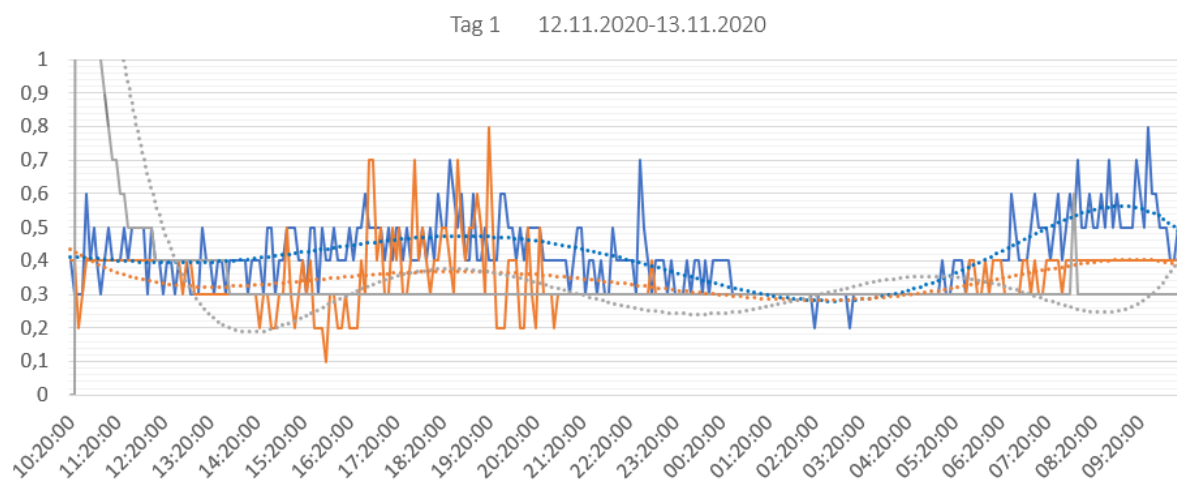


Abbildung 9: Referenztest CO

In blau sind die Referenzdaten, in orange die Daten des Alphasense CO Sensors und in grau die Daten des günstigen Grove Multichannel Gassensors von einem Tag zu sehen. Jeweils als gepunktete Linie sind die polynomischen Trendlinien Grad 6 eingezeichnet.

Die Trendlinie der Referenzdaten hat zwei Hochpunkte gegen 19 Uhr und 9 Uhr und dazwischen einen Tiefpunkt gegen 3 Uhr. Die Trendlinie des Alphasense CO Sensors zeigt diese Punkte ebenfalls, allerdings nicht so ausgeprägt. Während die Differenz zwischen dem ersten Hochpunkt und dem Tiefpunkt bei den Referenzdaten etwa $0,2 \text{ mg}/\text{m}^3$ und zwischen dem Tiefpunkt und dem zweiten Hochpunkt etwa $0,28 \text{ mg}/\text{m}^3$ beträgt, so liegen diese Differenzen bei den Messwerten des Alphasense CO Sensors nur bei etwa $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$ und $0,12 \text{ mg}/\text{m}^3$. Die Messwerte des günstigen Grove Multichannel Gassensors weisen dagegen mehrere Hoch- und Tiefpunkte auf, die manchmal Ähnlichkeiten mit den Referenzdaten aufweist, wie bei dem ersten Hochpunkt. Beim zweiten Hochpunkt der Referenzdaten weisen die Messwerte des günstigen CO Sensors allerdings einen Tiefpunkt auf. Es kann also kein signifikanter Zusammenhang erkannt werden.

Die durchschnittliche absolute Abweichung des Grove Multichannel Gassensors beträgt $0,11633 \text{ mg/m}^3$, während die durchschnittliche absolute Abweichung des Alphasense CO Sensors $0,07873 \text{ mg/m}^3$ beträgt.

Der Grove Multichannel Gassensor wird mit 0 Punkten bewertet und der Alphasense CO Sensor mit 0,75 Punkten.

PM₁₀:

Die folgende Abbildung zeigt einen 24 Stunden Ausschnitt der PM₁₀ Daten des Referenztests zur Veranschaulichung. Es wurden jeweils die Daten pro Stunde gemittelt.

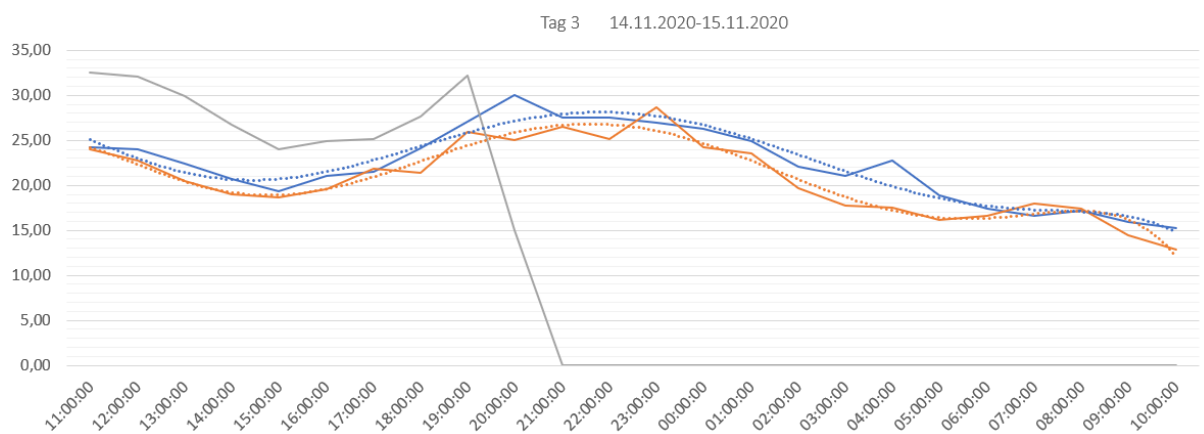


Abbildung 10: Referenztest PM₁₀

In blau sind die Referenzdaten, in orange die Daten des Alphasense PM Sensors und in grau die Daten des günstigen Grove Laser PM Sensors von einem Tag zu sehen. Jeweils als gepunktete Linie sind die polynomischen Trendlinien Grad 6 eingezeichnet. Die Trendlinie des Grove Laser PM Sensors wurde hier weggelassen, weil sie durch den Fehler des Sensors ab 21 Uhr verzerrt würde. Aus diesem Grund wurde ebenfalls hier eine Mittelung pro Stunde gewählt, da so die Werte des günstigen Grove Laser PM Sensors etwas geglättet werden und auch ohne Trendlinie die Trends gut erkennbar sind.

Die Trendlinie der Referenzdaten hat einen Tiefpunkt gegen 15 Uhr und einen Hochpunkt gegen 22 Uhr. Die Werte des Alphasense PM Sensor weichen nur gering von den Referenzdaten ab und die Trendlinie des Alphasense PM Sensors verläuft sehr ähnlich wie die der Referenzdaten und zeichnet die Hoch- und Tiefpunkte entsprechend ab. Die Messwerte des günstigen Grove Laser PM Sensors sind etwas höher (etwa $5-8 \text{ µg/m}^3$), verlaufen im Trend aber zunächst analog zu den Referenzdaten und zeigen auch einen Tiefpunkt um 15 Uhr. Ab

21 Uhr misst der Sensor allerdings konstant den Wert 0, es ist von einem Fehler am Sensor auszugehen.

Die durchschnittliche absolute Abweichung des Alphasense PM Sensors beträgt $5,96 \mu\text{g}/\text{m}^3$, während die durchschnittliche absolute Abweichung des Grove Laser PM Sensors $10,85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ beträgt. Der schlechtere Wert des Grove Laser PM Sensors lässt sich auf den Fehler des Sensors zurückführen.

Der Grove Laser PM Sensor wird mit 0,9 Punkten bewertet und der Alphasense PM Sensor mit 1 Punkt.

4.3.3 Ergebnisse

Der letzte Schritt der Nutzwertanalyse wird nun unter Einbindung der Feldtestergebnisse wiederholt und die Nutzwerte der Kategorien neu berechnet.

Anforderung	Gewichtung	Kategorie günstig	Kategorie mittelteuer: Alphasense
Hohe Genauigkeit der Messwerte	15,00 %	0,225	0,75
Größe des gesamten Sensorpaketes	7,50 %	1	1
Messfrequenz	7,50 %	1	1
Langfristige Einsatzzeit	10,00 %	1	1
Geringer Stromverbrauch	10,00 %	0,75	0,5
gering Wartungsaufwand (max. einmal jährlich)	12,50 %	1	1
Inkludiertes Gehäuse	5,00 %	0	0
Montage durch Anbieter	3,00 %	0	0
Integrierte Stromversorgung	7,50 %	0	0
Konfigurationsmöglichkeiten	10,00 %	0,5	1
Geringe Kosten	12,00 %	1	0,5
Summe:	100,00 %	0,65875	0,6925

Tabelle 10: Berechnung der Nutzwerte der Kategorien (inklusive Genauigkeit)

Hier erfüllt Kategorie günstig die Anforderungen zu 65,875 % und der Anbieter Alphasense (Kategorie mittelteuer) zu 69,25 %.

Folglich erfüllen die Sensoren von Alphasense (Kategorie mittelteuer) die Anforderungen in höherem Maße und werden für die Implementierung in Adlershof ausgewählt. Die Sensoren werden in der folgenden Tabelle 11 dargestellt.

Parameter	Sensor	Kategorie	Preis
PM ₁₀	Alphasense OPC-N3	mittelteuer	344,00 €
CO	Alphasense CO-A4	mittelteuer	92,67 €
NO ₂	Alphasense NO2-A43F	mittelteuer	92,67 €
O ₃	Alphasense OX-A431	mittelteuer	94,67 €

Tabelle 11: Übersicht ausgewählte Sensoren für die Implementierung

4.4 Übertragungstechnik und Datenstrecke

Die Umweltparameter werden im Außenbereich von den Sensoren gemessen und müssen zur weiteren Verwendung der Daten an eine Datenbank weitergeleitet werden. Die folgenden Daten sollen mit einer 15-minütigen Frequenz übertragen werden.

Messwert	Datentyp	Größe
PM ₁₀	Integer	2 Byte
CO	Integer	2 Byte
NO ₂	Integer	2 Byte
O ₃	Integer	2 Byte

Tabelle 12: Übersicht Datenformat

Die Messwerte sind nur für die Übertragung vom Datentyp Integer, da sie so weniger Bytes benötigen. Dafür werden die Messwerte der Sensoren mit 100 multipliziert. Nach der Übertragung werden die Messwerte entsprechend durch 100 dividiert, um Float Werte mit zwei Nachkommastellen zu erhalten.

Mögliche Übertragungstechniken, die auch von den meisten Anbietern für Komplettlösungen angeboten werden, wären unter Anderem Mobilfunk, WLAN oder LoRaWAN. Hier wurde LoRaWAN gewählt, da es eine hohe Reichweite hat, sehr kostengünstig und mit geringem Aufwand verbunden ist. Da es sich um ein Outdoor-Projekt handelt, kann eine ausreichende

WLAN-Verbindung nicht gewährleistet werden. Mobilfunk wäre ebenfalls möglich, aber mit höheren Kosten verbunden und jedes Gerät müsste eine SIM-Karte enthalten, was eventuelle Wartungen nach sich zieht. Außerdem gibt es mehrere LoRaWAN Gateways in Adlershof.

LoRaWAN basiert auf dem Low-Power Wide-Area-Network (LPWAN) Protokoll, welches insbesondere für die Verwendung bei Internet-of-Things (IoT) Lösungen konzipiert wurde, da es wenig Energie benötigt, geringe Komplexität und eine hohe Reichweite hat,⁹² die in urbanen Gegenden 2-5 km, in der Vorstadt etwa 15 km und in ländlichen Gegenden bis zu 45 km beträgt.⁹³ Es gibt mehrere Anbieter von LPWAN Netzwerken, allerdings ist LoRaWAN sehr verbreitet, da es ein offenes Lizenzmodell und einfache Einbindung von Geräten bietet, was es auch für Privatanutzer attraktiv macht.⁹⁴

Eine klassische LoRaWAN Netzwerk Architektur besteht aus den Sensoren, dem Gateway und dem Server.⁹⁵

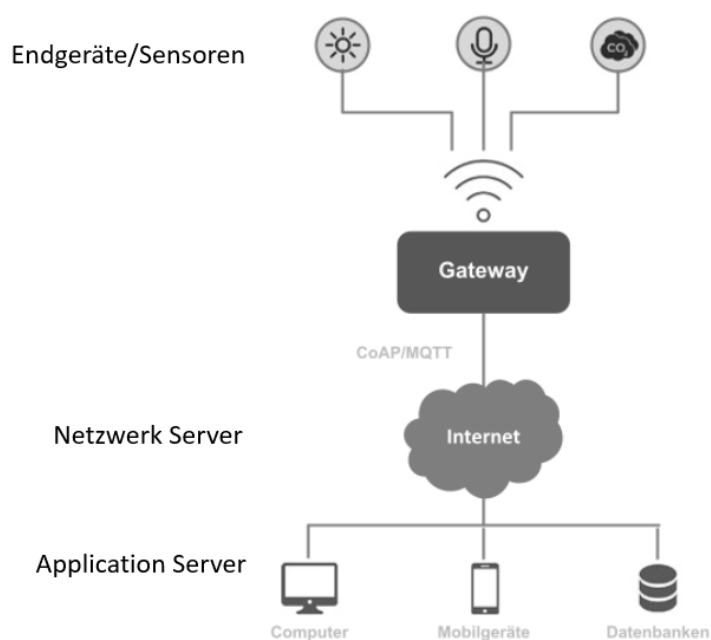


Abbildung 11: Beispiel LoRaWAN Architektur

(Quelle: Linnemann, Sommer & Leufkes, 2019, S. 12)

Es ist als Sterntopologie aufgebaut, sodass die Endgeräte bzw. Sensor nur mit dem Gateway kommunizieren können und nicht miteinander. Das Endgerät kann Datenpakete an ein nahegelegenes Gateway leiten, welches diese dann an einen zentralen Netzwerk Server weiterleitet.⁹⁶ Das Gateway fungiert hier als Schnittstelle zum Internet. Vom Netzwerk Server aus werden die Datenpakete nun an die jeweiligen Application Server verteilt. Dieser Prozess wird uplink

genannt und ist der häufigste Vorgang im LoRaWAN Netzwerk. Die Kommunikation ist allerdings bidirektional und auch der Server kann Datenpakete via downlink zu den

⁹² Haxhibeqiri, Poorter, Moerman und Hoebeke (2018, S. 1)

⁹³ J. de Carvalho Silva, J. J. P. C. Rodrigues, A. M. Alberti, P. Solic und A. L. L. Aquino (2017, S. 3)

⁹⁴ Linnemann, Sommer und Leufkes (2019, S. 18-23)

⁹⁵ Linnemann et al. (2019, S. 25)

⁹⁶ Haxhibeqiri et al. (2018, S. 4)

Endgeräten schicken. Zur Sicherstellung des Datenschutzes werden die Daten mit einer 128 Bit AES Verschlüsselung versehen.⁹⁷

Für den Konfigurationsaufwand des Projektes bedeutet das, dass die Sensoren in ein funktionierendes LoRaWAN-Netzwerk eingebunden werden müssen, um die Fähigkeit zu haben, Daten mittels LoRaWAN zu versenden. Dafür wird hardwareseitig ein LoRa-Modul sowie eine LoRa-Antenne benötigt, über welche die Sensordaten an das nächstgelegene LoRa-Gateway gesendet werden.

Es gibt mehrere Plattformen für das Empfangen und Weiterverarbeiten der Daten über LoRaWAN. Eine der bekanntesten offenen Plattformen ist The Things Network (TTN). Da das LoRaWAN Netzwerk in Adlershof vom kommerziellen Anbieter Versatel mit dem Sub Smartmakers ist, der wiederum den thingsHub betreibt, wird diese Plattform in der Umsetzung verwendet. Für eine allgemeingültige Verwendung dieses Konzept, wird auch die Architektur für TTN erläutert.

4.4.1 thingsHub

Die kommerzielle Plattform thingsHub ist eine integrierte Lösung, die Daten empfangen, in einer integrierten Datenbank abspeichern und auch in Grafana visualisieren kann.

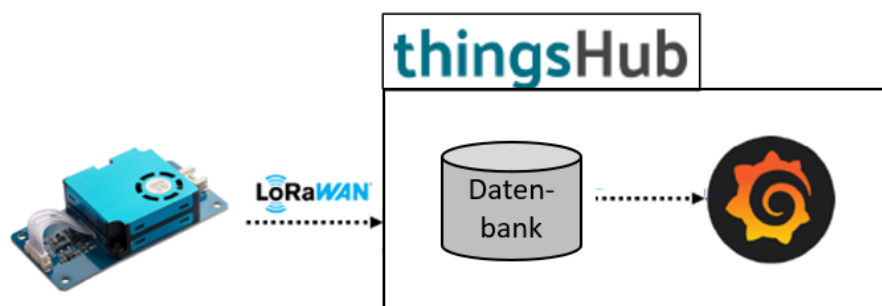


Abbildung 12: Datenstrecke mit thingsHub (Quelle: Grafana Logo)

Dafür muss der Nutzer zunächst ein Gerät auf dem Netzwerkservers registrieren und einen Driver implementieren, der die Struktur der Daten in der Datenbank anlegt. Mit der Datenbank kann der Nutzer über Abfragen kommunizieren. Für die Visualisierung mit dem integrierten Grafana wird die Datenbank als Datenquelle eingebunden und so kann auf die

⁹⁷ Linnemann et al. (2019, S. 11f, 25)

einzelnen Felder zugegriffen werden. Es ist ebenfalls möglich die Daten beispielsweise als CSV-Datei zu exportieren oder auch Daten aus CSV-Dateien in die Plattform zu importieren.

4.4.2 TTN

Die Plattform TTN besitzt keinen integrierten Anwendungsserver zur Datenspeicherung und benötigt daher beispielsweise die folgende Datenstrecke, um die Daten langfristig zu speichern und zu visualisieren.

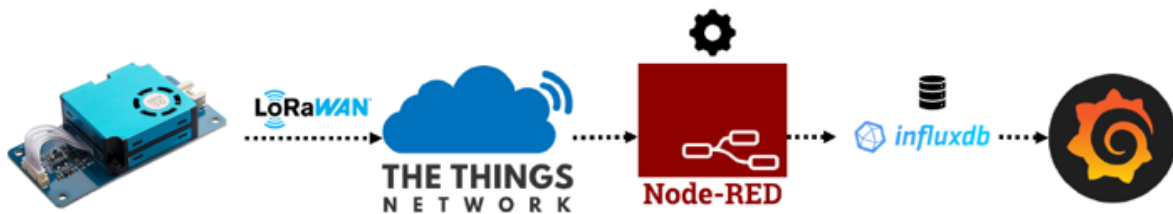


Abbildung 13: Datenstrecke mit TTN (Quellen: The Things Network, Node-RED Resources, InfluxDB Logo, Grafana Logo)

Auf der Plattform TTN muss zunächst eine Anwendung und auf dieser Anwendung ein Gerät erstellt werden. Zur eindeutigen Identifizierung werden mehrere IDs bzw. Keys vergeben, die für die Datenübertragung in der Software des Mikrocontrollers aufgerufen werden müssen. Außerdem müssen die über LoRaWAN übertragenen Bytes mithilfe des Decoders entschlüsselt werden, sodass die Werte als Dezimalzahlen je Parameter angezeigt, jedoch nicht langfristig gespeichert, werden. Dafür wird die oben dargestellte Datenstrecke benötigt. Für eine konstante Datenspeicherung wird ein Server benötigt, der rund um die Uhr die Datenbank befüllt. Kurzfristig kann dafür beispielsweise ein Laptop verwendet werden, aber langfristig käme ein Raspberry Pi infrage. Node-Red übernimmt hier das Auslesen der Daten aus TTN und die Weiterleitung in die Datenbank, hier als Beispiel die Timeseries Datenbank InfluxDB. Die Datenbank wiederum wird im Visualisierungstool z.B. Grafana als Datenquelle angegeben.

4.5 Visualisierung und Auswertung der Daten

Für eine anschauliche Sicht auf die erhobenen Daten, werden diese mithilfe einer Software für die spätere Auswertung visualisiert. Da diese Visualisierungen der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden, sollten sie möglichst einfach verständlich und selbsterklärend sein. Zunächst müssen Kennzahlen definiert werden. Dann muss die Art der Visualisierung

festgelegt werden, also z.B. Balkendiagramm oder Liniendiagramm. Dafür ist es wichtig, dass ein Verständnis für die Daten besteht, denn um einen Wert als positiv oder negativ zu bewerten, muss er verstanden werden. Das ist besonders wichtig bei Umweltdaten, denn die meisten Menschen wissen nicht, ob ein Gehalt von z.B. 0,5 ppm CO in der Luft angemessen, zu viel oder zu wenig ist.

Kennzahlen:

Die Datengrundlage besteht aus einem Zeitstempel, dem CO-, NO₂-, O₃- und PM₁₀-Gehalt zu diesem Zeitpunkt. Diese Werte werden mindestens im 15-Minuten-Takt erhoben. Eine relevante Kennzahl wäre ein 1-Stunden-Mittel. Dafür werden jeweils die Daten zwischen zwei vollen Stunden genommen und davon der Durchschnitt errechnet. Für 12:00 Uhr würde beispielsweise der Durchschnitt der Messwerte von 11:15 Uhr, 11:30 Uhr, 11:45 Uhr und 12 Uhr genommen. Für die Berechnung des Tagesmittels wird der Durchschnitt aller 1-Stunden-Mittel des jeweiligen Tages berechnet. Das Jahresmittel bezieht sich nicht auf das aktuelle Jahr, sondern es wird aus dem Durchschnitt aller Tagesmittel der letzten vergangenen 12 Monate errechnet. Der aktuelle Wert bezieht sich auf den letzten gemessenen Wert.

Bewertung der Messwerte:

Die Grundlage für die Bewertung der Messwerte bilden die Grenzwerte aus Kapitel 3.1.5.

Dabei sind alle Werte, für die Messwert \geq Grenzwert gilt, als rot und somit gefährlich einzustufen. Als grün und somit ungefährlich einzustufen sind alle Werte für die Messwert $< 90\%$ vom Grenzwert gilt. Alle Werte dazwischen, also solche für die 90% vom Grenzwert \leq Messwert $<$ Grenzwert gilt, werden als gelb eingestuft.

Für PM₁₀ mit einem Grenzwert von 50 µg/m³ als Tagesmittel wäre ein Tagesmittel von ≥ 50 µg/m³ rot, ein Tagesmittel zwischen 45 µg/m³ und 49,99 µg/m³ gelb und ein Tagesmittel von < 45 µg/m³ wäre grün.

Panels:

Das Umweltanalyse Dashboard mit seinen einzelnen Panels wird im Folgenden für PM₁₀ beispielhaft erklärt, soll aber in der Implementierung alle Panels für jeden Parameter enthalten.

Das wichtigste Panel ist eine Anzeige der letzten 24 Stunden auf der x-Achse und der jeweilige 1-Stunden-Mittelwert auf der y-Achse. Der Hintergrund wird in Ampelfarben (siehe oben unter Bewertung der Messwerte) dargestellt, welche auf dem Grenzwert basieren.

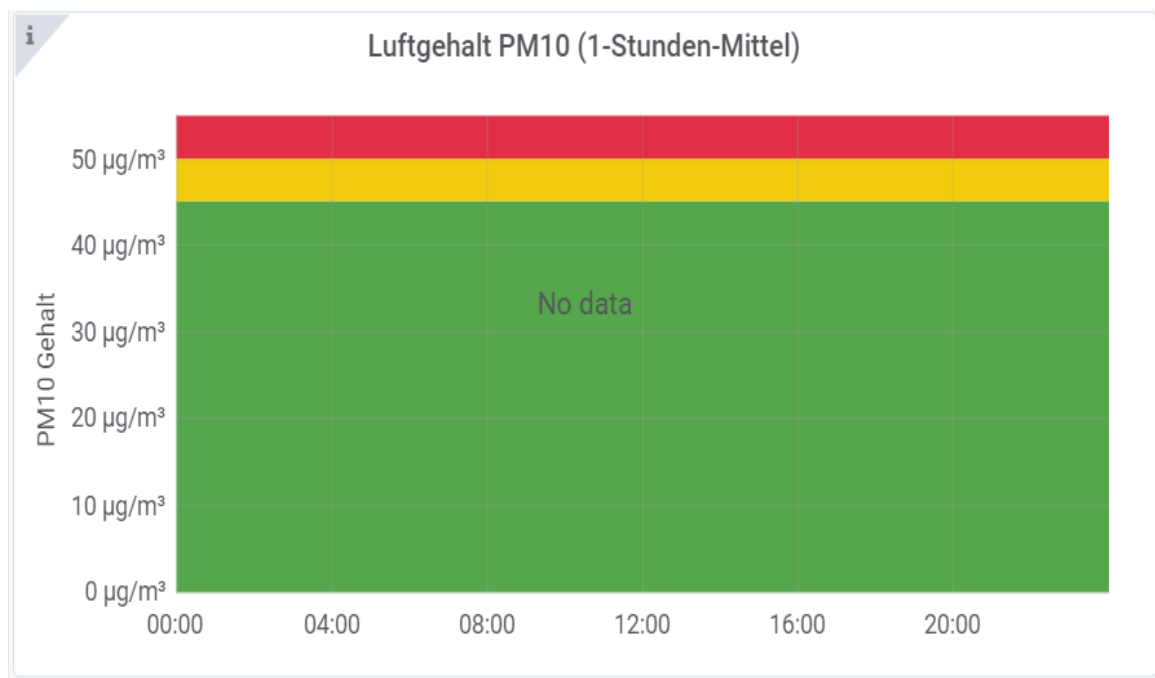


Abbildung 14: Panelentwurf 1 – Luftgehalt PM₁₀ als 1-Stunden-Mittel der letzten 24 Stunden

Ein zweites Panel wäre die Ansicht der Tagesmittel (y-Achse) der letzten 7 Tage (x-Achse). Die Hintergrundfarben basieren analog zum 1-Stunden-Mittel Panel auf dem Tagesgrenzwert.

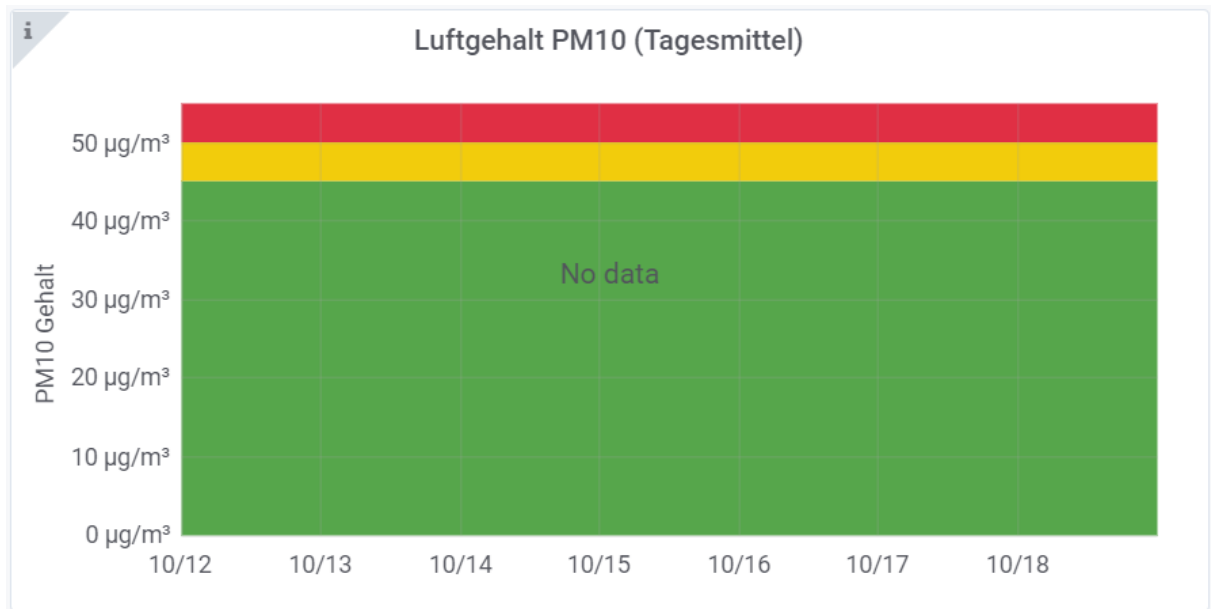


Abbildung 15: Panelentwurf 2 – Luftgehalt PM₁₀ als Tagesmittel der letzten 7 Tage

Ein drittes Panel wäre die Ansicht der Tagesmittel (y-Achse) der letzten 6 Monate (x-Achse). Die Hintergrundfarben basieren analog zum Tagesmittel der letzten 7 Tage auf dem Tagesgrenzwert.

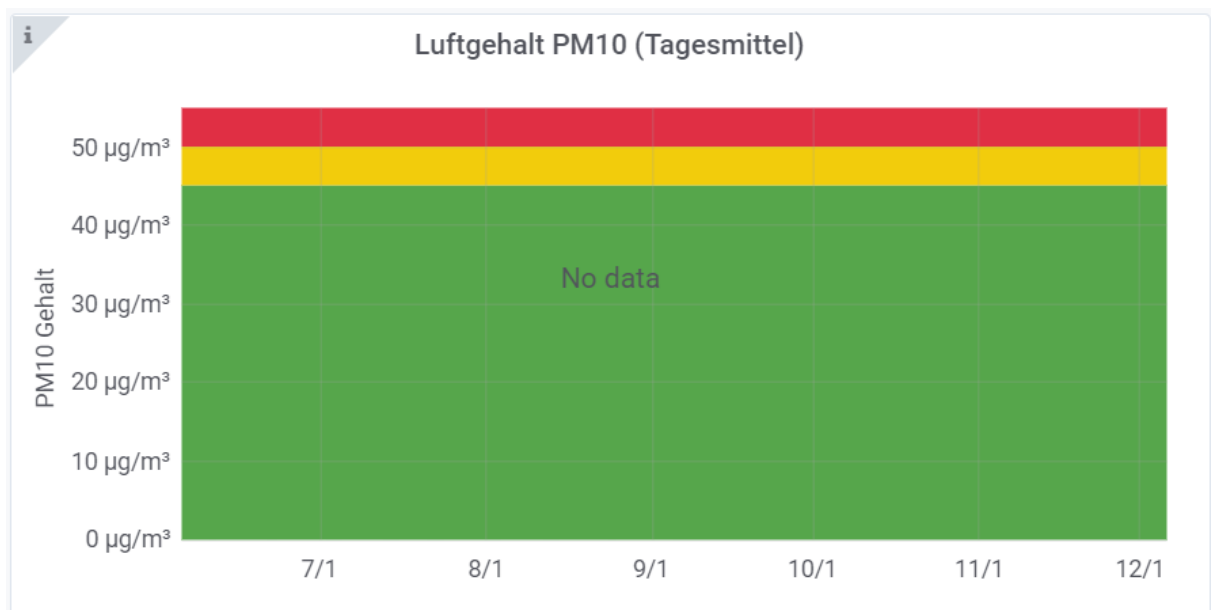


Abbildung 16: Panelentwurf 3 – Luftgehalt PM₁₀ als Tagesmittel der letzten 6 Monate

Zusätzlich wird als Zahl der aktuelle PM₁₀-Wert mit der Ampelfarbgebung (siehe oben unter Bewertung der Messwerte), die auf dem Tagesmittelgrenzwert 50 µg/m³ basiert, angegeben.

Ebenfalls als Zahl wird das Mittel der letzten 12 Monate mit der Ampelfarbgebung (siehe oben unter Bewertung der Messwerte), die auf dem Jahresmittelgrenzwert $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ basiert, angegeben.

4.6 Auswahl der neuralgischen Punkte

Es muss entschieden werden, an welchen geografischen Punkten die Sensoren implementiert werden sollen, um eine gute Abdeckung zu erzielen, hier im infrastrukturellen Setting von Adlershof.

Ziel ist es, einen Bezug der Umweltdaten zum motorisierten Verkehrsaufkommen herzustellen, daher sollten Punkte mit Nähe zum Straßenverkehr gewählt werden. In jedem Fall sollten Verkehrsknotenpunkte, wie große Kreuzung gewählt werden, dafür wären die verkehrstechnischen Ein- und Ausgänge des Technologieparks relevant, an denen sich zu Hauptverkehrszeiten die Fahrzeuge stauen. Zum Vergleich wäre es zusätzlich empfehlenswert eine Nebenstraße oder auch eine Stelle etwas abseits der Straße zu wählen.

Analog zu den Verkehrserhebungen wurden zunächst folgende neuralgische Punkte gewählt.

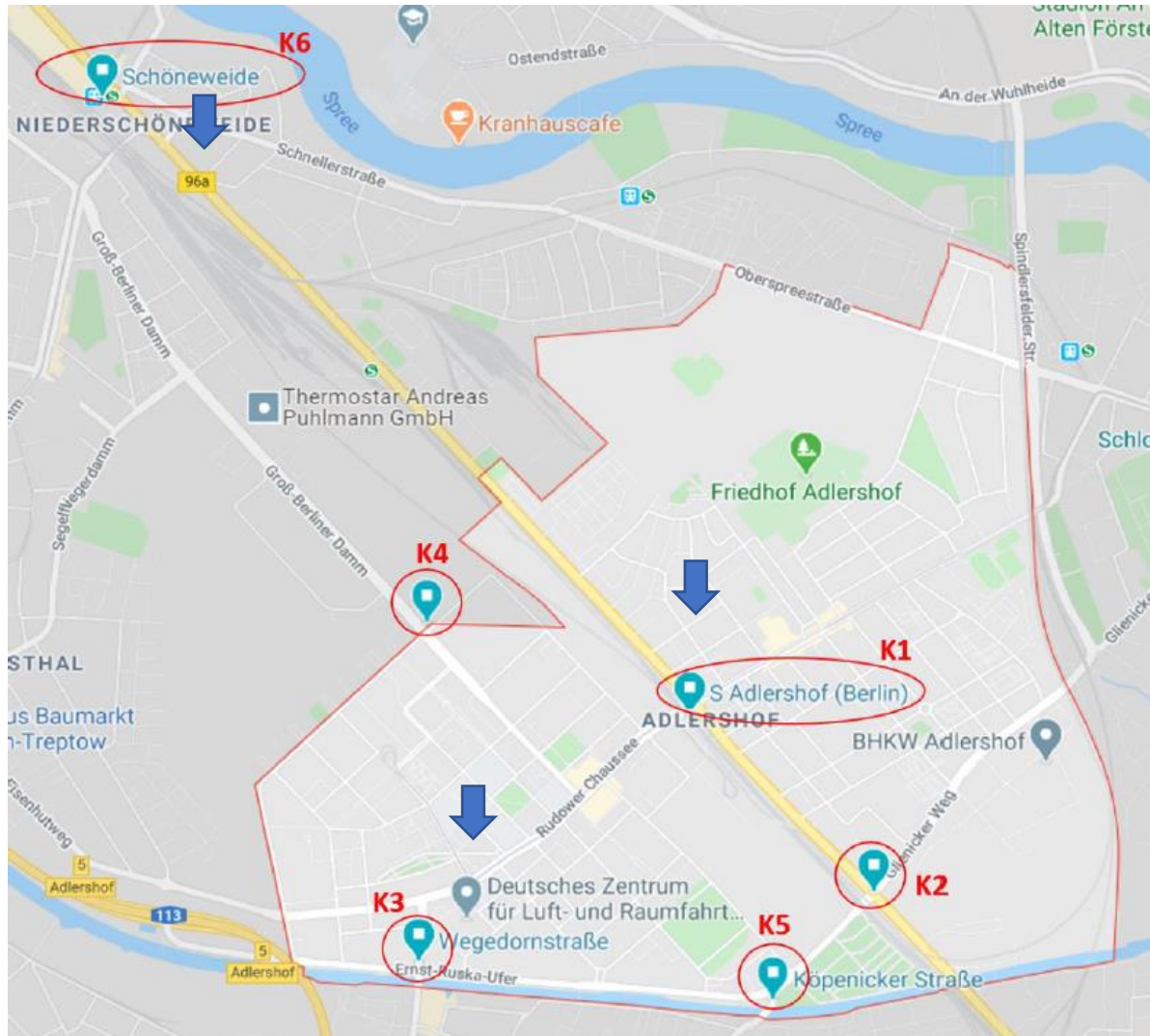


Abbildung 17: Verkehrsknotenpunkte in Adlershof

K1: Kreuzung Adlergestell /Dörfeldstraße (S Adlershof)

K2: Kreuzung Adlergestell / Köpenicker Straße / Glienicker Weg

K3: Kreuzung Ernst-Ruska-Ufer /Wegedornstraße

K4: Kreuzung Groß-Berliner-Damm / Igo-Etrich-Straße / Hermann-Dorner-Allee

K5: Kreuzung Köpenicker Straße / Ernst-Ruska-Ufer

K6: S Schöneweide

4.7 Verpackung und Montage der Sensoren

4.7.1 Stromversorgung

Für eine langfristige Inbetriebnahme der Sensoren muss eine dauerhafte Stromversorgung gewährleistet sein. Im Outdoorbereich ist es mit großer Wahrscheinlichkeit nicht möglich eine Verbindung zum Stromnetz herzustellen. Dann wäre eine autarke Stromversorgung vorteilhaft, denn Kabel zu Verlegen wäre mit großem Aufwand verbunden. Für eine autarke Stromversorgung werden Akkus benötigt und ein Konzept, wie diese Akkus aufgeladen werden können. Quellen aus denen Strom erzeugt werden können wären z.B. Sonne und Wind.

4.7.2 Gehäuse

Das Gehäuse von Umweltsensoren ist herausfordernd, weil die Sensorik auf der einen Seite vor Umwelteinflüssen geschützt werden muss, aber auf der anderen Seite benötigt sie auch direkten Kontakt zur Luft. Im Folgenden wird dargestellt, welche Anforderungen die verschiedenen Sensoren an ein Gehäuse haben.

Die Sensoren sollten im Außenbereich nicht ungeschützt verwendet werden, da die Elektronik nicht wetterfest ist. Der PM₁₀-Sensor hat eine Lüftung, um Luftzirkulation zu fördern und benötigt einen Zugang zur Außenluft. Die Gassensoren für CO, NO₂ und O₃ benötigen zwar auch Luftkontakt, allerdings käme z.B. eine Gortex-Membran infrage, da diese die Gase durchlässt, aber vor Feuchtigkeit schützt. Die restliche Elektronik wie der Mikrocontroller, Kabel und Anschlüsse sollten vor jeglichen Wettereinflüssen wie Feuchtigkeit geschützt werden. Die LoRa-Antenne sollte für bestmögliche Funktion außen am Gehäuse befestigt sein. Sie ist wetterfest und lediglich der Anschluss an die restliche Elektronik muss vor Umwelteinflüssen geschützt werden z.B. durch Silikon.

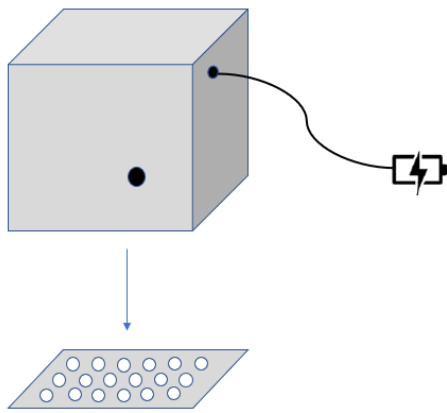


Abbildung 18: Gehäuse (schematisch)

Diese schematische Darstellung zeigt ein beispielhaftes Gehäuse für die Sensoren mit einer Öffnung für die LoRaWAN-Antenne und eventuell einer Öffnung für ein Stromkabel, sofern es benötigt wird. Die Unterseite des Gehäuses, wie unten in der Abbildung dargestellt, mit Löchern versehen, um die Luftzufuhr zu den Sensoren zu ermöglichen.

4.7.3 Montage

Die Sensoren sollen langfristig in Adlershof implementiert werden. Bei der Montagehöhe sowie der Entfernung zur Straße sollte ein Fußgänger simuliert werden. Für die Schädlichkeit für den Menschen wäre die Höhe relevant in der eingeatmet wird. Ein Mensch atmet im Durchschnitt in einer Höhe von ca. 150 bis 180 cm ein. Diese Montagehöhe wäre daher wünschenswert. Wenn an dem Implementierungsort allerdings mit Vandalismus o.Ä. zu rechnen ist, wäre eine Montagehöhe von 250 bis 300 cm empfehlenswert. Da Gase nach oben steigen, sollte die Messwerte dadurch nicht maßgeblich verändert werden.

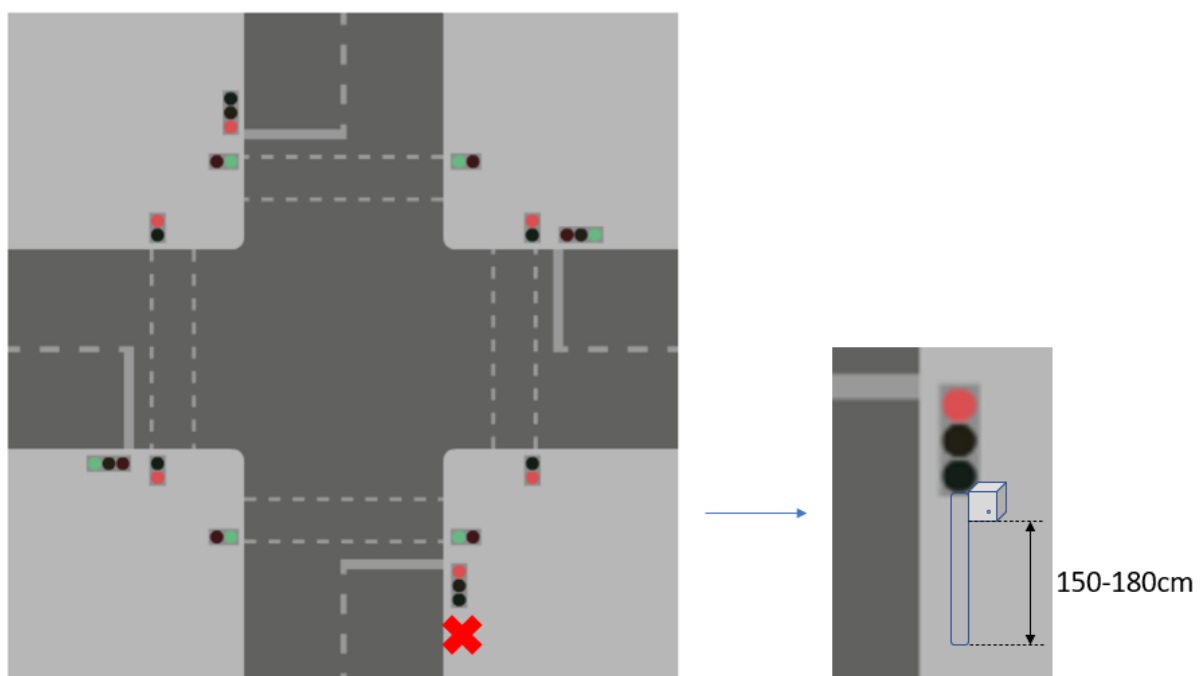


Abbildung 19 Montage des Sensorpakets (integrierte Abbildung: Hermann, 2018)

Die abgebildete Ampel ist hier nur ein Beispiel, es kommen auch Laternenpfähle o.Ä. infrage. Eine Nähe zum Verkehr wäre empfehlenswert, da bei zu großer Entfernung die Gase aus dem Auspuff nicht von den Sensoren erfasst werden können.

5 Implementierung des Umweltmonitorings

Auf Grundlage des Konzepts wird in diesem Kapitel die Implementierung eines prototypischen Sensorpaketes in Adlershof beschrieben

5.1 Allgemeines

5.1.1 Standort

Als Teststandort wurde eine Messbrücke am Ernst-Ruska-Ufer Ecke Albert-Einstein-Straße gewählt. Unterstützt wurde die Implementierung von dem DLR, welches die Messbrücke zur Erhebung von Verkehrsdaten nutzt.



Abbildung 20: Messbrücke DLR (Ernst-Ruska-Ufer/Albert-Einstein-Straße)

Dieser Standort eignet sich, da die Brücke eine Stromversorgung bietet, ein LoRaWAN Gateway in der Nähe ist und ein geeignetes Verkehrsaufkommen vorhanden ist, da sich einer der Verkehrsknotenpunkte, die Kreuzung Ernst-Ruska-Ufer/Wegedornstraße (siehe K3 in Kapitel 4.6), weniger als 200m entfernt befindet.

5.1.2 Gehäuse

Für den Schutz der Sensoren wurde ein, mit dem 3D-Drucker erstelltes, Gehäuse aus Kunststoff verwendet. Dieses wurde den Anforderungen entsprechend gedruckt, damit es sowohl die Luftzufuhr ermöglicht, aber auch die Elektronik vor Feuchtigkeit schützt.



Abbildung 21: Gehäuse Umweltsensoren - seitliche Ansicht



Abbildung 22: Gehäuse Umweltsensoren - Ansicht von unten und von oben

Die für die Luftzufuhr erforderlichen Löcher befinden sich an der Unterseite des Gehäuses und sind so positioniert, dass sie die Luft direkt zu den Sensoren führen. Dabei liegen hinter den Löchern links das Analogue Front End mit den CO, NO₂ und O₃ Sensoren und die kleine schwarze Röhre, die rechts herausragt, ist die Luftzufuhr für den OPC Sensor (PM₁₀). Das Stromkabel ragt rechts am Rand ebenfalls aus der Unterseite des Gehäuses heraus.

In der Ansicht von oben auf das Gehäuse ist zu sehen, dass ein kleines Dach das Loch, durch das die Antenne herausragt, vor beispielsweise Regen abschirmt. Auf der gegenüberliegenden Seite der Antenne befindet sich eine Halterung für die bessere Montage des Gehäuses.

5.1.3 Montage und Stromversorgung

Die Stromversorgung wird durch den Stromkasten ganz rechts auf der Brücke gewährleistet. Die Sensoren sind mit einem Kabel an dem Stromkasten angeschlossen.



Abbildung 23: Montage der Sensoren in Adlershof

Das Gehäuse mit den Sensoren wird oben über der Straße in ca. 6m Höhe an der Brücke montiert. Dabei wird es mithilfe von Kabelbindern an einer Stange befestigt. Die Unterseite des Gehäuses mit den Löchern für die Belüftung zeigt in Richtung Straße.

5.2 Hardware

Die im folgenden dargestellte Hardware wurde größtenteils von Projektmitarbeitern der Beuth Hochschule umgesetzt. Dazu zählt der Hardwareaufbau der Sensorik sowie die Programmierung des Entwicklungsboards.

5.2.1 Entwicklungsboard B-L072Z-LRWAN1

Das B-L072Z-LRWAN1 ist ein Entwicklungsboard der Firma ST.

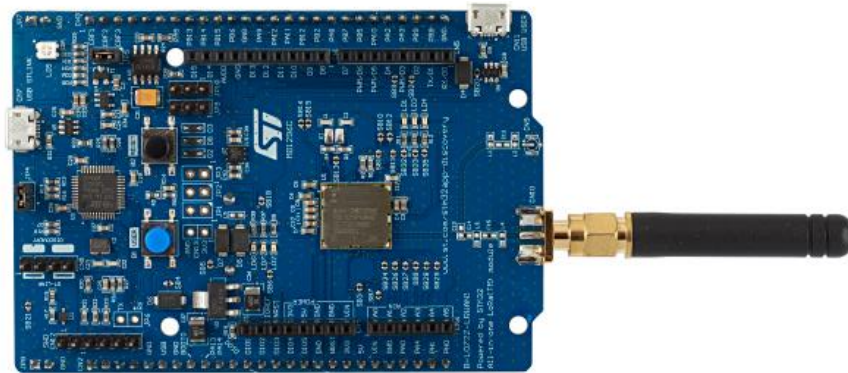


Abbildung 24: B-L072Z-LRWAN1 (Quelle: STMICROELECTRONICS, 2019)

Es besitzt ein integriertes System-on-a-Chip (CMWX1ZZABZ-091) der Firma Murata, welches den STM32L072CZ Mikrocontroller und den Sendeempfänger SX1276. Der Stromverbrauch des System-on-a-Chip beträgt 1,65 μA und die Versorgungsspannung ist mit 5V angegeben. Außerdem unterstützt er die Übertragungstechniken LoRa und Sigfox. Das Entwicklungsboard enthält die Schnittstellen I²C, LP-UART, SPI und USB 2.0, über die weitere Hardware wie Sensoren angebunden werden können.

Dieses Entwicklungsboard ist gut für dieses Projekt geeignet, da es Energieeffizienz, Konnektivität und Komfort bietet, sowie die Möglichkeit, alle Sensoren in ein System einzubinden. Außerdem besitzt es bereits ein LoRa/Sigfox Modul sowie die entsprechende Antenne, sodass diese Komponenten nicht zusätzlich eingebaut werden müssen.

5.2.2 Sensoren

Die folgenden Sensoren sowie für die Funktion der Sensoren notwendige Elektronik werden an das Entwicklungsboard angeschlossen.

PM₁₀-Sensor:

Dieser Optical Particle Counter (OPC) saugt mit einem eingebauten Lüfter Luft ein und zählt mithilfe einer Laserstreutechnologie die Partikel in der Luft. Er hat die folgenden Eigenschaften.

Eigenschaft	Wert(e)/Wertebereich
Hersteller	Alphasense Ltd
Abbildung	
Betriebsstrom	180 mA (Mess-Modus) < 45 mA (Standby-Modus)
Versorgungsspannung	4,8 bis 5,2 V (DC)
Messparameter	PM ₁ , PM _{2,5} und PM ₁₀ (integrierte Temperatur- und Luftfeuchtesensoren)
Messbereich	1 bis 2000 µg/m ³
Bedingung: Temperatur	-10 bis 50 °C
Bedingung: Luftfeuchte	0 bis 95 % (nicht kondensiert)
Schnittstellen	SPI, USB
Dimensionen	75 x 63 x 60 mm
Gewicht	< 105 g

Tabelle 13: Eigenschaften des Alphasense OPC-N3 Sensors

CO-Sensor:

Dieser CO-A4 Sensor misst den CO Gehalt in der Luft in der Einheit ppm. Im Folgenden werden seine Eigenschaften aufgeführt.

Eigenschaft	Wert(e)/Wertebereich
-------------	----------------------


Hersteller	Alphasense Ltd
Abbildung	
Messbereich	1-500 ppm
Temperaturbereich	-30-50 °C
Druckbereich	80-120 kPa
Luftfeuchtebereich	15-90 %
Dimensionen	20,2 x 20,2 x 20,8 mm
Gewicht	<6 g

Tabelle 14: Eigenschaften des Alphasense CO-A4 Sensors

NO₂-Sensor:

Dieser NO2-A43F Sensor misst den NO₂ Gehalt in der Luft in der Einheit ppm. Im Folgenden werden seine Eigenschaften aufgeführt.

Eigenschaft	Wert(e)/Wertebereich
Hersteller	Alphasense Ltd
Abbildung	
Messbereich	1-20 ppm
Temperaturbereich	-30-40 °C
Druckbereich	80-120 kPa
Luftfeuchtebereich	15-85 %
Dimensionen	20,2 x 20,2 x 20,8 mm

Gewicht	<6 g
---------	------

Tabelle 15: Eigenschaften des Alphasense NO2-A43F Sensors

O₃-Sensor:

Dieser OX-A431 Sensor misst den O₃ Gehalt in der Luft in der Einheit ppm. Im Folgenden werden seine Eigenschaften aufgeführt.

Eigenschaft	Wert(e)/Wertebereich
Hersteller	Alphasense Ltd
Abbildung	
Messbereich	1-20 ppm
Temperaturbereich	-30-40 °C
Druckbereich	80-120 kPA
Luftfeuchtebereich	15-85 %
Dimensionen	20,2 x 20,2 x 20,8 mm
Gewicht	<6 g

Tabelle 16: Eigenschaften des Alphasense OX-A431 Sensors

Analogue Front End:

Auf dem Analogue Front End sind Vorrichtungen, auf die die vier Elektroden der Alphasense Gassensoren für CO, NO₂ und O₃ gesteckt werden. Es gibt Analogue Front Ends für zwei, drei oder vier Sensoren, hier wird das Analogue Front End für drei Sensoren beschrieben. Es besitzt die folgenden Eigenschaften.

Eigenschaft	Wert(e)/Wertebereich
Hersteller	Alphasense Ltd

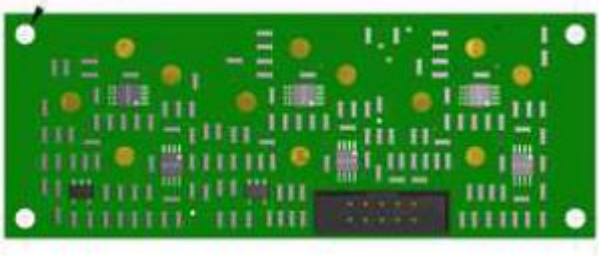
Abbildung	
Leistungsbedarf	1,95 mA (650 µA pro Kanal)
Versorgungsspannung	3,4-6,4 V
Dimensionen	74 x 28 mm

Tabelle 17: Eigenschaften des Analogue Front Ends

Die Analogue Front Ends sind analoge Schaltkreise mit integrierter Leistungsregelung und Referenzspannungen. Für genaue Messungen haben sie außerdem ein sehr niedriges Rauschen. Analogue Front Ends sind nicht vom Benutzer einstellbar, die Offset-Spannung für jeden Sensor ist im Kalibrierungsdokument definiert (wird bei der Programmierung in Kapitel 5.3.1 noch genauer erklärt). Ebenso ist die Analogue Front End Verstärkung voreingestellt.

Analog-to-Digital Converter (ADC):



Abbildung 25: ADC

Das Analogue Front End gibt analoge Output Werte aus. Ein ADC wandelt ein analoges Signal in ein digitales um. Da das Entwicklungsboard nur digitale Werte verarbeiten kann, wird das Analogue Front End an einen ADC angeschlossen und nicht direkt an das Entwicklungsboard.

Pro Signal wird ein Anschluss benötigt. Die drei Gassensoren von Alphasense senden jeweils zwei Rohwerte und die Betriebstemperatur in analoger Form. Das heißt, es werden 7 Anschlüsse benötigt. Das Entwicklungsboard besitzt bereits integrierte ADC Anschlüsse, jedoch nicht genügend, um alle 7 Signale zu übersetzen. Dafür wird der externe ADC verwendet.

5.3 Software

5.3.1 Programmierung des Entwicklungsboards

Der gesamte Code ist komplex und lang, daher werden nur Ausschnitte abgebildet und ihre Funktion erklärt. Die Dateien main.c, bsp.c und Commissioning.h sind in voller Länge im Anhang zu finden.

Berechnung der Stoffkonzentrationen NO₂, O₃ und CO:

Das Analog Front End gibt zwei analog Signale pro Parameter aus, das Signal der Arbeitselektrode (Working Electrode) und das Signal der Hilfselektrode (Auxillary Electrode). Außerdem wird die Temperatur ermittelt und für eine spätere Temperaturkompensation verwendet. Insgesamt werden also sieben Werte gemessen und in einem Array gespeichert.

In den Dokumentationen von Alphasense enthält das Datenblatt (AAN 803-05) Hinweise zur Berechnung der Stoffkonzentrationen des Analogue Front Ends.

Algorithm	Equation	Notes
1	$WE_c = (WE_u - WE_e) - n_T * (AE_u - AE_e)$	Subtraction of the electronic offsets from the raw WE _u and AE _u outputs then scales the net AE output with the n _T factor. Gross under or over compensation can occur if (AE _u - AE _e) is of opposite sign to n _T , or if (AE _u - AE _e) is significantly smaller or larger than (WE _u - WE _e). Over compensation could lead to the final gas concentration appearing negative, or much higher compared to a reference value.

Für die Anwendung dieser Formel muss ein Faktor zur Temperaturkompensation berechnet werden. Dafür sind im Datenblatt (AAN 803-05) ebenfalls sensorspezifische Funktionen angegeben, mithilfe derer der Faktor bestimmt werden kann.

Die Korrekturfaktoren für Offsetspannungen des Analogue Front Ends sind aus dem mitgelieferten Vermessungsdatenblatt von Alphasense entnommen (siehe Abbildung 26).

	SN1	SN2	SN3
Sensor Type	NO2-A43F	OX-A431	CO-A4
Serial Number	212770650	214720125	132770161
Working Electronic Offset, WE _e (mV)	313	412	264
WE Sensor Zero, WE _o (mV)* or PID [#]	5	15	10
Total WE Zero offset, WE _T (mV)	318	427	274
AE Electronic Offset, AE _e (mV)	301	417	274
AE Sensor Zero, AE _o (mV)	9	21	1
Total AE Zero Offset, AE _T (mV)	310	438	275
Sensitivity (nA/ppb)	-0.297	-0.424	0.353
Sensitivity NO2 (nA/ppb)	-0.297	-0.449	"
PCB Gain (mV/nA)	-0.73	-0.73	0.80
Sensitivity (mV/ppb)	0.217	0.310	0.282
Sensitivity NO2 (mV/ppb)	0.217	0.328	#VALUE!

* at 101 kPa 23(±2)°C, 40(±15) %RH

[#]PID sensor zero in zero air, sensitivity in isobutylene

Abbildung 26: Vermessungsdatenblatt von Alphasense

Eine Besonderheit bei der Ermittlung von O₃ ist, dass die Stoffkonzentration von NO₂ verrechnet wird, da messtechnisch beide Gase mit dem Sensor abgebildet werden. Der ermittelte NO₂ Gehalt in ppb wird mit der Sensitivität des O₃ Sensors für NO₂ multipliziert und als Arbeitselektrodenoffset, wie im Datenblatt angegeben, subtrahiert.

Im folgenden Code ist dieser Vorgang nun dargestellt. Zunächst das Array mit den sieben Messwerten value[0] – value[6]. Dann jeweils pro Parameter die Berechnung des Faktors mithilfe der Temperaturkompensation und die finale Berechnung der Stoffkonzentration in ppb. In Vorbereitung auf die Übertragung der Daten via LoRaWAN werden die Parameter NO₂ und O₃ mit 100 und CO mit 10 multipliziert, sodass die Werte im Format integer übertragen werden können. Diese Umformung wird dann im Driver in thingsHub wieder umgekehrt (s. Kapitel 5.3.2). Die berechneten Stoffkonzentrationen werden in sensor_data gespeichert.

```
float temp=((value[0]*0.500227461)-281)*10;
sensor_data->temperatur=temp;
sensor_data->SN1_work = value[1];
sensor_data->SN1_aux = value[2];
sensor_data->SN2_work = value[3];
sensor_data->SN2_aux = value[4];
sensor_data->SN3_work = value[5];
sensor_data->SN3_aux = value[6];

//Berechnung NO2 AFE
float factor=0.000000472*pow(temp,4)-0.00000103*pow(temp,3)-
            0.0003159*pow(temp,2)+0.02855*temp+1.297;

float NO2_ppb=(float) (((value[1]*0.500227461)-318)-
                    (factor*((value[2]*0.500227461)-310)))*0.217)*100;

sensor_data->NO2_ppb = NO2_ppb;

//Berechnung O3 AFE
factor=0.0000002477*pow(temp,4)+0.0000006676*pow(temp,3)-
        0.000002632*pow(temp,2)+0.01663*temp+1.506;

float O3_ppb=(float) (((((value[3]*0.500227461)-427-NO2_ppb*(0.328))-
                    (factor*((value[2]*0.500227461)-438)))*0.31))*100;

sensor_data->O3_ppb = O3_ppb;

//Berechnung CO AFE
factor=-0.00000003077*pow(temp,5)+0.0000001722*pow(temp,4)+
        0.000005216*pow(temp,3)-0.002713*pow(temp,2)-0.06377*temp+0.8023;

float CO_ppb=(float) (((value[5]*0.500227461)-274)-
                    (factor*((value[6]*0.500227461)-275)))*0.282)*10;

sensor_data->CO_ppb = CO_ppb;
```

LoRaWAN-Verbindung:

In Commissioning.h wird die LoRaWAN Verbindung genauer definiert. Der folgende Codeausschnitt zeigt die Festlegung der Device EUI, der App EUI und des App Keys. Diese eindeutigen IDs sind die in thingsHub in Kapitel 5.3.2 für das Device festgelegten.


```
// Device EUI
#define LORAWAN_DEVICE_EUI          {0x16,0x16,0x16,0x16,0x16,0x16,0x16,0x16}

// App EUI
#define LORAWAN_JOIN_EUI           {0x18,0x18,0x18,0x18,0x18,0x18,0x18,0x18}

// App Key
#define LORAWAN_APP_KEY             {0x99,0x99,0x99,0x99,0x99,0x99,0x99,0x99,
                                     0x99,0x99,0x99,0x99,0x99,0x99,0x99,0x99}
```

Übertragung und Intervall:

In main.c ist der APP_TX_DUTYCYCLE als 30000 Millisekunden, also 30 Sekunden, definiert. Das bedeutet, dass die Sensoren alle 30 Sekunden messen. Allerdings wird nur nach jeder fünften Messung, also alle 2,5 Minuten, der Durchschnitt dieser fünf Messungen gesendet. So können kleine Unreinheiten ausgeglichen werden.

```
#define APP_TX_DUTYCYCLE              30000

if( mid_count%5 )
{
    PRINTF("Messung ohne Lora\n\n\n");
    return;
}
```

In sensor_data_sum werden die gemessenen Daten, die nicht via LoRaWAN gesendet werden, aufsummiert und dann vor dem nächsten Senden durch die Anzahl Messungen, hier fünf, geteilt, sodass ein Durchschnittswert entsteht. Dieser Wert wird dann jeweils in 2 Bytes pro Parameter Temperatur, NO₂, O₃, CO und PM₁₀, also insgesamt 10 Bytes, gesendet.

```
sensor_data_mid.temperatur=sensor_data_sum.temperatur/mid_count;  
sensor_data_mid.NO2_ppb=sensor_data_sum.NO2_ppb/mid_count;  
sensor_data_mid.O3_ppb=sensor_data_sum.O3_ppb/mid_count;  
sensor_data_mid.CO_ppb=sensor_data_sum.CO_ppb/mid_count;  
sensor_data_mid.pm10_opc=sensor_data_sum.pm10_opc/mid_count;
```

```
AppData.Port = LORAWAN_APP_PORT;
```

```
AppData.Buff[0] = (sensor_data_mid.temperatur >> 8) & 0xFF;  
AppData.Buff[1] = sensor_data_mid.temperatur & 0xFF;
```

```
AppData.Buff[2] = (sensor_data_mid.NO2_ppb >> 8) & 0xFF;  
AppData.Buff[3] = sensor_data_mid.NO2_ppb & 0xFF;
```

```
AppData.Buff[4] = (sensor_data_mid.O3_ppb >> 8) & 0xFF;  
AppData.Buff[5] = sensor_data_mid.O3_ppb & 0xFF;
```

```
AppData.Buff[6] = (sensor_data_mid.CO_ppb >> 8) & 0xFF;  
AppData.Buff[7] = sensor_data_mid.CO_ppb & 0xFF;
```

```
AppData.Buff[8] = (sensor_data_mid.pm10_opc >> 8) & 0xFF;  
AppData.Buff[9] = sensor_data_mid.pm10_opc & 0xFF;
```

```
AppData.BuffSize = 10;
```

5.3.2 thingsHub

Für die Integration in thingsHub müssen folgende Schritte durchlaufen werden:

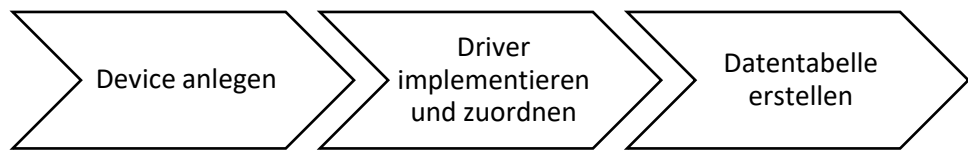


Abbildung 27: Ablauf der Integration in thingsHub

Device anlegen:

Auf der Registerkarte „Devices“ wird ein neues Device über „Add Device“ angelegt. Auf den ersten beiden Seiten werden die erforderlichen Felder mit Namen und IDs ausgefüllt.

The screenshot shows two side-by-side panels of the 'Add new device' form. The left panel is for step 1, 'NAME / ID', with a progress bar showing the first step as active. It contains two text input fields: 'Name' with the value 'umwelt' and 'Device ID' with the value 'umwelt'. At the bottom are 'Exit' and 'Save & Next' buttons. The right panel is for step 2, 'ACTIVATION KEYS', with a progress bar showing the second step as active. It contains a radio button group for 'OTAA' (selected) and 'ABP'. Below are three text input fields: 'Device EUI (DevEUI)' with '16 16 16 16 16 16 16 16', 'Application EUI (AppEUI)' with '18 18 18 18 18 18 18 18', and 'Application Key (AppKey)' with '99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99'. At the bottom are 'Exit' and 'Save & Next' buttons.

Abbildung 28: thingsHub - Device anlegen (Schritte 1+2)

Dann wird das Device im K-Tel LoRaWAN Netzwerk registriert. Da noch kein Driver erstellt wurde, wird das Device zunächst ohne zugeordneten Driver angelegt.

The screenshot shows two side-by-side panels of the 'Add new device' form. The left panel is for step 3, 'CONNECT', with a progress bar showing the third step as active. It contains a dropdown menu labeled 'Select the IoT Network to register and activate your device:' with 'K-Tel LoRaWAN' selected. At the bottom are 'Exit' and 'Register Device & Next' buttons. The right panel is for step 4, 'DRIVER', with a progress bar showing the fourth step as active. It contains a dropdown menu labeled 'Assign a device driver' with 'Select your Device Driver' selected. At the bottom are 'Exit' and 'Assign Driver & Finish' buttons.

Abbildung 29: thingsHub - Device anlegen (Schritte 3+4)

Driver implementieren und einem Device zuordnen:

Ein Driver beinhaltet Informationen zur Verarbeitung und Interpretation der via LoRaWAN gesendeten Daten.

Um einen Driver anzulegen wird ein Driver Development Kit benötigt, welches die thingsHub Entwickler unter <https://gitlab.com/smartmakers/drivers/sdk> bereitstellen. Nach der Installation der Entwicklungsumgebung kann mithilfe der Dokumentation auf <https://gitlab.com/smartmakers/drivers/sdk/-/tree/master/docs> begonnen werden den Driver zu programmieren. Dabei gibt es die Möglichkeit entweder mit Javascript oder Golang zu arbeiten. Hier wird Javascript verwendet.

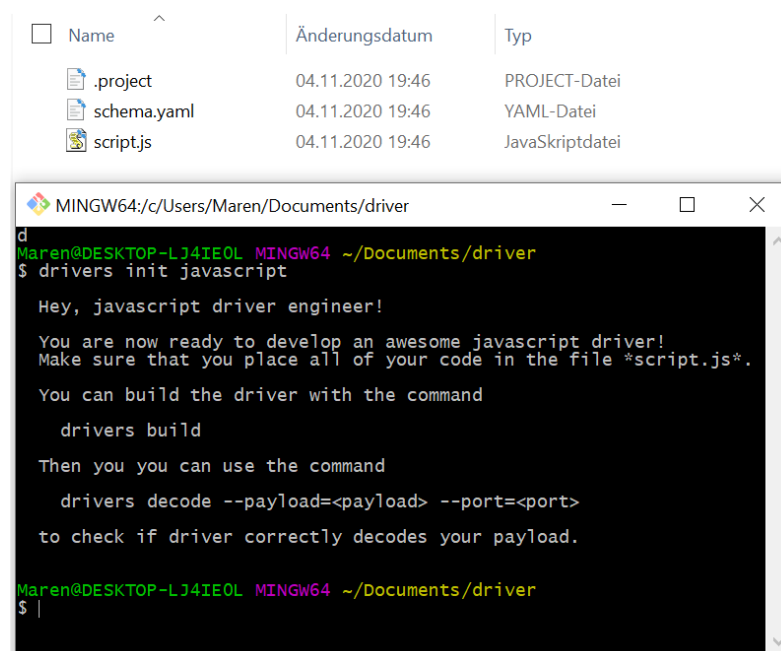


Abbildung 30: Erstellung eines Drivers (Javascript)

In einem für den neuen Driver erstellten Ordner wird ein Git Bash Fenster geöffnet. Darin wird dann der Git Bash Befehl `$ drivers init javascript` ausgeführt. Wie in Abbildung 30 dargestellt, werden in dem Ordner automatisch die drei Dateien `.project`, `schema.yaml` und `script.js` erstellt.

Die `.project` Datei beinhaltet Metadaten zum Driver, die dem Leser Informationen wie Name, Autor und Typ des Projekts mitteilen.

```
type: javascript
metadata:
  name: driver-umwelt
  author: marenzaepernick
  labels: []
  supports: []
  platform: amd64
  os: linux
```

Diese `schema.yaml` Datei enthält genauere Spezifikationen zu den übertragenen Daten und ihre Struktur. Diese besteht aus den jeweiligen Namen der Spalten und ihrem Datentyp sowie

optional beispielsweise der Einheit oder einer Beschreibung des jeweiligen Attributs. Es können nur 64-bit-Datentypen verwendet werden, da nur diese von thingsHub unterstützt werden.

```
version: "1.0"
properties:
  CO:
    type: float64
  NO2:
    type: float64
  O3:
    type: float64
  PM10:
    type: float64
  Temperatur:
    type: float64
```

Die Daten werden von LoRaWAN als Bytes versendet. In der script.js Datei findet die Zuordnung und Übersetzung dieser Bytes in die, in schema.yaml definierten Attribute, statt.

```
function decode(payload, port) {
  var response = new Object();

  var NO2 = (bytesToInteger([payload[2], payload[3]])) / 100;
  var O3 = (bytesToInteger([payload[4], payload[5]])) / 100;
  var CO = (bytesToInteger([payload[6], payload[7]])) / 100;

  response.Temperatur = (bytesToInteger([payload[0], payload[1]])) / 10 - 20;
  response.NO2 = (NO2) * (12.187) * (46.0055) / (273.15 + 20)
  response.O3 = (O3) * (12.187) * (48) / (273.15 + 20)
  response.CO = (CO) * (12.187) * (28.01) / (273.15 + 20)
  response.PM10 = (bytesToInteger([payload[8], payload[9]])) / 100;

  return response;
}

function bytesToInteger(array) {
  var value = 0;
  for (var i = 0; i < array.length; i++) {
    value *= 256;
    value += array[i];
  }
  return value;
}
```

In der Programmierung wurden die Parameter (außer Temperatur) mit 100 multipliziert, sodass aus einer Zahl mit zwei Nachkommastellen eine Zahl vom Datentyp Integer wurde. Hier

wird diese Berechnung rückgängig gemacht. Für CO beispielsweise werden die Bytes 6 und 7 des Payloads in Integer umgewandelt und dann durch 100 dividiert, sodass wieder die ursprüngliche Zahl mit 2 Nachkommastellen entsteht.

Für die Parameter NO₂, O₃ und CO findet außerdem eine Umrechnung von ppb in µg/m³ statt, da die Grenzwerte der Parameter in dieser Einheit angegeben sind. Dafür wird die Formel aus dem Referenztest (siehe Kapitel 4.3.2) angewendet.

Im Git Bash Fenster werden nun nacheinander die Befehle `$ drivers build`, `$ drivers login <server> <username> -p <password>` und `$ drivers push -t <version>` ausgeführt.

Auf der Registerkarte „Driver“ wird nun einmal „Update all thingshub Drivers“ per Klick ausgeführt, dann ist der implementierte Driver in der Liste zu finden.

Für die Zuweisung des Drivers zum Device, wird die ID Umwelt unter der Registerkarte „Devices“ ausgewählt. Auf der linken Seite unter „Device Driver“ wird der entsprechende Driver aus der Liste ausgewählt und mit einem Klick auf „Assign“ zugewiesen.

The image shows two side-by-side screenshots of the 'DEVICE DRIVER' interface in thingsHub. The left screenshot shows a dropdown menu titled 'Select your Device Driver' with a list of drivers: 'marenzaepernick/driver-umwelt:1.0.2' (highlighted in blue) and 'smartmakers/comtac-lpn-di-s0:1.0.0'. The right screenshot shows the same interface with 'marenzaepernick/driver-umwelt:1.0.2' selected in the dropdown and an 'Assign' button visible below it.

Abbildung 31: thingsHub - Driver einem Device zuordnen

Datentabelle anlegen:

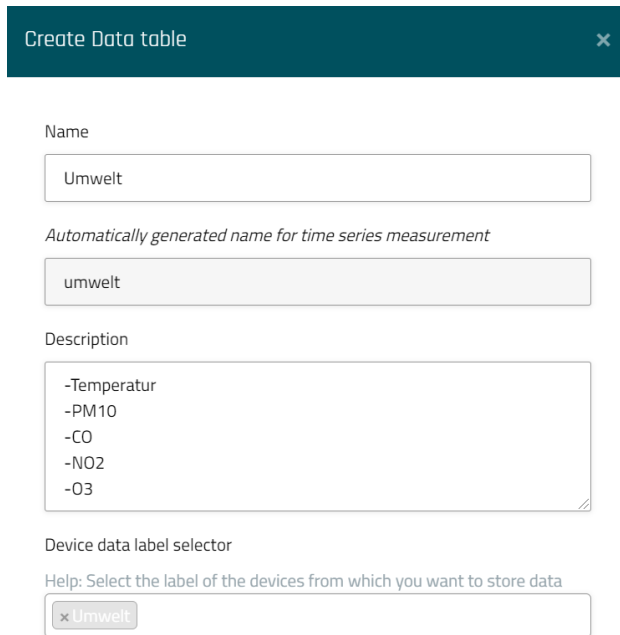


Abbildung 32: thingsHub - Erstellung einer Datentabelle

Die Daten werden in thingsHub in temporären Tabellen sieben Tage gespeichert. Für eine langfristige Speicherung müssen sie in Datentabellen abgelegt werden. Unter der Registerkarte „Data“ wird über das Feld „New“ eine neue Datentabelle angelegt. Dann werden der Tabellennamen, die Beschreibung und die Device Label eingetragen. Das entsprechende Device muss dem Label zugeordnet werden. Die Reihenfolge des Vorgehens ist dabei nicht relevant.

Die Datentabellen werden als Quelle für die Visualisierung genutzt.

5.3.3 Visualisierung

Der erste Schritt in thingshub für die Erstellung einer Visualisierung in Form eines Dashboards ist ein Klick auf die Registerkarte „Open Visualizer“, unter der sich die Startseite des thingsHub Visualizers öffnet.

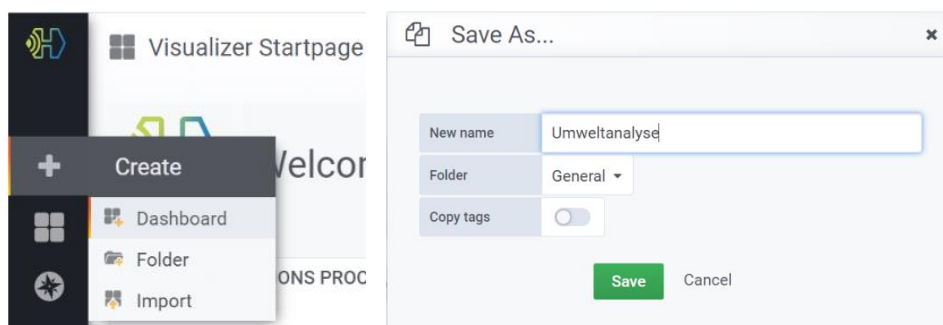


Abbildung 33: thingsHub Visualizer - Erstellung eines Dashboards

Auf dem schwarzen linken Rand kann über + Create Dashboard ein neues Dashboard erstellt werden. Einen Namen kann dem Dashboard nur über die Speichern Funktion gegeben werden. Dann können auf dem Dashboard für jedes Diagramm und jede Zahl neue Panels erstellt werden.

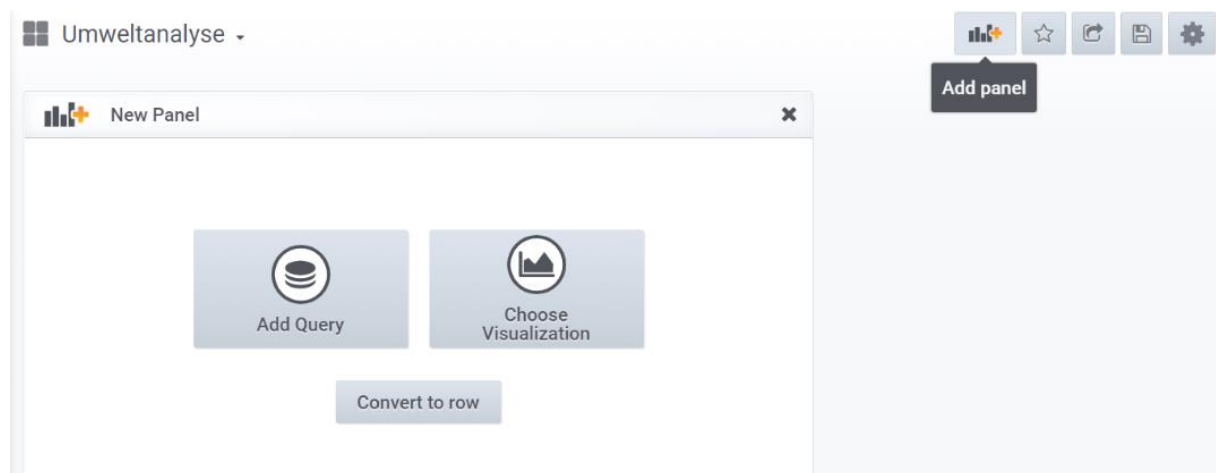


Abbildung 34: thingsHub Visualizer - Erstellung eines Panels

Für jedes neue Panel sollten die drei Registerkarten „General“ für Name und Beschreibung, „Visualization“ für den Diagramm- bzw. Anzeigetypen und „Queries“ für die Datengrundlage. Teilweise gibt es außerdem optional die Registerkarte „Alerts“, hier kann ein Alarm für bestimmte Vorkommnisse eingestellt werden. Hier wird das 1-Stunden-Mittel Liniendiagramm für PM₁₀ erstellt.

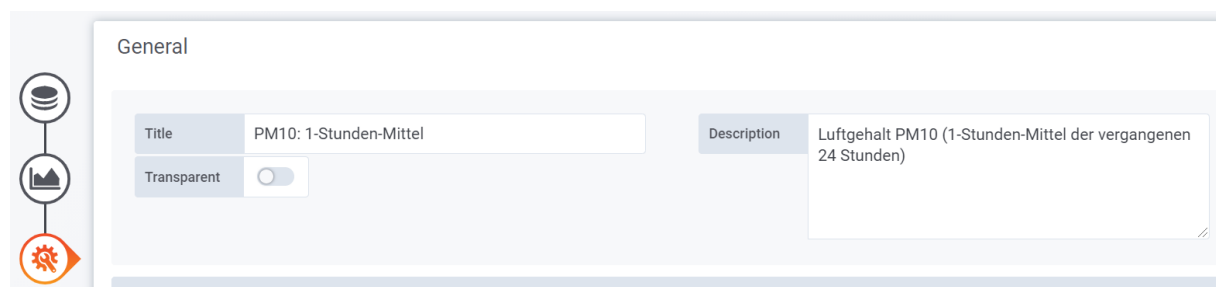


Abbildung 35: thingsHub Visualizer - Panel Registerkarte „General“

Zunächst wird die Art der Visualisierung ausgewählt, hier Graph. Im nächsten Schritt wird dann die Diagrammart ausgewählt, hier Liniendiagramm. Außerdem können Farben, Beschriftungen der Achsen und einiges mehr festgelegt werden.

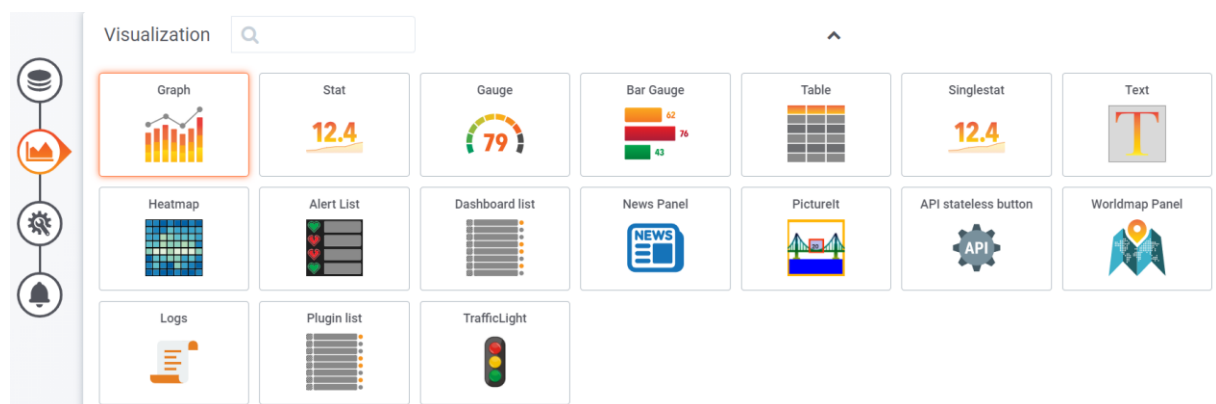


Abbildung 36: thingsHub Visualizer - Panel Registerkarte "Visualization"

Für die Darstellung der Ampelfarben im Hintergrund mit rot für Werte über dem Grenzwert 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, gelb für Werte zwischen 45 und 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und grün für Werte unter 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ werden Thresholds (Schwellwerte) auf der Registerkarte „Visualization“ definiert.

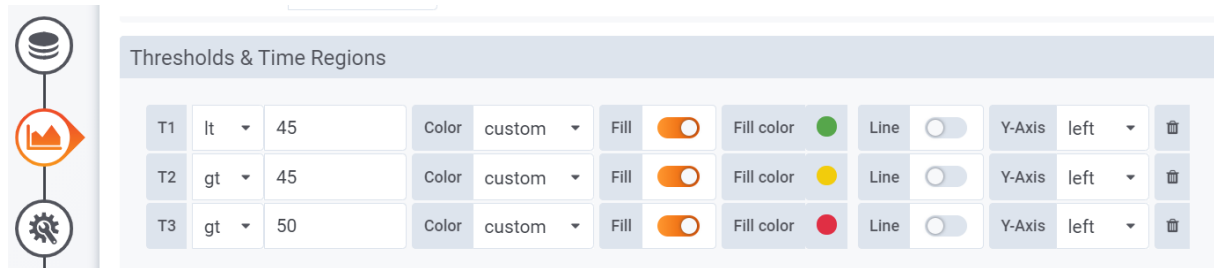


Abbildung 37: thingshub Visualizer - Einfügen eines Schwellwerts

Auf der Registerkarte „Queries“ wird eine Abfrage in Form eines SQL Statements verwendet, um eine konkrete Datenauswahl zu treffen.

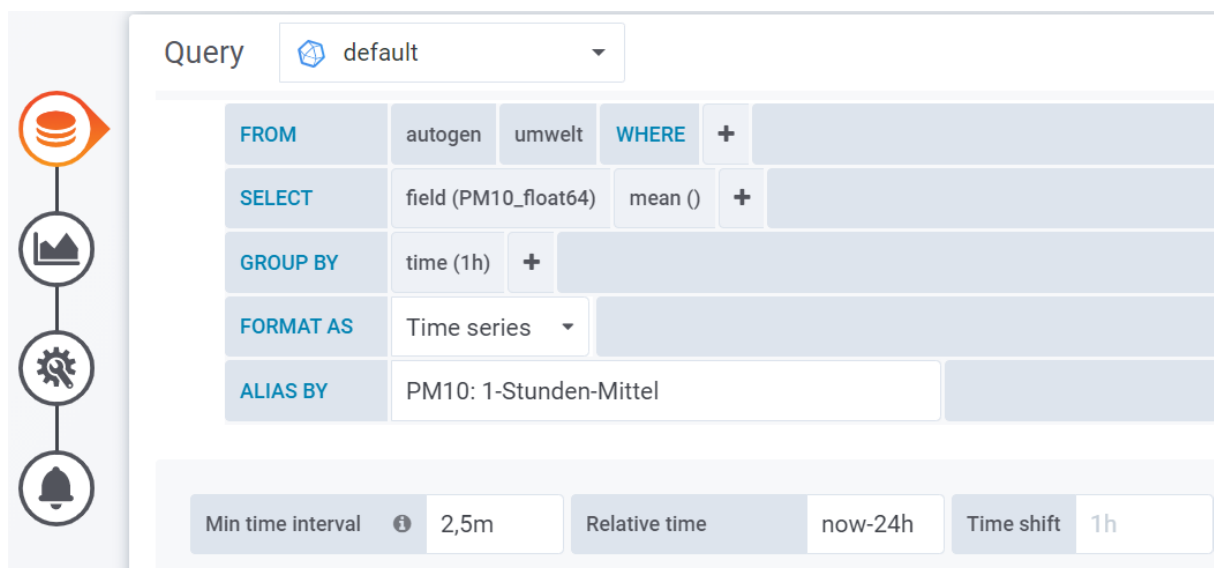


Abbildung 38: thingsHub Visualizer - Panel Registerkarte "Queries"

- autogen: die Datenbank in der die Data Table langfristig gespeichert werden
- umwelt: die eindeutige ID des verwendeten Data Table
- field(PM10_float) Mean(): es werden Durchschnittswerte des Parameters PM10 angezeigt
- time(1h): die Werte werden pro Stunde gruppiert
- Min time interval = 2,5m: die Daten werden im 2,5 Minuten Intervall in die Datentabelle geschrieben
- Relative time = now-24h: das Panel soll die Daten der letzten 24 Stunden anzeigen

So entsteht das folgende Panel.

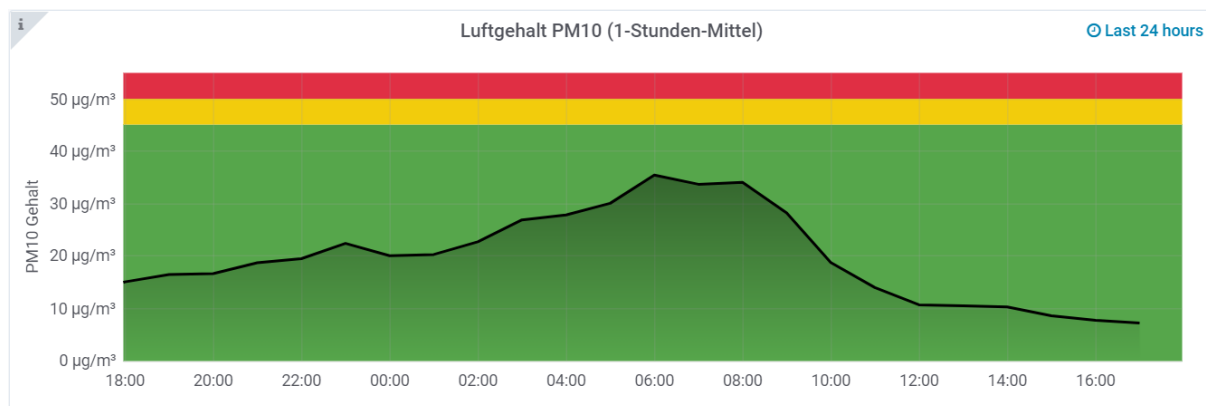


Abbildung 39: PM10 Panel - 1-Stunden-Mittel der vergangenen 24 Stunden

Die weiteren Panels für PM₁₀ werden analog erstellt und im Folgenden abgebildet. Alle Panels zeigen bisher nur die Daten von etwa drei Wochen, da noch nicht mehr Daten vorhanden sind.

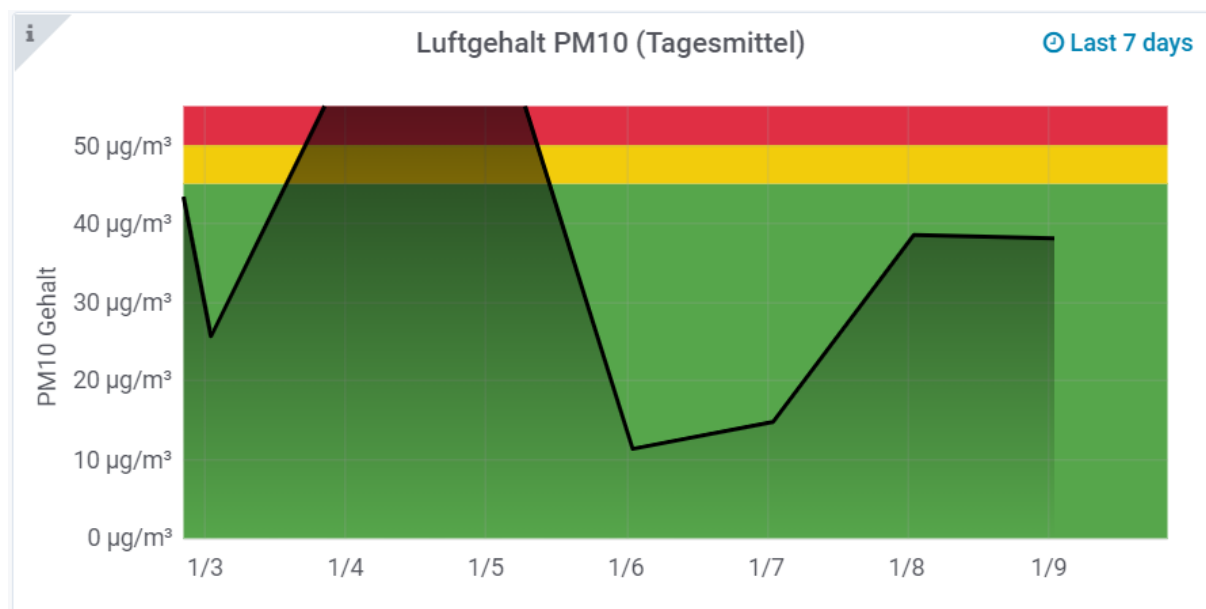


Abbildung 40: PM10 Panel - Tagesmittel der vergangenen 7 Tage

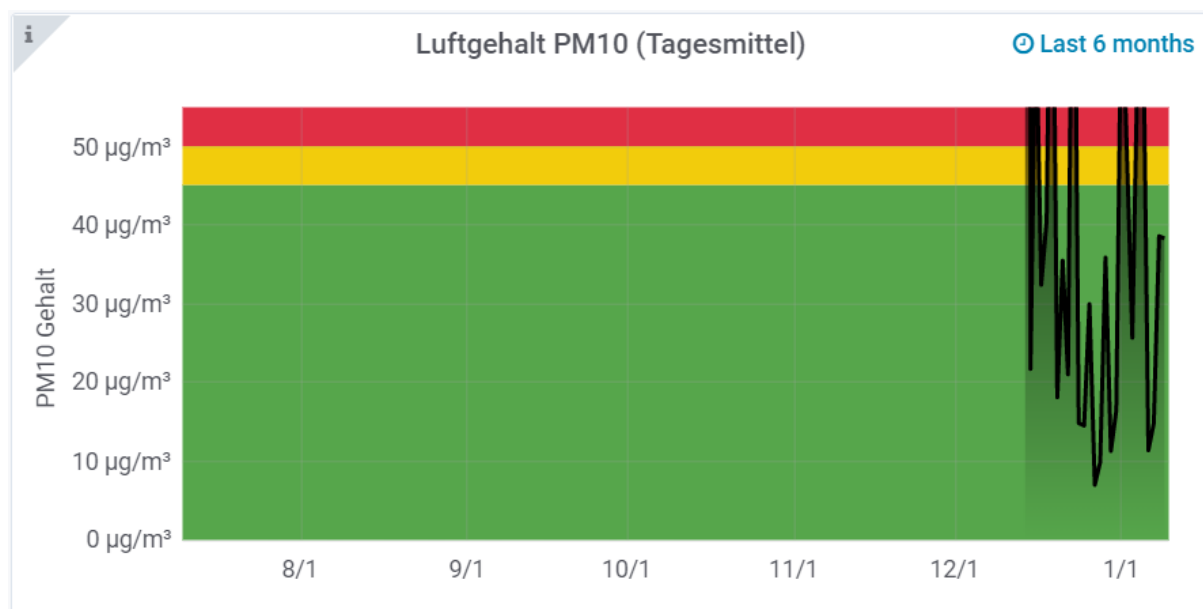


Abbildung 41: PM10 Panel - Tagesmittel der vergangenen 6 Monate

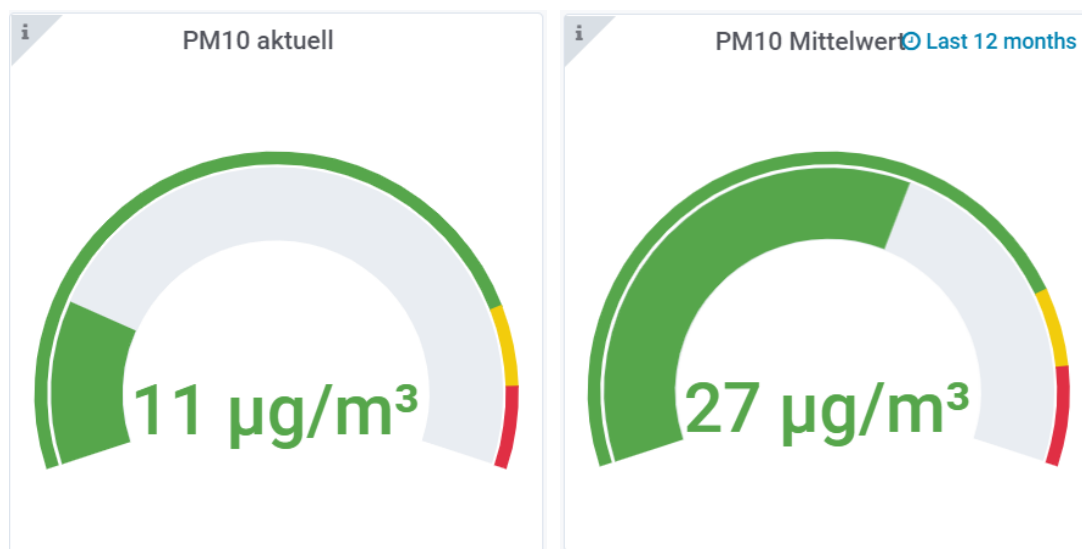


Abbildung 42: PM10 Panel – aktueller Wert und Durchschnitt der vergangenen 12 Monate

In der oberen linken Ecke jedes Dashboards befindet sich eine tooltip, der bei einem mouseover angezeigt wird. Im tooltip steht welcher Grenzwert in dem Dashboard verwendet wurde. Es wurden die Grenzwerte aus Kapitel 3.1.5 verwendet. Da nicht jeder Parameter Grenzwerte für jede Kennzahl besitzt, wurde entsprechend der nächstliegende gewählt. O₃ beispielsweise besitzt nur Grenzwerte für das 1-Stunden-Mittel und das 8-Stunden Mittel, daher wurde der Grenzwert des 8-Stunden-Mittels für alle Dashboards mit einem Intervall > als 8-stündig gewählt z. B. das Tagesmittel und das Jahresmittel Dashboard.

Jedes der fünf Dashboards existiert auch für CO, NO₂ und O₃, allerdings mit anderen Daten und Grenzwerten.

6 Ergebnisse

6.1 Datenanalyse

In diesem Kapitel sollen die Daten der Messungen in Adlershof beschrieben und analysiert werden.

Die verwendeten Daten der Umweltsensoren wurden im Zeitraum vom 15.12.2020 (Dienstag) bis zum 21.12.2020 (Montag) gemessen. Dabei wurde in 2,5-Minuten-Schritten gemessen und die Messwerte nach Stunden gemittelt. Der 8 Uhr Wert setzt sich beispielsweise aus dem Durchschnitt aller Messwerte zwischen 7:01 Uhr und 8:00 Uhr zusammen. Die Umweltmesswerte sind gemittelt nach Stunden und nach Tagen im Anhang zu finden.

Betrachtung der Daten einer Woche (Unterschied Werktag – Wochenende):

Im Messzeitraum von 7 Tagen, gibt es die fünf Werktage 15.12.2020, 16.12.2020, 17.12.2020, 18.12.2020 und 21.12.2020, sowie das Wochenende 19.12.2020 und 20.12.2020.

Im Folgenden werden die Tagesmittel dargestellt. Sie sind in zwei Diagramme aufgeteilt, da die Wertebereiche stark voneinander abweichen.

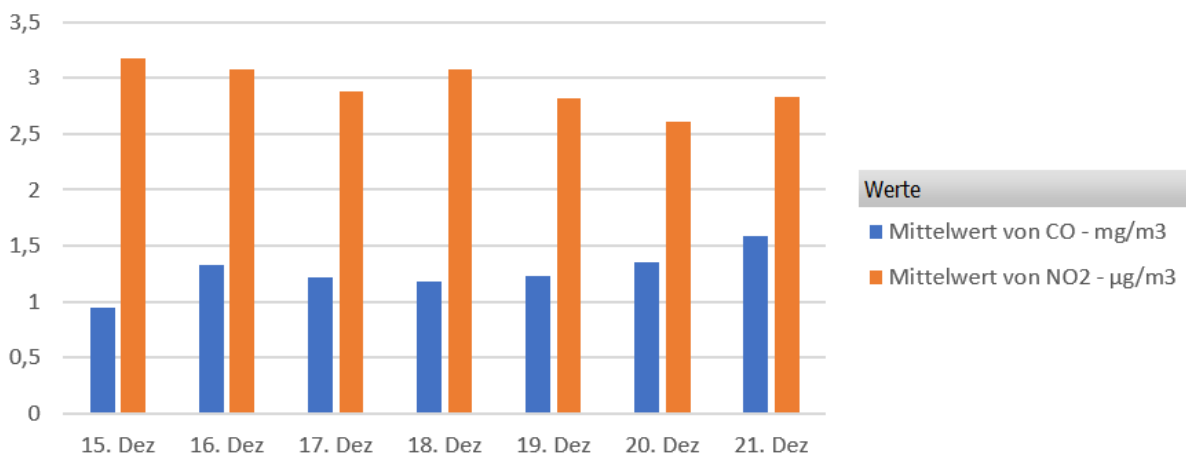


Abbildung 43: Tagesmittel der Parameter CO und NO₂

Der Parameter CO hat das minimale Tagesmittel am Dienstag den 15.12.2020 und das maximale Tagesmittel am Montag den 21.12.2020, die weiteren Tagesmittel der Werktage und die Tagesmittel der Wochenendtage befinden sich dazwischen. Ab Freitag den 18.12.2020 ist die allgemeine Tendenz der Tagesmittel steigend.

Der Parameter NO_2 dagegen hat das minimale Tagesmittel am Sonntag den 20.12.2020 und das maximale Tagesmittel am Dienstag den 15.12.2020. Es ist eine Tendenz zu erkennen, dass Tagesmittel am Wochenende niedriger sind als in der Woche. Die durchschnittlichen Tagesmittel am Wochenende liegen bei $2,72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und in der Woche bei $3,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

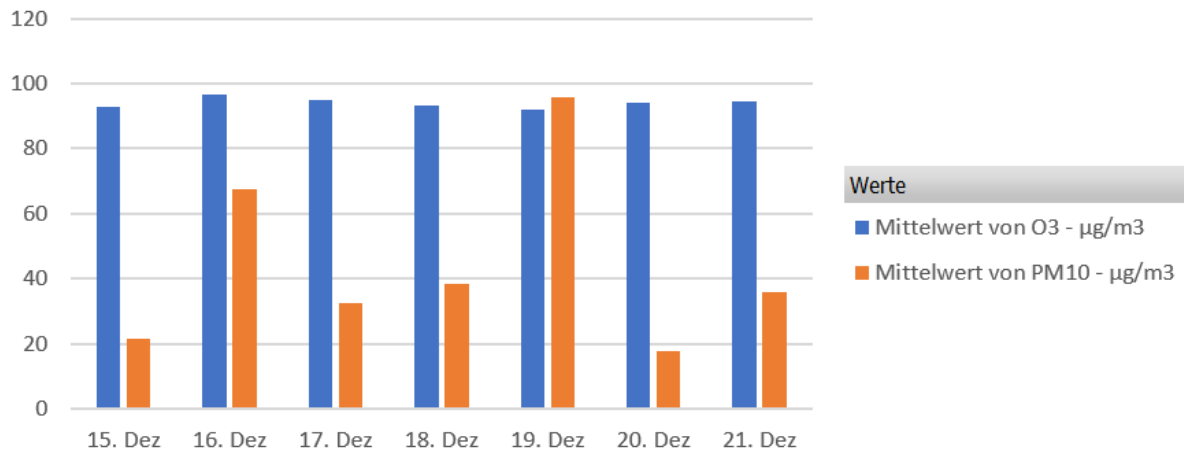


Abbildung 44: Tagesmittel der Parameter O_3 und PM_{10}

Die Tagesmittel des Parameter O_3 liegen alle sehr nah beieinander im Bereich zwischen $92,06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $96,77 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Das minimale Tagesmittel ist Samstag den 19.12.2020 und das maximale Tagesmittel am Mittwoch den 16.12.2020. Es ist keine Tendenz zu erkennen.

Der Parameter PM_{10} hat das minimale Tagesmittel mit $17,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ am Sonntag den 20.12.2020 und das maximale Tagesmittel mit $95,86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ am Samstag den 19.12.2020. Es ist zu erkennen, dass große Schwankungen auftreten. Alle Werktage mit Ausnahme vom Mittwoch den 16.12.2020 haben ein Tagesmittel zwischen $21,54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $38,55 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ansonsten ist keine Tendenz zu erkennen.

Ein signifikanter Zusammenhang zwischen den Tagesmitteltrends der Parameter ist nicht erkennbar. Während die Trends der Gasparameter CO , NO_3 und O_3 jedoch einigermaßen stabil verlaufen, verhält sich der Parameter PM_{10} wesentlich volatiler mit hohen Schwankungen.

Betrachtung eines Werktages:

Im Folgenden werden pro Parameter beispielhaft die Verläufe des 1-Stunden-Mittel eines Werktages dargestellt und erläutert. Als Beispiel Tag wurde Donnerstag der 17.12.2020 gewählt.

Luftgehalt CO (1-Stunden-Mittel):

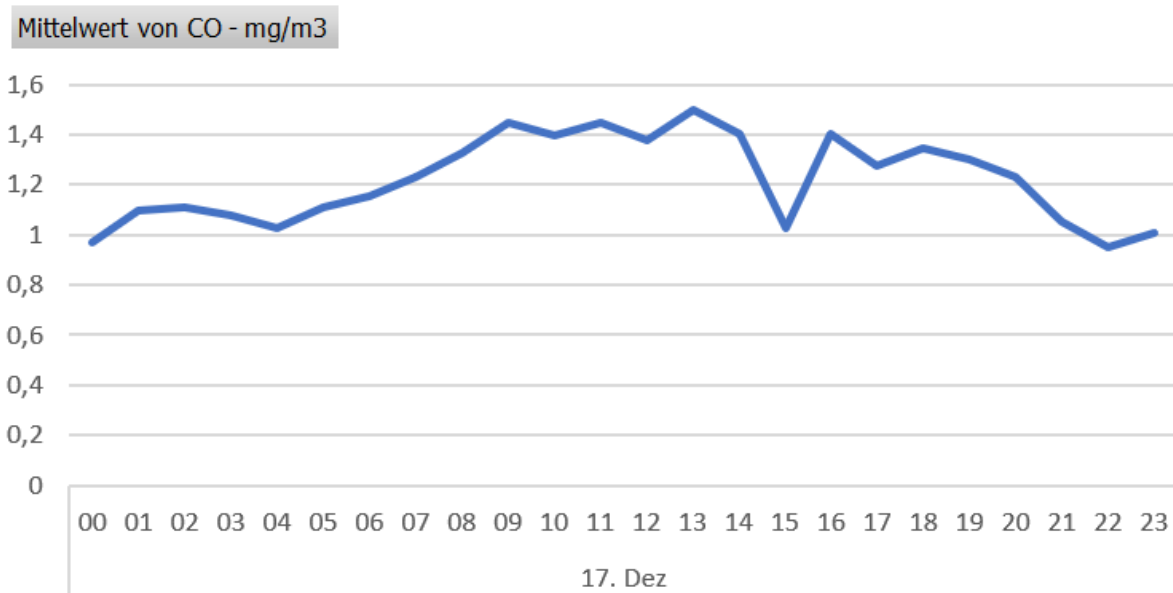


Abbildung 45: 1-Stunden-Mittel des Parameters CO am Donnerstag den 17.12.2020

Betrachtet wird der Parameter CO am Werktag Donnerstag den 17.12.2020. Das Tagesmittel beträgt 1,22 mg/m³, während die 1-Stunden-Mittel zwischen 0,95 mg/m³ und 1,5 mg/m³ schwanken. Alle Messwerte liegen im grünen Bereich mehr als 10% unter dem Grenzwert für 8-Stunden-Mittel 10 mg/m³.

Zwischen 0 und 5 Uhr sind die Werte niedrig, ab dann steigen sie stetig bis etwa 9 Uhr. Dann bleiben sie zunächst bis 14 Uhr hoch. Der 15 Uhr Mittelwert hat einen ungewöhnlich niedrigen Wert, während der 16 Uhr Mittelwert wieder einen ähnlich Wert wie der 14 Uhr Mittelwert hat. Ab etwa 18 Uhr sinken die Werte dann langsam und ab 21 Uhr sind die Werte ähnlich niedrig wie zwischen 0 und 5 Uhr morgens.

Luftgehalt NO₂ (1-Stunden-Mittel):

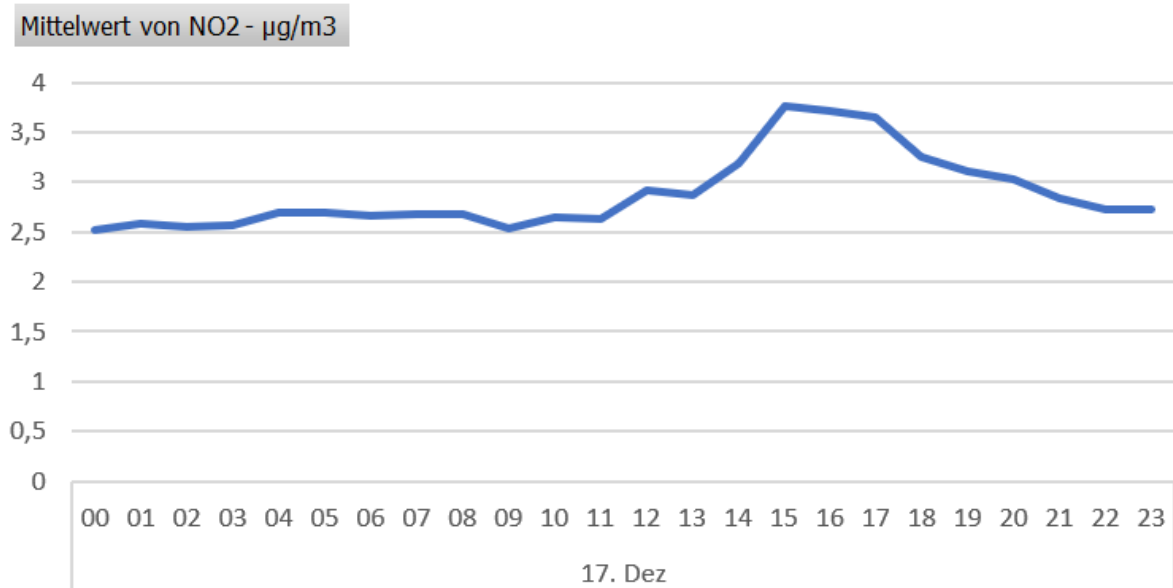


Abbildung 46: 1-Stunden-Mittel des Parameters NO₂ am Donnerstag den 17.12.2020

Betrachtet wird der Parameter NO₂ am Werktag Donnerstag den 17.12.2020. Das Tagesmittel beträgt 2,88 µg/m³, während die 1-Stunden-Mittel zwischen 2,52 µg/m³ und 3,76 µg/m³ schwanken. Alle Messwerte liegen im grünen Bereich mehr als 10% unter dem Grenzwert für 1-Stunden-Mittel 200 µg/m³.

Zwischen 0 und 11 Uhr sind die Werte niedrig, ab dann steigen sie langsam bis zur Hochzeit zwischen 14 und 17 Uhr. Dann sinken die Werte langsam und ab 22 Uhr sind die Werte ähnlich niedrig wie zwischen 0 und 11 Uhr morgens.

Luftgehalt O₃ (1-Stunden-Mittel):



Abbildung 47: 1-Stunden-Mittel des Parameters O₃ am Donnerstag den 17.12.2020

Betrachtet wird der Parameter O_3 am Werktag Donnerstag den 17.12.2020. Das Tagesmittel beträgt $94,85 \mu\text{g}/\text{m}^3$, während die 1-Stunden-Mittel zwischen $89,93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $99,47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ schwanken. Alle Messwerte liegen im grünen Bereich mehr als 10% unter dem jeweiligen Grenzwert für 1-Stunden-Mittel $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bzw. für 8-Stunden-Mittel $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Zwischen 0 und 3 Uhr sind die Werte mittelhoch bei ca. $96\text{--}97 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dann sinken sie und befinden sich zwischen 4 und 8 Uhr bei ca. $92\text{--}93 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ab dann steigen sie langsam bis zum Hoch zwischen 13 und 14 Uhr. Danach sinken die Werte rapide und befinden sich zwischen 15 und 17 Uhr bei ca. $90\text{--}91 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ab dann steigen sie wieder langsam und ab 21 Uhr sind die Werte mit ca. $96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ auf einem ähnlichen Niveau wie zwischen 0 und 3 Uhr morgens.

Luftgehalt PM_{10} (1-Stunden-Mittel):



Abbildung 48: 1-Stunden-Mittel des Parameters PM_{10} am Donnerstag den 17.12.2020

Betrachtet wird der Parameter PM_{10} am Werktag Donnerstag den 17.12.2020. Das Tagesmittel beträgt $32,51 \mu\text{g}/\text{m}^3$, während die 1-Stunden-Mittel zwischen $19,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $48,45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ schwanken. Für PM_{10} gibt es nur den Grenzwert $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für das Tagesmittel und den Grenzwert $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für das Jahresmittel, insofern liegt das Tagesmittel vom 17.12.2020 im grünen Bereich. Allerdings liegen die Tagesmittel vom 16.12.2020 und 19.12.2020 im roten Bereich über $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ab 0 Uhr sinken die Werte zunächst auf ca. $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zwischen 2 Uhr und 3 Uhr, danach steigen sie stetig und bis zum Hochpunkt um 7 Uhr mit $48,45 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ab dann sinken die Werte langsam und befinden sich zwischen 13 und 16 Uhr bei ca. $19\text{--}22 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Danach steigen sie

wieder und erreichen um 19 Uhr einen weiteren Hochpunkt bei ca. $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ab dann sinken die Werte leicht und schwanken zwischen ca. 30 und $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ein signifikanter Zusammenhang zwischen den untertägigen Trends der Parameter ist nicht erkennbar, außer dass die Verläufe nachts etwa zwischen 22 Uhr und 4 Uhr im Vergleich zum Rest des Tages mit weniger Schwankungen verlaufen.

6.2 Bewertung der Daten

Die Frage ist, ob zu den Höhepunkten des Verkehrsaufkommens höhere PM_{10} , CO, NO_2 und O_3 -Gehälter in der Luft festgestellt werden können.

Als Datengrundlage für das Verkehrsaufkommen werden die Messwerte einer Induktionsschleife des DLR verwendet. Die Induktionsschleife verläuft senkrecht zur Fahrbahn und erfasst jedes Fahrzeug, das über sie passiert. Diese Daten werden für den Vergleich mit den Umweltdaten pro Stunde aufsummiert. Dabei werden alle Fahrzeuge, die beispielsweise zwischen 7:01 Uhr und 8:00 Uhr von der Induktionsschleife registriert wurden, dem 8-Uhr-Wert zugeordnet. Die Umweltmesswerte und die Verkehrsdaten sind gemittelt nach Stunden und nach Tagen im Anhang zu finden.

Da zur jetzigen Zeit (2020) viele Menschen aus dem Homeoffice arbeiten, ist davon auszugehen, dass die Anzahl Fahrzeuge im Regelfall höher ausfallen würde. Allerdings sind die Kurven bzw. Höhepunkte des Verkehrs aussagekräftig, weil davon auszugehen ist, dass die Menschen, die zum Standort kommen, ihren gewohnten Arbeitszeiten nachgehen.

Beschreibung der Verkehrsdaten:

Im Folgenden werden die Verläufe der Verkehrsdaten vom DLR als Tagesmittel und 1-Stunden-Mittel genauer erläutert.

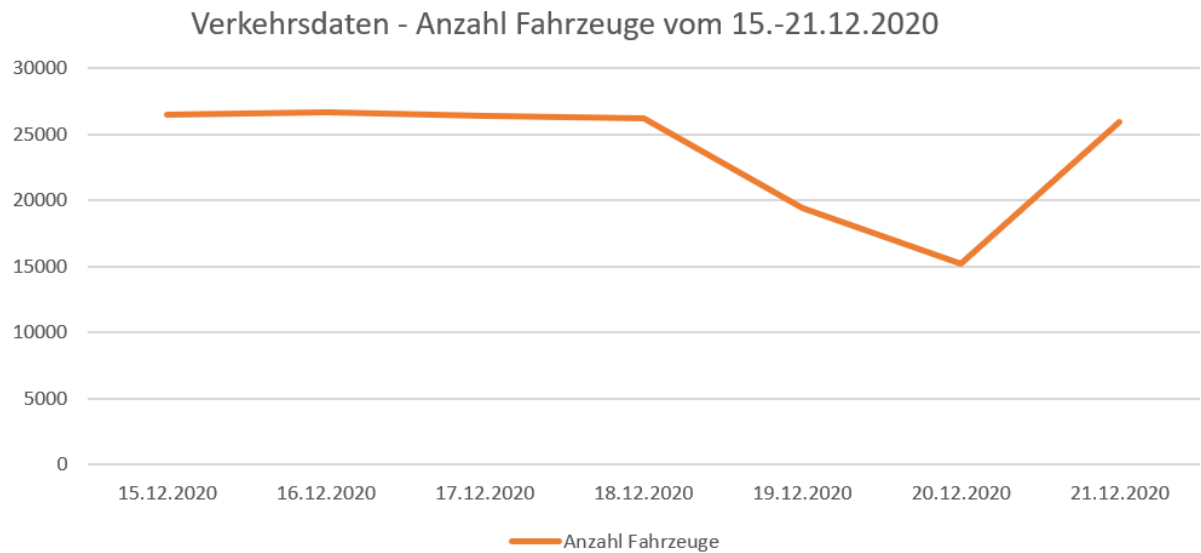


Abbildung 49: Verkehrsdaten - Anzahl Fahrzeuge pro Tag (Wochentrend)

Die Tagessummen der Anzahl Fahrzeuge zeigen, dass die Summen um ca. 26.000 Fahrzeuge an den Werktagen 15.-18.12.2020 und 21.12.2020 kaum variieren. Die Anzahl Fahrzeuge am Samstag den 19.12.2020 sind jedoch etwa 7.000 Fahrzeuge weniger und am Sonntag verringert sich die Anzahl Fahrzeuge nochmal um etwa 4.000 Fahrzeuge. Folglich ist das Verkehrsaufkommen am Wochenende niedriger als an Werktagen.

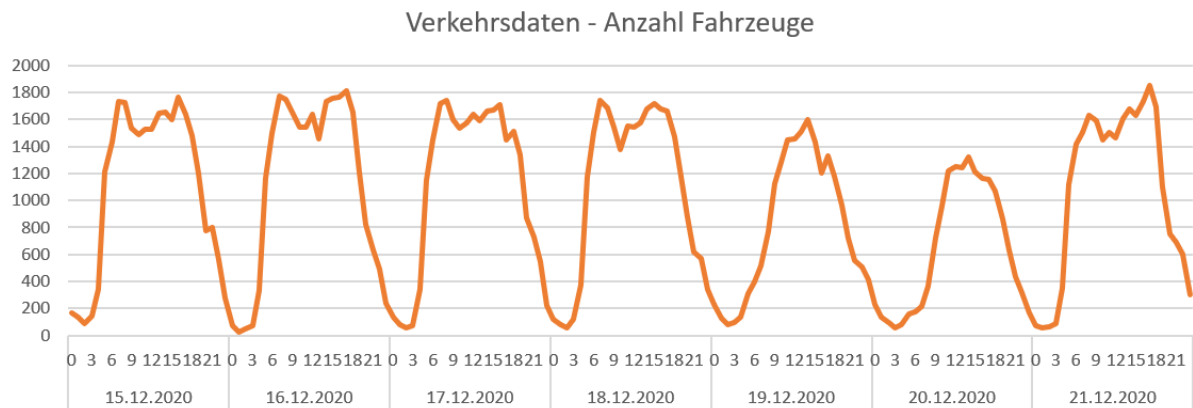


Abbildung 50: Verkehrsdaten - Anzahl Fahrzeuge pro Stunde (Wochentrend)

In dieser Abbildung ist zu sehen, dass sich auch die Tagestrends der Werktage kaum voneinander unterscheiden. Im Folgenden wird der Tagesverlauf des 17.12.2020 detailliert beschrieben.

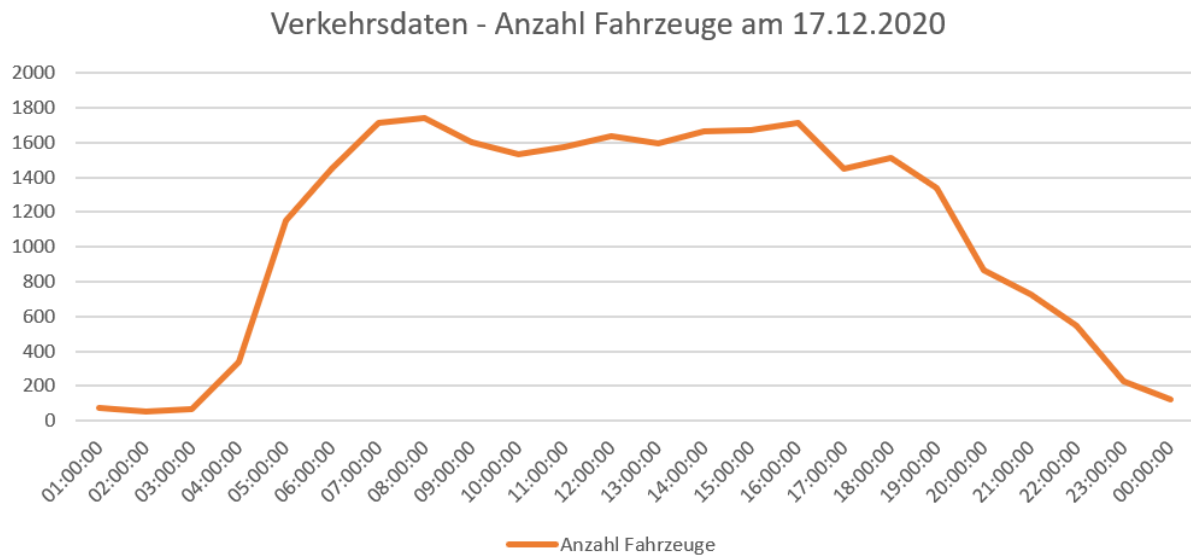


Abbildung 51: Verkehrsdaten - Anzahl Fahrzeuge pro Stunde am Donnerstag den 17.12.2020 (Tagestrend)

Zwischen 0 Uhr und 3 Uhr ist das Verkehrsaufkommen sehr niedrig, dann beginnt die Anzahl Fahrzeuge zu steigen. Der erste Hochpunkte ist im Bereich 7-8 Uhr, denn zu der Zeit befinden sich viele Mensch auf dem Weg zur Arbeit. Danach sinkt die Anzahl Fahrzeuge leicht, bleibt jedoch im hohen Bereich etwa 150-200 Fahrzeuge unter dem Hochpunkt. Um 16 Uhr erreicht sie dann einen weiteren Hochpunkt, ab dann beginnt die Anzahl Fahrzeuge stetig abzunehmen. Um etwa 0 Uhr wird das niedrige Verkehrsaufkommen von zwischen 0 Uhr und 3 Uhr morgens erreicht.

Vergleich der Verkehrsdaten mit den Daten der Umweltsensoren:

Um bewerten zu können, ob der Verkehr einen Einfluss auf die Parameterwerte hat, werden die Daten pro Parameter einzeln übereinandergelegt und ihre Verläufe miteinander verglichen. Dabei wird insbesondere beleuchtet, ob ein ähnliches Trendverhalten zu erkennen ist, die absoluten Werte werden nicht berücksichtigt.

Zuerst werden die Messwerte des Parameters CO mit den Verkehrsdaten verglichen.

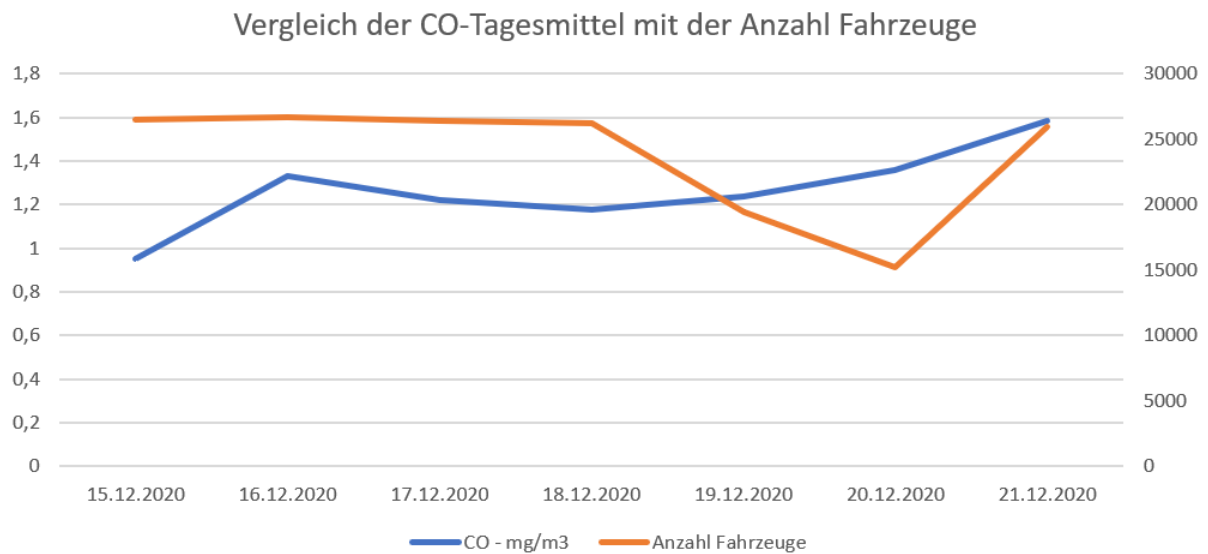


Abbildung 52: Vergleich der CO-Tagesmittel mit der Anzahl Fahrzeuge pro Tag

Der Trend der Verkehrsdaten, dass das Verkehrsaufkommen am Wochenende niedriger ist als an Werktagen, wird vom Luftgehalt CO nicht widerspiegelt. Das durchschnittliche Tagesmittel der CO-Messwerte liegt bei $1,27 \text{ mg/m}^3$ und die Messwerte von Samstag $1,24 \text{ mg/m}^3$ und Sonntag $1,36 \text{ mg/m}^3$ liegen nicht signifikant niedriger bzw. sogar höher.

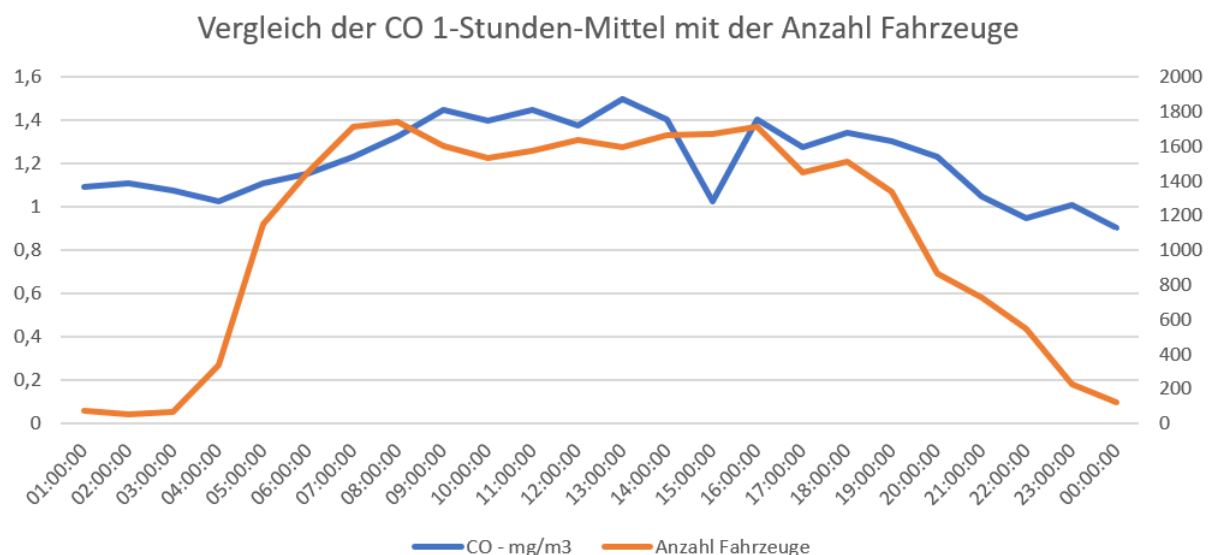


Abbildung 53: Vergleich der CO 1-Stunden-Mittel mit der Anzahl Fahrzeuge pro Stunde am Donnerstag den 17.12.2020

Der untertägige Trend der Verkehrsdaten, dass nachts ein niedriges Verkehrsaufkommen herrscht, es morgens steigt und gegen Abend wieder sinkt, wird von den CO-Messwerten bis auf einen Ausreißer um 15 Uhr widerspiegelt. Die Tendenzen der CO-Messwerte wirken in der Abbildung gering, sind aber deutlich zu erkennen. Das durchschnittliche 1-Stunden-Mittel

der CO-Messwerte liegt bei $1,22 \text{ mg/m}^3$ und die Messwerte von 21 Uhr bis 6 Uhr liegen alle ausnahmslos unter dem durchschnittlichen 1-Stunden-Mittel während die Werte von 7 Uhr bis 20 Uhr mit Ausnahme des 15 Uhr Werte alle über dem durchschnittlichen 1-Stunden-Mittel liegen. Folglich ist ein übereinstimmender Trend zu erkennen.

Als zweites werden die Messwerte des Parameters NO_2 mit den Verkehrsdaten verglichen.

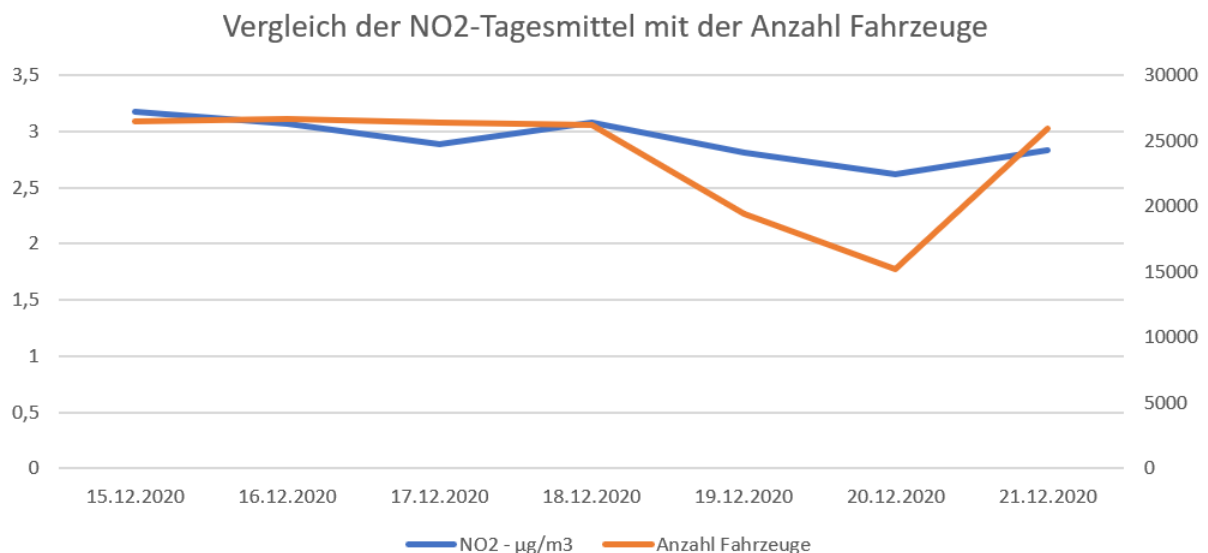


Abbildung 54: Vergleich der NO_2 -Tagesmittel mit der Anzahl Fahrzeuge pro Tag

Der Trend der Verkehrsdaten, dass das Verkehrsaufkommen am Wochenende niedriger ist als an Werktagen, wird vom Luftgehalt NO_2 widerspiegelt, allerdings weniger ausgeprägt. Die Tagesmittel der Werktage variieren stärker als die Anzahl Fahrzeuge pro Tag im Bereich von $2,83 \mu\text{g/m}^3$ bis $3,17 \mu\text{g/m}^3$. Der NO_2 -Messwert von Samstag liegt leicht niedriger bei $2,82 \mu\text{g/m}^3$ und der von Sonntag deutlich niedriger bei $2,61 \mu\text{g/m}^3$. Ein ähnlicher Wochentrend ist folglich zu erkennen.

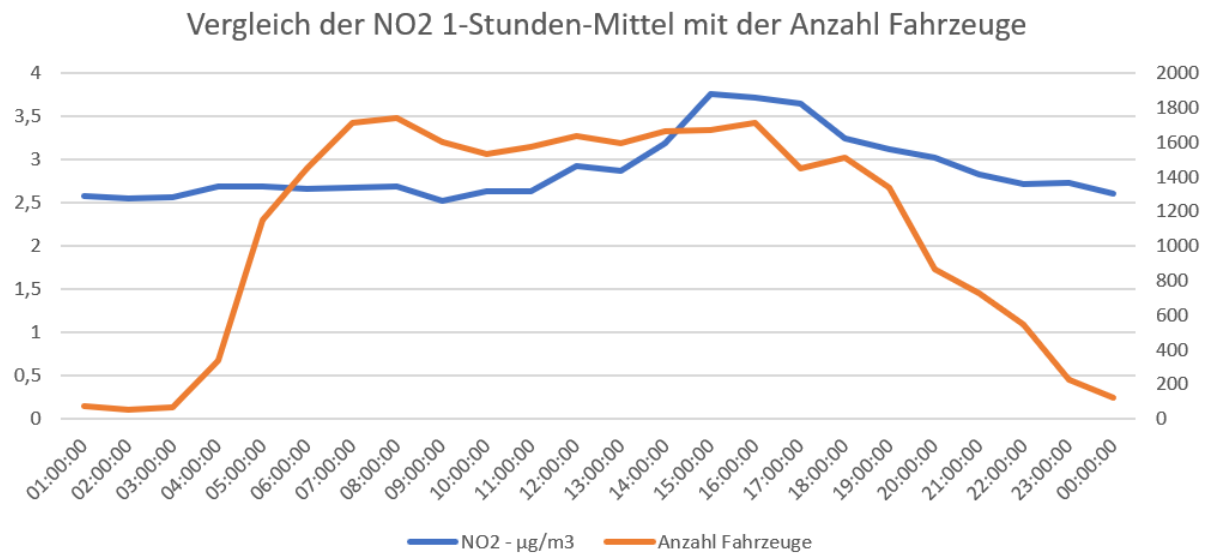


Abbildung 55: Vergleich der NO₂ 1-Stunden-Mittel mit der Anzahl Fahrzeuge pro Stunde am Donnerstag den 17.12.2020

Der untertägige Trend der Verkehrsdaten, dass nachts ein niedriges Verkehrsaufkommen herrscht, es morgens steigt und gegen Abend wieder sinkt, wird von den NO₂-Messwerten nicht widerspiegelt. Die Schwankungen der NO₂-Messwerte sind die meiste Zeit des Tages gering, der einzige Hochpunkt zeichnet sich zwischen 15 Uhr und 18 Uhr ab. Die einzige Trendähnlichkeit zu den Verkehrsdaten liegt in der Senkung der Messwerte gegen Abend. Folglich ist kein signifikant übereinstimmender Trend zu erkennen.

Als drittes werden die Messwerte des Parameters O₃ mit den Verkehrsdaten verglichen.

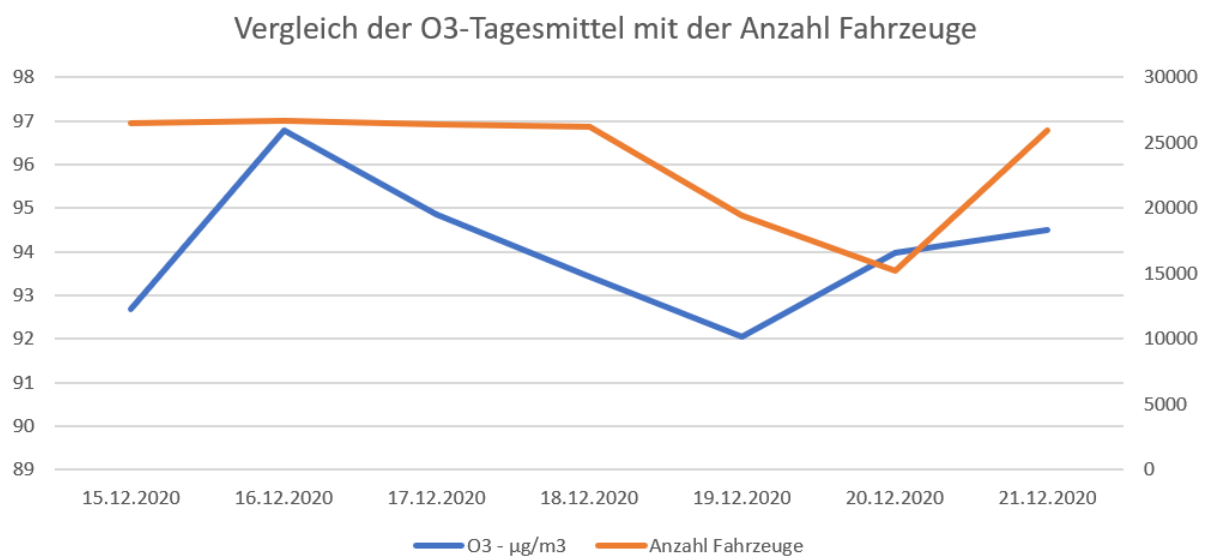


Abbildung 56: Vergleich der O₃-Tagesmittel mit der Anzahl Fahrzeuge pro Tag

Der Trend der Verkehrsdaten, dass das Verkehrsaufkommen am Wochenende niedriger ist als an Werktagen, wird vom Luftgehalt O_3 nur teilweise durch einen niedrigen Wert am Samstag den 19.12.2020 widerspiegelt. Die Werte der ganzen Wochen variieren jedoch zwischen $92,06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $96,77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und das durchschnittliche Tagesmittel liegt bei $94,03 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Das Tagesmittel von Sonntag liegt mit $93,98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zwar knapp unter dem Durchschnitt, von den Werktagen liegen jedoch nur drei Tagesmittel höher als der Durchschnitt und zwei sind niedriger. Folglich ist keine übereinstimmender Wochentrend erkennbar.

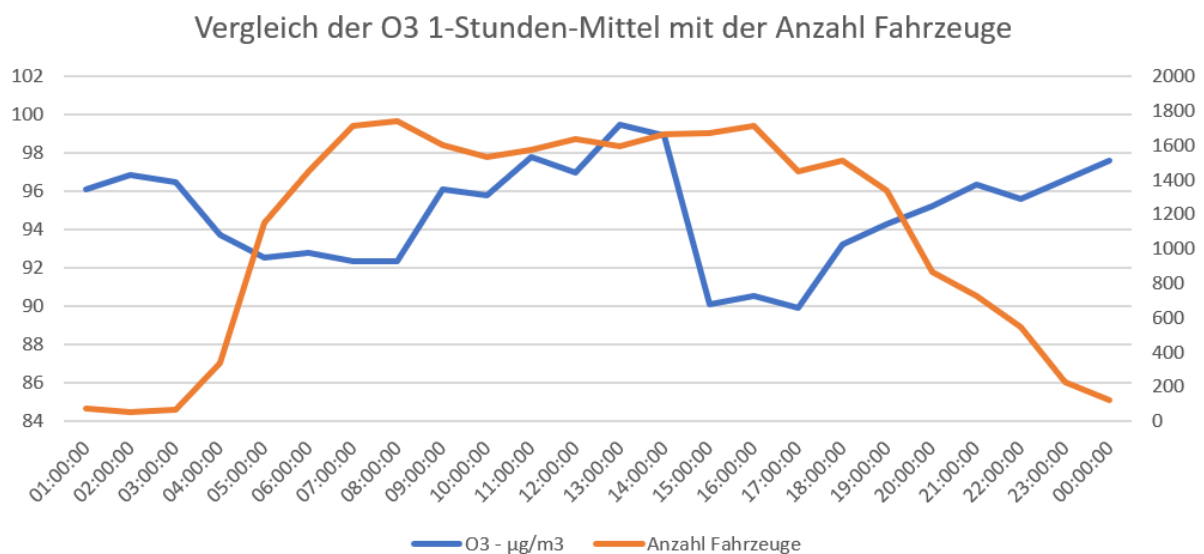


Abbildung 57: Vergleich der O_3 1-Stunden-Mittel mit der Anzahl Fahrzeuge pro Stunde am Donnerstag den 17.12.2020

Der untertägige Trend der Verkehrsdaten, dass nachts ein niedriges Verkehrsaufkommen herrscht, es morgens steigt und gegen Abend wieder sinkt, wird von den O_3 -Messwerten bis nicht widerspiegelt. Die Tendenzen der O_3 -Messwerte zeigen nachts mittelhohe Werte und tagsüber zwei Tiefpunkte zwischen 5 Uhr und 8 Uhr und zwischen 15 und 17 Uhr und dazwischen einen Hochpunkt gegen 13 Uhr. Diese Trends stehen im Gegensatz zu den Trends der Verkehrsdaten. Es ist folglich kein übereinstimmender Trend zu erkennen.

Als viertes werden die Messwerte des Parameters PM_{10} mit den Verkehrsdaten verglichen.

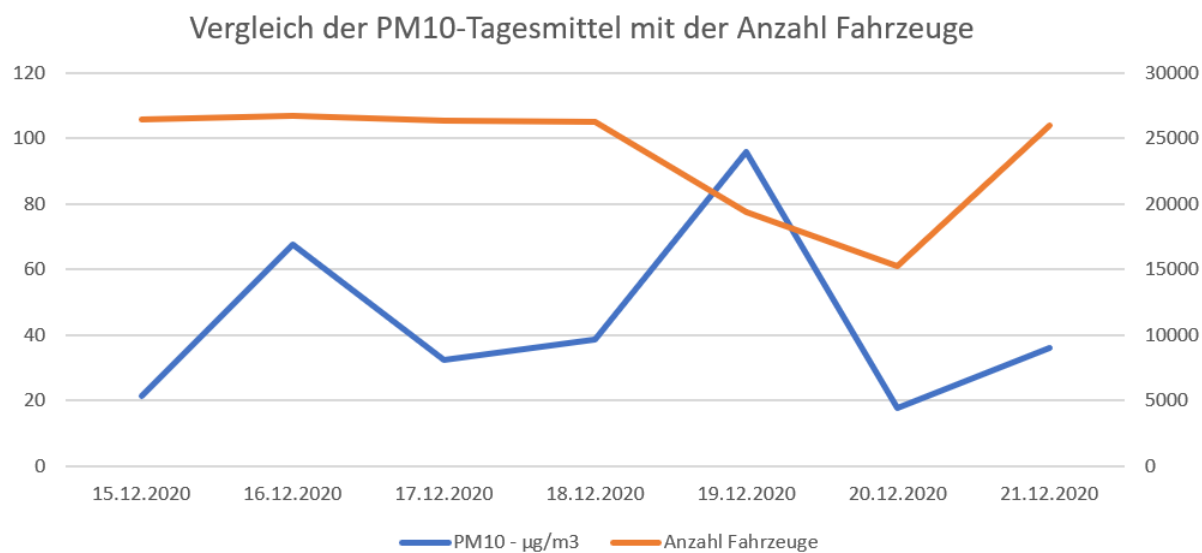


Abbildung 58: Vergleich der PM₁₀-Tagesmittel mit der Anzahl Fahrzeuge pro Tag

Der Trend der Verkehrsdaten, dass das Verkehrsaufkommen am Wochenende niedriger ist als an Werktagen, wird vom Luftgehalt PM₁₀ nur durch ein niedriges Tagesmittel von 17,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ am Sonntag den 20.12.2020 widerspiegelt. Das Tagesmittel von Samstag den 19.12.2020 ist mit 95,86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ jedoch das höchste Tagesmittel dieser Woche. Die Tagesmittel der Werktage variieren ebenfalls deutlich zwischen 21,54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und 67,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und drei der Werktage liegen höher als das durchschnittliche Tagesmittel von 35,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und zwei sind niedriger. Folglich ist keine übereinstimmender Wochentrend erkennbar.

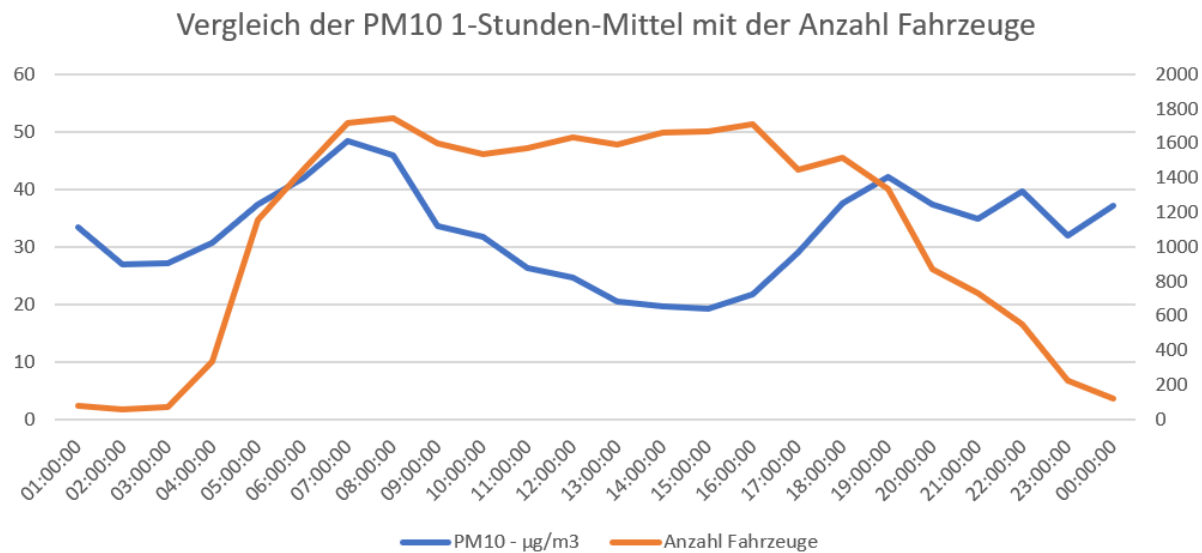


Abbildung 59: Vergleich der PM₁₀ 1-Stunden-Mittel mit der Anzahl Fahrzeuge pro Stunde am Donnerstag den 17.12.2020

Der untertägige Trend der Verkehrsdaten, dass nachts ein niedriges Verkehrsaufkommen herrscht, es morgens steigt und gegen Abend wieder sinkt, wird von den PM₁₀-Messwerten tendenziell widergespiegelt. Während die Verkehrsdaten tagsüber konstant im hohen Bereich bleiben, sinken die PM₁₀-Messwerte nach 8 Uhr und erreichen einen Tiefpunkt zwischen 14 und 15 Uhr bevor sie wieder steigen und einen Hochpunkt zwischen 18 und 19 Uhr erreichen. Dabei fällt insbesondere auf, dass die Werte des Tiefpunkts tagsüber niedriger sind als die Werte nachts. Folglich ist eine grobe Tendenz zu erkennen, aber ein signifikant übereinstimmender Trend ist nicht festzustellen.

Zusammenfassende Bewertung:

Für CO scheint ein Zusammenhang zwischen den Messwerten und dem Verkehr zu bestehen, das bestätigt der untertägige Trend. Die nicht zusammenpassenden Wochentrends suggerieren, dass es noch weitere Einflüsse gibt, die auf die CO-Messwerte wirken, wie z.B. das Wetter.

Für NO₂ bestätigt der Wochentrend einen leichten Zusammenhang zwischen den Messwerten und dem Verkehrsaufkommen. Die generell geringen untertägigen Schwankungen mit nur einem nicht sehr ausgeprägten Hochpunkt suggerieren, dass der NO₂-Gehalt in der Luft nicht direkt auf die Anzahl vorbeigefahrener Autos reagiert, sondern eher auf das Gesamtverkehrsaufkommen. Andere Faktoren als der Verkehr können sich ebenfalls auswirken. Die geringen Schwankungen im Bereich von etwa 2-4 µg/m³ deuten jedoch eher darauf hin, dass nur sehr stark ausgeprägte Faktoren wie ein Brand oder eine starke Rauchentwicklung in der Nähe des Sensors einen signifikanten Effekt auf die NO₂-Messwerte haben können.

Für O₃ sind keine übereinstimmenden Trends erkennbar. Das Verkehrsaufkommen scheint keinen erkennbaren Einfluss auf die O₃-Messwerte zu haben.

Der Parameter PM₁₀ zeigt im untertägigen Trend Ansätze einer Übereinstimmung mit dem Verkehrsaufkommen. Allerdings treten einige volatile Schwankungen unabhängig von den Verkehrsdaten auf. Das deutet darauf hin, dass auch hier andere Faktoren einen Einfluss haben. In Kapitel 3.2.2 wurde bereits erläutert, dass PM-Sensoren die Partikel einer

bestimmten Größe zählen. Dabei können sich insbesondere auch unschädlichen Partikel wie Wasserteilchen auf die Messwerte auswirken.

Insgesamt betrachtet gibt es potenziell diverse Faktoren, die einen Einfluss auf die Parameter in der Luft haben, wie z.B. meteorologische Bedingungen oder Industrien in der Umgebung. Diese Faktoren können nicht ausgeschlossen werden, dennoch zeigen die Parameter CO, NO₂ und PM₁₀ Tendenzen, die auf einen Zusammenhang zwischen Verkehrsaufkommen und Umweltparameter vermuten lassen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Standortwachstum des Technologiepark Adlershof und das damit einhergehende erhöhte Verkehrsaufkommen schlägt sich nicht nur in Staus nieder, sondern fördert auch die Notwendigkeit eines Umweltmonitorings. Denn eine hohe Verkehrsbelastung bedeutet auch eine Menge Abgase, die Fußgänger insbesondere an Hauptstraßen einatmen. Das Ziel dieser Masterarbeit war die Konzeption und prototypische Entwicklung eines Umweltsensorkpaketes, das im Technologiepark Adlershof Luftqualitätsdaten misst und ihre Trends mit denen der Verkehrsmessungen zu vergleichen.

Um ein geeignetes Sensorkpaket zusammenzustellen wurde zunächst eine Klassifizierung der Sensoren nach Preisen, Trennschärfe, Genauigkeit, LoRaWAN-Kompatibilität und Aufwand der Implementierung vorgenommen. Schwierig war dabei die Verallgemeinerung von Umweltsensoren. Das Wort Umweltsensor ist insofern irreführend, als dass es ein sehr breites Feld bietet. Deswegen wurde speziell auf Sensoren für Luftparameter eingeschränkt und dann nochmal auf jeden einzelnen Parameter. Die Parameter, die gemessen werden sollten, im ersten Schritt herauszuarbeiten, war eine gute Einschränkung, auf deren Basis der Vergleich der Sensoren anhand der Kriterien erst möglich wurde. Aber auch innerhalb der Klassifikation gibt es noch einige Unterschiede zwischen verschiedenen Anbietern, insbesondere in den Kategorien mittelteuer und mittelteure Komplettlösungen.

Die Erarbeitung der Parameter beruhte auf EU-Richtlinien zu Grenzwertbestimmungen, Vorkommen der Parameter in den Abgasen von Kraftfahrzeugen, Schädlichkeit für den Menschen und Verfügbarkeit von Messwerten des Parameters an Referenzstationen in Berlin.

Auf der Basis der Klassifikation und der Anforderungen von Wista Management GmbH wurden mithilfe einer Nutzwertanalyse die geeigneten Sensoren für diesen Anwendungsfall identifiziert. Ein wichtiges Kriterium, das einige Herausforderungen mit sich brachte, war die Genauigkeit. Bereits bei der Klassifizierung fiel auf, dass es wenige oder sehr inkonsistente Erfahrungswerte zur Genauigkeit gibt, daher wurde für die endgültige Auswahl der Sensoren ein Test an einer Referenzstation durchgeführt, um die zwei final zur Auswahl stehenden Sensorkpakete im direkten Vergleich zu bewerten. Die Entscheidung fiel auf Sensoren der Kategorie mittelteuer von dem Anbieter Alphasense und die Parameter PM₁₀, CO, NO₂ und O₃.

Als Übertragungstechnik wurde initial LoRaWAN festgelegt, weshalb auf eine Kompatibilität schon bei der Literaturrecherche geachtet wurde. Allerdings sollte bei der Verwendung dieser Übertragungstechnik genau geprüft werden, ob der Implementierungsort der Sensoren in der Nähe eines LoRaWAN Gateways liegt. Je nach Umgebung (hohe Häuser, Bäume, etc.) und Typ des Gateways kann die Verbindungsstabilität stark schwanken. Der Vorteil dieser Übertragungstechnik liegt in der hohen Energieeffizienz und dem offenen Lizenzmodell. Im Konzept wurden zwei mögliche Architekturen beschrieben, das offene Netzwerk The Things Network und das kommerzielle Netzwerk thingshub. Letzteres wurde für die Implementierung in Adlershof verwendet.

Für die Datenaufbereitung und Visualisierung ist relevant, dass es ein geeignetes Bewertungsschema für die Messwerte gibt. Der Nutzer der Visualisierung sollte erkennen können, ob ein Wert als gut oder schlecht einzuordnen ist. Dafür wurde auf die in der Literaturrecherche herausgearbeiteten Grenzwerte der EU zurückgegriffen. Außerdem mussten Kennzahlen definiert werden, die verständlich sind, wie ein 1-Stunden-Mittel oder ein Tagesmittel.

Die Referenztests zeigten, dass auch das Sensorkpaket mit der höheren Genauigkeit keine absolute Messgenauigkeit bietet. Um einer Inkonsistenz entgegenzuwirken wurden mindestens 1-Stunden-Mittel gebildet. Das bedeutet, dass bei 15-minütigen Messungen der Durchschnitt von mindestens vier Messwerten ermittelt wird. Außerdem wurde bei der Datenanalyse mehr auf die Vergleiche von Trends gesetzt als die absolute Genauigkeit.

Das Konzept wurde in Zusammenarbeit mit der Beuth Hochschule und dem DLR umgesetzt und prototypisch am Ernst-Ruska-Ufer in Adlershof implementiert. Der Standort eignet sich gut, da ein LoRaWAN Gateway in der Nähe ist, eine Stromversorgung gewährleistet werden kann und das DLR an diesem Standort Verkehrserhebungen durchführt, die für den Vergleich der Umweltdaten mit den Verkehrsdaten verwendet werden konnten. Das Gehäuse besteht aus Kunststoff und wurde mit dem 3D-Drucker erstellt, damit es die Elektronik vor Feuchtigkeit schützen und gleichzeitig Lufteinzug für die Sensoren gewährleisten kann. Montiert wurde es an einer Brücke in einer Höhe von etwa 6m.

Die Ergebnisse der Datenanalyse und der Vergleich mit den Verkehrsdaten konnten einen Zusammenhang zwischen den Luftgehalten der Parameter CO, NO₂ und PM₁₀ und den Trends des Verkehrsaufkommens tendenziell bestätigen. Allerdings gibt es auch Abweichungen in

den Trends, sodass davon ausgegangen werden muss, dass noch weitere Faktoren einen Einfluss auf die Luftparameter haben, wie z.B. meteorologische Bedingungen oder Industrien in der Umgebung.

Ausgehend von den in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnissen wäre zu fragen, ob vergleichbare Messwerte bereits an anderen Standorten erhoben werden. Es wäre lohnend, eine Datenplattform zum Vergleich von Umweltdaten und zur Interaktion mit anderen Interessenten zu erschaffen. Die Herausforderung dabei ist es, ein einheitliches Datenmodell zu definieren.

Die langfristige Implementierung der Sensoren in Adlershof führt weiterhin zu der Frage, ob sich aus der geschaffenen Datengrundlage weitere Forschungsfragen ergeben. Ein interessanter Bereich wäre die Simulation. Kann aus den Daten der Vergangenheit eine Vorhersage über die Zukunft getroffen werden? Ebenfalls interessant wäre eine Anbindung von weiteren Datenquellen, wie beispielsweise Wetterdaten, und die Untersuchung der sich daraus ergebenden potenziellen Zusammenhänge.

Außerdem ergibt sich aus den Ergebnissen der Datenanalyse und -bewertung weiterer Forschungsbedarf zu anderen Faktoren, die die Umwelt und insbesondere die Luftqualität beeinflussen, wie etwa die Industrie oder der Flugverkehr.

Literaturverzeichnis

- Akyildiz, I. F., Su, W. & Sankarasubramaniam, Y. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks* (38), 393–422. Zugriff am 02.06.2020. Verfügbar unter <https://bwn.ece.gatech.edu/surveys/sensornets.pdf>
- Aliexpress.com (Hrsg.) (2020, 27. September). *MQ131 ozon sensor modul*. Zugriff am 27.09.2020. Verfügbar unter https://de.aliexpress.com/item/4000575439653.html?src=google&albch=shopping&acnt=494-037-6276&isdl=y&slnk=&plac=&mtctp=&albbt=Gpoogle_7_shopping&aff_atform=google&aff_short_key=UneMJZVf&&albagn=888888&albcpr=1705854617&albag=67310370915&trgt=539263010115&crea=de4000575439653&netw=u&device=c&albpgr=539263010115&albpd=de4000575439653&gclid=CjwKCAjw8MD7BRArEiwAGZsrBXV1uHnqylZWLCmOdNGbsu-sO6hinTNYhmvb3H8HQz3zizRNbxkhoCGfEQAvD_BwE&gclsrc=aw.ds
- Alphasense Ltd (Hrsg.) (Juli 2014). *Alphasense User Manual. A4 Analogue Front End (AFE) Circuit Board Family* (2. Aufl.) (072-0281).
- Alphasense Ltd (Hrsg.) (2020, 24. September). *Products | Alphasense*. Zugriff am 24.09.2020. Verfügbar unter <http://www.alphasense.com/index.php/air/products/>
- Bachmann, P. & Lange, M. (2013). *Mit Sicherheit gesund bauen. Fakten, Argumente und Strategien für das gesunde Bauen, Modernisieren und Wohnen* (2. Aufl. 2013). Wiesbaden: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2523-0>
- BerlinOnline Stadtportal GmbH & Co. KG (Hrsg.) (2020a, 22. September). *Vergleich mit Kurzzeit-Ziel- und Grenzwerten für das Jahr 2020 | Berliner Luftgüte Messnetz (BLUME) | Luftqualität und Luftgüte in Berlin*. Zugriff am 22.09.2020. Verfügbar unter <https://luftdaten.berlin.de/exceed>
- BerlinOnline Stadtportal GmbH & Co. KG (Hrsg.) (2020b, 23. September). *Aktueller Luftqualitätsindex | Berliner Luftgüte Messnetz (BLUME) | Luftqualität und Luftgüte in Berlin*. Zugriff am 23.09.2020. Verfügbar unter <https://luftdaten.berlin.de/lqi>
- Bernhard, F. (Hrsg.). (2004). *Technische Temperaturmessung. Physikalische und meßtechnische Grundlagen, Sensoren und Meßverfahren, Meßfehler und Kalibrierung ; Handbuch für Forschung und Entwicklung, Anwendungspraxis und Studium ; mit 297 Tabellen und 202 Berechnungsbeispielen*. Berlin: Springer.

- BMBF-Internetredaktion (2019). *Die Maker-Bewegung - BMBF*. Zugriff am 03.06.2020.
Verfügbar unter <https://www.bmbf.de/de/maker-szene-2128.html>
- Bosch Sensortec GmbH (Hrsg.) (07/2017). *BME680 Datasheet*. Zugriff am 27.09.2020.
Verfügbar unter <https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/3660/BME680.pdf>
- Breeze Technologies (Hrsg.) (2020, 9. Juli). *Luftqualitätssensoren von Breeze Technologies - Breeze Technologies*. Zugriff am 24.09.2020. Verfügbar unter <https://www.breeze-technologies.de/de/luftqualitaetssensoren/#datenuebertragung>
- Cable, M. (2005). *Calibration. A technician's guide : [calibration basics, documentation, instrument calibration, bench vs. field calibration ... and more]* (ISA technician series). Research Triangle Park, NC: ISA.
- Chan, M. (2006). *Air quality guidelines. Global update 2005 ; particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.
Retrieved from http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf?ua=1
- Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) (2020a, 18. September). *Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Berlin Tempelhof*. Zugriff am 18.09.2020. Verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/wetter/wetterundklima_vorort/berlin-brandenburg/berlin_tempelhof/_node.html
- Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) (2020b, 23. September). *Wetter und Klima - Glossar - L - Luftdruck*. Zugriff am 23.09.2020. Verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=101518&lv3=101614>
- Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) (2020c, 23. September). *Wetter und Klima - Glossar - L - Luftfeuchte*. Zugriff am 23.09.2020. Verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=101518&lv3=101616>
- Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) (2020d, 23. September). *Wetter und Klima - Glossar - T - Temperatur*. Zugriff am 23.09.2020. Verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102672&lv3=102744>
- Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) (2020e, 23. September). *Wetter und Klima - Glossar - W - Wind*. Zugriff am 23.09.2020. Verfügbar unter

<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=102936&lv3=103196>

Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) (2020f, 23. September). *Wetter und Klima - Glossar - W - Windgeschwindigkeit*. Zugriff am 23.09.2020. Verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102936&lv3=103174>

Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) (2020g, 23. September). *Wetter und Klima - Glossar - W - Windrichtung*. Zugriff am 23.09.2020. Verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=102936&lv3=103182>

Europäische Kommission. (2019). Festlegung einer fünften Liste von Arbeitsplatz-Richtgrenzwerten. RICHTLINIE (EU) 2019/1831. Zugriff am 23.09.2020. Verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L1831&from=EN>

Europäisches Parlament und Rat. (2004). Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen aufgrund der Verwendung organischer Lösemittel in bestimmten Farben und Lacken und in Produkten der Fahrzeugreparaturlackierung. RICHTLINIE 2004/42/EG. Zugriff am 23.09.2020. Verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32004L0042&from=SK>

Europäisches Parlament und Rat. (2019). Festsetzung von CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge. VERORDNUNG (EU) 2019/ 631. Zugriff am 11.06.2020. Verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0631&from=DE>

Fab-Lab.eu (Hrsg.) (2015). *#IoT OCTOPUS - Badge for IoT Evaluation by Fab-Lab.eu on Tindie*. Zugriff am 27.09.2020. Verfügbar unter <https://www.tindie.com/products/FabLab/iot-octopus-badge-for-iot-evaluation/>

Grafana Logo. Zugriff am 15.09.2020. Verfügbar unter [Grafana.com](https://grafana.com)

Zaepernick, M. (20.02.2020). *Kategorisierung Umweltsensoren* Interview mit Guido Burger. Berlin.

Hatch, M. (2014). *The maker movement manifesto. Rules for innovation in the new world of crafters, hackers, and tinkerers*. New York: McGraw-Hill Education.

Hawa Dawa GmbH (Hrsg.) (2020, 23. September). *Sentience. Hawa Dawa*. Zugriff am 24.09.2020. Verfügbar unter <https://hawadawa.com/de/sentience/>

- Haxhibeqiri, J., Poorter, E. de, Moerman, I. & Hoebeke, J. (2018). A Survey of LoRaWAN for IoT. From Technology to Application. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 18 (11). <https://doi.org/10.3390/s18113995>
- Hermann, S. (Hermann, S., Hrsg.) (2018, 24. Dezember). *Ampelanlage mit Arduino*. Zugriff am 28.09.2020. Verfügbar unter <https://starthardware.org/ampelanlage-mit-arduino/>
- InfluxDB Logo*. Zugriff am 21.10.2020. Verfügbar unter <https://influxdata.github.io/design.influxdata.com/branding-docs/img/influxdb/preview.svg>
- J. de Carvalho Silva, J. J. P. C. Rodrigues, A. M. Alberti, P. Solic & A. L. L. Aquino (Hrsg.). (2017). *LoRaWAN — A low power WAN protocol for Internet of Things. A review and opportunities*. 2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech).
- Kampa, M. & Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution*, 151 (2), 362–367. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012>
- Karagulian, F., Belis, C. A., Dora, C. F. C., Prüss-Ustün, A. M., Bonjour, S., Adair-Rohani, H. et al. (2015). Contributions to cities' ambient particulate matter (PM). A systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric Environment*, 120, 475–483. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.087>
- Zaepernick, M. (26.05.2020). *Sensoren von Hawa Dawal* Interview mit Karim Tarraf. Telefon.
- Krajewicz, D., Heinrichs, M., Wagner, P. & Flötteröd, Y. (2018). *Mobilität Johannisthal/Adlershof 2030. Abschlussbericht DLR* (DLR, Hrsg.). Berlin.
- Zaepernick, M. (20.04.2020). *Sensoren von Alphasense* Interview mit Krzysztof Janiuk. Telefon.
- Kurt, O. K., Zhang, J. & Pinkerton, K. E. (2016). Pulmonary health effects of air pollution. *Current Opinion in Pulmonary Medicine*, 22 (2), 138–143. <https://doi.org/10.1097/MCP.0000000000000248>
- Lewis, A. & Edwards, P. (2016). Validate personal air-pollution sensors. *Nature News*, 535 (7610), 29. <https://doi.org/10.1038/535029a>
- Lim, S. S., Vos, T., Flaxman, A. D., Danaei, G., Shibuya, K., Adair-Rohani, H. et al. (2012). A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2010. A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *The Lancet*, 380 (9859), 2224–2260. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)61766-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)61766-8)

- Linnemann, M., Sommer, A. & Leufkes, R. (2019). *Einsatzpotentiale von LoRaWAN in der Energiewirtschaft. Praxisbuch zu Technik, Anwendung und regulatorischen Randbedingungen* (1. Aufl.). Verfügbar unter <https://doi.org/10.1007/978-3-658-26917-3>
- Liu, X., Cheng, S., Liu, H., Hu, S., Zhang, D. & Ning, H. (2012). A survey on gas sensing technology. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 12 (7), 9635–9665. <https://doi.org/10.3390/s120709635>
- Mattern, F. & Romer, K. (2003). Drahtlose sensornetze. *Informatik Spektrum* (26), 191–194. Zugriff am 02.06.2020. Verfügbar unter <http://www.vs.inf.ethz.ch/publ/papers/sensornetze.pdf>
- Mukherjee, A., Stanton, L. G., Graham, A. R. & Roberts, P. T. (2017). Assessing the Utility of Low-Cost Particulate Matter Sensors over a 12-Week Period in the Cuyama Valley of California. *Sensors*, 17 (8), 1805. <https://doi.org/10.3390/s17081805>
- Node-RED Resources. Zugriff am 12.10.2020. Verfügbar unter <https://nodered.org/about/resources/>
- Zaepernick, M. (22.05.2020). *Sensoren von Breeze Technologies* Interview mit Robert Heinecke. Telefon.
- Sagunski, H. (1996). Richtwerte für die Innenraumluft. Toluol. *Bundesgesundheitsblatt*, 39, 416–421.
- Seeed Technology Co., L. (Hrsg.) (2020a, 26. September). *Sensors - Seeed Studio Electronics. Grove*. Zugriff am 26.09.2020. Verfügbar unter <https://www.seeedstudio.com/category/Sensor-for-Grove-c-24.html>
- Seeed Technology Co., L. (Hrsg.) (2020b, 27. September). *CO2 & Temperature & Humidity Sensor - SCD30. Grove*. Zugriff am 27.09.2020. Verfügbar unter <https://www.seeedstudio.com/Grove-CO2-Temperature-Humidity-Sensor-SCD30-p-2911.html>
- Seeed Technology Co., L. (Hrsg.) (2020c, 27. September). *HCHO Sensor. Grove*. Zugriff am 27.09.2020. Verfügbar unter <https://www.seeedstudio.com/Grove-HCHO-Sensor.html>
- Seeed Technology Co., L. (Hrsg.) (2020d, 27. September). *Laser PM2.5 Dust Sensor - HM3301. Grove*. Zugriff am 27.09.2020. Verfügbar unter <https://www.seeedstudio.com/Grove-Laser-PM2-5-Sensor-HM3301.html>

Seeed Technology Co., L. (Hrsg.) (2020e, 27. September). *Multichannel Gas Sensor*. Grove. Zugriff am 27.09.2020. Verfügbar unter <https://www.seeedstudio.com/Grove-Multichannel-Gas-Sensor.html>

Stadt Hennef (Hrsg.). *Hennef Stadt. SmartCity-Karte*. Zugriff am 26.06.2020. Verfügbar unter <https://www.hennef.de/index.php?id=316>

STMICROELECTRONICS (Hrsg.) (06/2019). *Data brief - B-L072Z-LRWAN1 - Discovery kit for LoRaWAN™, Sigfox™, and LPWAN protocols with STM32L0*.

The Things Network. Zugriff am 12.10.2020. Verfügbar unter <https://www.thethingsnetwork.org/>

Umweltbundesamt (2016). *Flüchtige organische Verbindungen | Umweltbundesamt, Umweltbundesamt*. Zugriff am 24.02.2020. Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/chemische-stoffe/fluechtige-organische-verbindungen#fluechtige-organische-verbindungen-voc->

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2020a, 22. März). *Feinstaub*. Zugriff am 22.03.2020. Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/feinstaub>

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2020b, 22. März). *Kohlenmonoxid*. Zugriff am 22.03.2020. Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/kohlenmonoxid>

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2020c, 22. März). *Ozon*. Zugriff am 22.03.2020. Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/ozon>

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2020d, 22. März). *Schwefeldioxid*. Zugriff am 22.03.2020. Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/schwefeldioxid>

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2020e, 23. März). *Stickstoffoxide*. Zugriff am 23.03.2020. Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/stickstoffoxide>

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2020f, 24. März). *Benzol*. Zugriff am 24.03.2020. Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/benzol>

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2020g, 23. September). *Umweltbundesamt | Für Mensch und Umwelt*. Zugriff am 23.09.2020. Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftdaten>

- Wagener, L. (www.co2online.de, Hrsg.) (2019, 22. Mai). *Was ist CO₂? Definition, Entstehung & Einfluss aufs Klima*. Zugriff am 11.06.2020. Verfügbar unter <https://www.co2online.de/klima-schuetzen/klimawandel/was-ist-co2/>
- Wissenschaftsstadt Darmstadt (Hrsg.) (2020, 25. Mai). *Verkehrs- und Umweltsensorik / Digitalstadt Darmstadt*. Zugriff am 26.06.2020. Verfügbar unter <https://www.digitalstadt-darmstadt.de/projekte/verkehrs-und-umweltsensorik/>
- WISTA Management GmbH (Hrsg.). *Adlershof in Zahlen - Firmen / Lage - Technologiepark Adlershof*. Zugriff am 26.06.2020. Verfügbar unter <https://www.adlershof.de/adlershof-in-zahlen/>
- Zierdt, M. (1997). *Umweltmonitoring mit natürlichen Indikatoren. Pflanzen - Boden - Wasser - Luft*. Berlin: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-59170-9>

Anhang

A Code

bsp.c:

```
/**

*****
*****
* @file    bsp.c
* @author  MCD Application Team
* @brief   manages the sensors on the application

*****
*****
* @attention
*
* <h2><center>&copy; Copyright (c) 2018 STMicroelectronics.
* All rights reserved.</center></h2>
*
* This software component is licensed by ST under Ultimate Liberty
license
* SLA0044, the "License"; You may not use this file except in compliance
with
* the License. You may obtain a copy of the License at:
*                                     www.st.com/SLA0044
*

*****
*****
*/

/* Includes -----
-----*/
#include <string.h>
#include <stdlib.h>
#include "hw.h"
#include "timeServer.h"
#include "bsp.h"
#if defined(LRWAN_NS1)
#include "lrwan_ns1_humidity.h"
#include "lrwan_ns1_pressure.h"
#include "lrwan_ns1_temperature.h"
#else /* not LRWAN_NS1 */
#if defined(SENSOR_ENABLED)
#if defined (X_NUCLEO_IKS01A1)
#warning "Do not forget to select X_NUCLEO_IKS01A1 files group instead
of X_NUCLEO_IKS01A2"
#include "x_nucleo_iks01a1_humidity.h"
#include "x_nucleo_iks01a1_pressure.h"
#include "x_nucleo_iks01a1_temperature.h"
#else /* not X_NUCLEO_IKS01A1 */
#include "x_nucleo_iks01a2_humidity.h"
#include "x_nucleo_iks01a2_pressure.h"
#include "x_nucleo_iks01a2_temperature.h"
#endif /* X_NUCLEO_IKS01A1 */
#endif /* SENSOR_ENABLED */
#endif
```

```
#endif /* LRWAN_NS1 */

#include <math.h>
#include "LTC2309.h"
#include "hm3301.h"
#include "MultiGasSensor.h"
#include "stm32l0xx_hal_conf.h"
#include "opc_n3_02.h"
#include "spi.h"

int16_t NTC_ADC2Temperature(uint16_t adc_value);

/* Private typedef -----
-----*/

extern ADC_HandleTypeDef hadc;
/* Private define -----
-----*/
#define STSOP_LATITUDE ((float) 43.618622 )
#define STSOP_LONGITUDE ((float) 7.051415 )
#define MAX_GPS_POS ((int32_t) 8388607 ) // 2^23 - 1
/* Private macro -----
-----*/
/* Private variables -----
-----*/
/* Private function prototypes -----
-----*/
/* Exported functions -----
-----*/

/* Private variables -----
-----*/

void BSP_sensor_Read(sensor_t *sensor_data)
{
    uint16_t value[8];

    for( uint8_t channel = 0; channel < 7; channel++ )
    {
        value[channel] = LTC2309_read(channel);
    }
    sensor_data->SN3_aux = value[0]; //0
    sensor_data->SN3_work = value[1]; //1
    sensor_data->SN2_aux = value[2]; //2
    sensor_data->SN2_work = value[3]; //3
    sensor_data->SN1_aux = value[4]; //4
    sensor_data->SN1_work = value[5]; //5

    /* sensor_data->SN1_ppb = (float) (value[0] - value[1]) / 5.7f /
0.232f;
    sensor_data->SN2_ppb = (float) (value[2] - value[3]) / 5.7f /
0.100f;
    sensor_data->SN3_ppb = (float) (value[4] - value[5]) / 5.7f /
0.321f;*/
```

```
//Berechnung Temperatur
value[6] *= (4.096f / 5);

sensor_data->temperatur = NTC_ADC2Temperature( value[6] );
float temp = NTC_ADC2Temperature( value[6] )/10.0f;

//Berechnung NO2 AFE

float factor=0.0000000472*pow(temp,4)-0.00000103*pow(temp,3)-
0.0003159*pow(temp,2)+0.02855*temp+1.297;

float NO2_ppb=(float) (((value[5]/2.8)-318)-
(factor*((value[4]/2.8)-310))*0.217);

sensor_data->SN1_ppb = NO2_ppb*100;

//Berechnung O3 AFE
factor=0.00000002477*pow(temp,4)+0.0000006676*pow(temp,3)-
0.000002632*pow(temp,2)+0.01663*temp+1.506;
float O3_ppb=(float) (((value[3]/2.8)-427-NO2_ppb*(0.328))-
(factor*((value[2]/2.8)-438))*0.31));

sensor_data->SN2_ppb = O3_ppb*100;

//Berechnung CO AFE
factor=-
0,000000003077*pow(temp,5)+0.0000001722*pow(temp,4)+0.000005216*pow(temp,3)-
0.002713*pow(temp,2)-0.06377*temp+0.8023;
float CO_ppb=(float) (((value[1]/2.8)-274)-
(factor*((value[0]/2.8)-275))*0.282);
sensor_data->SN3_ppb = CO_ppb;

//HAL_Delay(10);

uint8_t buf[29];

if( HM3301_read_sensor_value( buf, 29 ) )
    PRINTF("HM3301 read result failed!\n");

uint8_t sum = 0;
for (int i = 0; i < 28; i++)
{
    sum += buf[i];
}
if (sum != buf[28]) {
    PRINTF("wrong checksum!!!!\n");
    sensor_data->pm10a = 0;
    sensor_data->pm10s = 0;
}
else
{
```

```
        sensor_data->pm10a = (((uint16_t)buf[8] << 8) | buf[9])-10;
        sensor_data->pm10s = (((uint16_t)buf[14] << 8) | buf[15])-10;
    }

    MutichannelGasSensor_begin();

    uint8_t version = MutichannelGasSensor_getVersion();
    PRINTF("MultichannelGasSensor V%d\n", version);

    PRINTF("Power ON\n", version);
    MutichannelGasSensor_powerOn();

    PRINTF("Read values...\n", version);

    float CO = 0, NO2 = 0;

    for( uint8_t i = 0; i < 5; i++ )
    {
        //          c = MutichannelGasSensor_measure_NH3();
        CO += MutichannelGasSensor_measure_CO();
        NO2 += MutichannelGasSensor_measure_NO2();
        //          c = MutichannelGasSensor_measure_C3H8();
        //          c = MutichannelGasSensor_measure_C4H10();
        //          c = MutichannelGasSensor_measure_CH4();
        //          c = MutichannelGasSensor_measure_H2();
        //          c = MutichannelGasSensor_measure_C2H5OH();
        HAL_Delay(2000);
    }

    sensor_data->CO = CO*100.0/ 5.0f;
    sensor_data->NO2 =NO2*10000.0 / 5.0f;

    PRINTF("Power OFF\n", version);
    MutichannelGasSensor_powerOff();

    opc_result_t opc_result;

    OPC_GetData(&opc_result);
    //PRINTF("PM10OPC:%f\n\n",opc_result.pm10);

    sensor_data->pm10_opc = opc_result.pm10*100;

    HAL_ADC_Start(&hadc);
    HAL_ADC_PollForConversion(&hadc, HAL_MAX_DELAY);

    sensor_data->O3=HAL_ADC_GetValue(&hadc);

    HAL_ADC_Stop(&hadc);

}

void BSP_sensor_Init(void)
{
    /* USER CODE BEGIN 6 */
```



```

        /* USER CODE END 6 */
    }

    /***** (C) COPYRIGHT STMicroelectronics *****/
    FILE****/

    /*
     * Die NTC Tabelle, bestehend aus 33 Temperaturstützpunkten.
     * Einheit:0.1 °C
     */

    int NTC_table[33] = {
        1685, 1394, 1103, 946, 839, 757, 691, 634,
        585, 541, 501, 464, 429, 396, 365, 334, 305,
        276, 247, 219, 190, 161, 131, 101, 68, 34,
        -3, -44, -90, -146, -218, -329, -440
    };

    /*
     * \brief      Konvertiert das ADC Ergebnis in einen Temperaturwert.
     *
     *      Mit p1 und p2 wird der Stützpunkt direkt vor und nach dem
     *      ADC Wert ermittelt. Zwischen beiden Stützpunkten wird linear
     *      interpoliert. Der Code ist sehr klein und schnell.
     *      Es wird lediglich eine Ganzzahl-Multiplikation verwendet.
     *      Die Division kann vom Compiler durch eine Schiebeoperation
     *      ersetzt werden.
     *
     *      Im Temperaturbereich von -10°C bis 50°C beträgt der Fehler
     *      durch die Verwendung einer Tabelle 0.154°C
     *
     * \param      adc_value  Das gewandelte ADC Ergebnis
     * \return      Die Temperatur in 0.1 °C
     */

    int16_t NTC_ADC2Temperature(uint16_t adc_value)
    {
        int16_t p1,p2;
        /* Stützpunkt vor und nach dem ADC Wert ermitteln. */
        p1 = NTC_table[ (adc_value >> 7) ];
        p2 = NTC_table[ (adc_value >> 7)+1];

        /* Zwischen beiden Punkten linear interpolieren. */
        return p1 - ( (p1-p2) * (adc_value & 0x007F) ) / 128;
    };

    /*
     Copyright (C) Preis Ingenieurbüro GmbH

```



```

/*!
 * When set to 1 the application uses the Over-the-Air activation
procedure
 * When set to 0 the application uses the Personalization activation
procedure
 */
#define OVER_THE_AIR_ACTIVATION 1

/*!
 * When using ABP activation the MAC layer must know in advance to which
server
 * version it will be connected.
 */
#define ABP_ACTIVATION_LRWAN_VERSION_V10x 0x01000300 //
1.0.3.0

#define ABP_ACTIVATION_LRWAN_VERSION
ABP_ACTIVATION_LRWAN_VERSION_V10x

/*!
 * Indicates if the end-device is to be connected to a private or public
network
 */
#define LORAWAN_PUBLIC_NETWORK true

/*!
 * IEEE Organizationally Unique Identifier ( OUI ) (big endian)
 * \remark This is unique to a company or organization
 */
#define IEEE_OUI 0x01, 0x01,
0x01

/*!
 * When set to 1 DevEui is LORAWAN_DEVICE_EUI
 * When set to 0 DevEui is automatically generated by calling
 * BoardGetUniqueId function
 */
#define STATIC_DEVICE_EUI 1

/*!
 * Mote device IEEE EUI (big endian)
 *
 * \remark see STATIC_DEVICE_EUI comments
 */

#ifdef BEUTH
    // Beuth
    #define LORAWAN_DEVICE_EUI { 0x00,
0x35, 0x1F, 0xDF, 0x5C, 0xB3, 0x5E, 0xA7 }
#else
    // Maren
    #define LORAWAN_DEVICE_EUI { 0x89,
0x89, 0x89, 0x89, 0x89, 0x89, 0x89 }
#endif

/*!
 * App/Join server IEEE EUI (big endian)
 */

```

```
// App EUI?

#ifdef BEUTH
    // Beuth
    #define LORAWAN_JOIN_EUI { 0x70,
0xB3, 0xD5, 0x7E, 0xD0, 0x03, 0x0F, 0x07 }
#else
    // Maren
    #define LORAWAN_JOIN_EUI { 0x70,
0xB3, 0xD5, 0x7E, 0xD0, 0x03, 0x0F, 0x30 }
#endif

/*!
 * Application root key
 * WARNING: NOT USED FOR 1.0.x DEVICES
 */

#ifdef BEUTH
    // Beuth
    #define LORAWAN_APP_KEY { 0x78,
0x31, 0xE1, 0x6A, 0xF1, 0x96, 0x12, 0x72, 0x48, 0x55, 0xAC, 0xC1, 0x20,
0x4A, 0xFD, 0xB3 }
#else
    // Maren
    #define LORAWAN_APP_KEY { 0xC5,
0x78, 0x94, 0xEC, 0xDC, 0x62, 0x3E, 0x05, 0x28, 0x7B, 0x6A, 0x77, 0x42,
0xAD, 0x7D, 0xEC }
#endif

/*!
 * Application root key - Used to derive Multicast keys on 1.0.x devices.
 * WARNING: USED only FOR 1.0.x DEVICES
 */

#ifdef BEUTH
    // Beuth
    #define LORAWAN_GEN_APP_KEY { 0x78,
0x31, 0xE1, 0x6A, 0xF1, 0x96, 0x12, 0x72, 0x48, 0x55, 0xAC, 0xC1, 0x20,
0x4A, 0xFD, 0xB3 }
#else
    #define LORAWAN_GEN_APP_KEY { 0xC5,
0x78, 0x94, 0xEC, 0xDC, 0x62, 0x3E, 0x05, 0x28, 0x7B, 0x6A, 0x77, 0x42,
0xAD, 0x7D, 0xEC }
#endif

/*!
 * Network root key
 * WARNING: FOR 1.0.x DEVICES IT IS THE \ref LORAWAN_APP_KEY
 */

#ifdef BEUTH
    // Beuth
    #define LORAWAN_NWK_KEY { 0x78,
0x31, 0xE1, 0x6A, 0xF1, 0x96, 0x12, 0x72, 0x48, 0x55, 0xAC, 0xC1, 0x20,
0x4A, 0xFD, 0xB3 }
#else
```

```
#define LORAWAN_NWK_KEY { 0xC5,
0x78, 0x94, 0xEC, 0xDC, 0x62, 0x3E, 0x05, 0x28, 0x7B, 0x6A, 0x77, 0x42,
0xAD, 0x7D, 0xEC }
#endif
/*!
 * Current network ID
 */
#define LORAWAN_NETWORK_ID ( uint32_t )1
// 1 xxx

/*!
 * When set to 1 DevAdd is LORAWAN_DEVICE_ADDRESS
 * When set to 0 DevAdd is automatically generated using
 * a pseudo random generator seeded with a value derived from
 * BoardUniqueId value
 */
#define STATIC_DEVICE_ADDRESS 0

/*!
 * Device address on the network (big endian)
 *
 * \remark see STATIC_DEVICE_ADDRESS comments
 */
#define LORAWAN_DEVICE_ADDRESS ( uint32_t
)0x00000000

/*!
 * Forwarding Network session integrity key
 * WARNING: NWK_S_KEY FOR 1.0.x DEVICES
 */

#ifdef BEUTH
// Beuth
#define LORAWAN_F_NWK_S_INT_KEY { 0x78,
0x31, 0xE1, 0x6A, 0xF1, 0x96, 0x12, 0x72, 0x48, 0x55, 0xAC, 0xC1, 0x20,
0x4A, 0xFD, 0xB3 }
#else
#define LORAWAN_F_NWK_S_INT_KEY { 0xC5,
0x78, 0x94, 0xEC, 0xDC, 0x62, 0x3E, 0x05, 0x28, 0x7B, 0x6A, 0x77, 0x42,
0xAD, 0x7D, 0xEC }
#endif

/*!
 * Serving Network session integrity key
 * WARNING: NOT USED FOR 1.0.x DEVICES. MUST BE THE SAME AS \ref
LORAWAN_F_NWK_S_INT_KEY
 */

#ifdef BEUTH
// Beuth
#define LORAWAN_S_NWK_S_INT_KEY { 0x78,
0x31, 0xE1, 0x6A, 0xF1, 0x96, 0x12, 0x72, 0x48, 0x55, 0xAC, 0xC1, 0x20,
0x4A, 0xFD, 0xB3 }
#else
#define LORAWAN_S_NWK_S_INT_KEY { 0xC5,
0x78, 0x94, 0xEC, 0xDC, 0x62, 0x3E, 0x05, 0x28, 0x7B, 0x6A, 0x77, 0x42,
0xAD, 0x7D, 0xEC }
```

```
#endif

/*!
 * Network session encryption key
 * WARNING: NOT USED FOR 1.0.x DEVICES. MUST BE THE SAME AS \ref
LORAWAN_F_NWK_S_INT_KEY
 */

#ifdef BEUTH
    // Beuth
    #define LORAWAN_NWK_S_ENC_KEY { 0x78,
0x31, 0xE1, 0x6A, 0xF1, 0x96, 0x12, 0x72, 0x48, 0x55, 0xAC, 0xC1, 0x20,
0x4A, 0xFD, 0xB3 }
#else
    #define LORAWAN_NWK_S_ENC_KEY { 0xC5,
0x78, 0x94, 0xEC, 0xDC, 0x62, 0x3E, 0x05, 0x28, 0x7B, 0x6A, 0x77, 0x42,
0xAD, 0x7D, 0xEC }
#endif
/*!
 * Application session key
 */

#ifdef BEUTH
    // Beuth
    #define LORAWAN_APP_S_KEY { 0x78,
0x31, 0xE1, 0x6A, 0xF1, 0x96, 0x12, 0x72, 0x48, 0x55, 0xAC, 0xC1, 0x20,
0x4A, 0xFD, 0xB3 }
#else
    #define LORAWAN_APP_S_KEY { 0xC5,
0x78, 0x94, 0xEC, 0xDC, 0x62, 0x3E, 0x05, 0x28, 0x7B, 0x6A, 0x77, 0x42,
0xAD, 0x7D, 0xEC }
#endif

#ifdef __cplusplus
}
#endif

#endif /* __LORA_COMMISSIONING_H__ */
```

main.c:

```
/**

*****
*****
 * @file    main.c
 * @author  MCD Application Team
 * @brief   this is the main!

*****
*****
 * @attention
 *

```

```

* <h2><center>&copy; Copyright (c) 2018 STMicroelectronics.
* All rights reserved.</center></h2>
*
* This software component is licensed by ST under Ultimate Liberty
license
* SLA0044, the "License"; You may not use this file except in compliance
with
* the License. You may obtain a copy of the License at:
*
*                                     www.st.com/SLA0044
*

*****
*****
*/

/* Includes -----
-----*/
#include "hw.h"
#include "low_power_manager.h"
#include "lora.h"
#include "bsp.h"
#include "timeServer.h"
#include "vcom.h"
#include "version.h"
#include "hw_rtc.h"
#include "stm32l0xx_hal.h"

// Sensoren
#include "i2c.h"
#include "spi.h"
#include "hm3301.h"
#include "MultiGasSensor.h"
#include "opc_n3_02.h"

#include "fatfs.h"
#include "fatfs_sd.h"
#include "stdio.h"
#include "string.h"

/*
*   Erik Zinger
*   10.08.2020
*   Christopher Horz
*   14.10.2020
*
*/

uint16_t counter;
sensor_t sensor_data_mid;
sensor_t_sum sensor_data_sum;
int mid_count;
/* Private typedef -----
-----*/
ADC_HandleTypeDef hadc;
/* Private define -----
-----*/

```



```

#define LORAWAN_MAX_BAT    254

/*!
 * Defines the application data transmission duty cycle. 5s, value in
 [ms].
 */
#define APP_TX_DUTYCYCLE    60000
    // xxx

/*!
 * LoRaWAN Adaptive Data Rate
 * @note Please note that when ADR is enabled the end-device should be
 static
 */
#define LORAWAN_ADR_STATE LORAWAN_ADR_ON
/*!
 * LoRaWAN Default data Rate Data Rate
 * @note Please note that LORAWAN_DEFAULT_DATA_RATE is used only when ADR
 is disabled
 */
#define LORAWAN_DEFAULT_DATA_RATE DR_0
/*!
 * LoRaWAN application port
 * @note do not use 224. It is reserved for certification
 */
#define LORAWAN_APP_PORT    2
/*!
 * LoRaWAN default endNode class port
 */
#define LORAWAN_DEFAULT_CLASS    CLASS_A
/*!
 * LoRaWAN default confirm state
 */
#define LORAWAN_DEFAULT_CONFIRM_MSG_STATE
LORAWAN_UNCONFIRMED_MSG
/*!
 * User application data buffer size
 */
#define LORAWAN_APP_DATA_BUFF_SIZE    64
/*!
 * User application data
 */
static uint8_t AppDataBuff[LORAWAN_APP_DATA_BUFF_SIZE];

/*!
 * User application data structure
 */
//static lora_AppData_t AppData={ AppDataBuff,  0 ,0 };
lora_AppData_t AppData = { AppDataBuff,  0, 0 };

/* Private macro -----
-----*/
/* Private function prototypes -----
-----*/
void MX_ADC_Init(void);
void MX_GPIO_Init(void);
/* call back when LoRa endNode has received a frame*/
static void LORA_RxData(lora_AppData_t *AppData);

/* call back when LoRa endNode has just joined*/

```

```

static void LORA_HasJoined(void);

/* call back when LoRa endNode has just switch the class*/
static void LORA_ConfirmClass(DeviceClass_t Class);

/* call back when server needs endNode to send a frame*/
static void LORA_TxNeeded(void);

/* callback to get the battery level in % of full charge (254 full charge,
0 no charge)*/
static uint8_t LORA_GetBatteryLevel(void);

/* LoRa endNode send request*/
static void Send(void *context);

/* start the tx process*/
static void LoraStartTx(TxEventType_t EventType);

/* tx timer callback function*/
static void OnTxTimerEvent(void *context);

/* tx timer callback function*/
static void LoraMacProcessNotify(void);

/* Private variables -----
-----*/
/* load Main call backs structure*/
static LoRaMainCallback_t LoRaMainCallbacks = { LORA_GetBatteryLevel,
        HW_GetTemperatureLevel,
        HW_GetUniqueId,
        HW_GetRandomSeed,
        LORA_RxData,
        LORA_HasJoined,
        LORA_ConfirmClass,
        LORA_TxNeeded,
        LoraMacProcessNotify
};
LoraFlagStatus LoraMacProcessRequest = LORA_RESET;
LoraFlagStatus AppProcessRequest = LORA_RESET;
/*!
 * Specifies the state of the application LED
 */
static uint8_t AppLedStateOn = RESET;

static TimerEvent_t TxTimer;

#ifdef USE_B_L072Z_LRWAN1
/*!
 * Timer to handle the application Tx Led to toggle
 */
static TimerEvent_t TxLedTimer;
static void OnTimerLedEvent(void *context);
#endif
/* !
 *Initialises the Lora Parameters
 */
static LoRaParam_t LoRaParamInit = {
        LORAWAN_ADR_STATE,
        LORAWAN_DEFAULT_DATA_RATE,
        LORAWAN_PUBLIC_NETWORK

```

```
};
//SD Karte
extern SPI_HandleTypeDef hspi2;
#define SD_CS_GPIO_Port      GPIOA
#define SD_CS_Pin            GPIO_PIN_4

#define SPI_MODE_OPC         hspi2.Instance->CR1 |= 0x0001      // second edge
#define SPI_MODE_SD          hspi2.Instance->CR1 &= 0xFFFE      // first
edge

FILINFO fno;
FATFS    *fs;
FIL      logFile;
char      logFilename[15];    //LOG00000.CSV\0 = 13 bytes
FRESULT res;

UINT ByteCounter;
DIR dj;

void save_data(sensor_t *sensor_data);

// HM3301

const char *str[6]={"PM1.0 part. ug/m3): ", "PM2.5 part. ug/m3): ", "PM10
part. ug/m3): ", "PM1.0 env. ug/m3): ", "PM2.5 env. ug/m3): ", "PM10 env.
ug/m3): " };

uint8_t buf[30];
uint16_t len;
char uartBuff[100];

#define MAX_FILE_SIZE 1000

//void save_data(sensor_t *sensor_data);

/* Private functions -----
-----*/

/**
 * @brief Main program
 * @param None
 * @retval None
 */
int main(void)
{
    /* STM32 HAL library initialization*/
    HAL_Init();

    /* Configure the system clock*/
    SystemClock_Config();

    /* Configure the debug mode*/
    DBG_Init();

    /* Configure the hardware*/
```

```
HW_Init();

/* USER CODE BEGIN 1 */
MX_SPI2_Init();
MX_ADC_Init();
MX_I2C1_Init();
//MX_GPIO_Init();
MX_FATFS_Init();

OPC_CS_HIGH;

// FATFS SPI Configuration:
HAL_GPIO_WritePin(SD_CS_GPIO_Port,SD_CS_Pin, GPIO_PIN_SET);
setSPI( &hspi2, SD_CS_GPIO_Port, SD_CS_Pin );

//      sensor_t sensor_data;
//      while(1)
//      {
//          save_data(&sensor_data);
//          HAL_Delay(100);
//      }

BSP_LED_Init(LED_BLUE);
//      BSP_LED_On(LED_BLUE);

// Disbale Stand-by mode
LPM_SetOffMode(LPM_APPLI_Id, LPM_Disable);

PRINTF("EdgeCity V1.0 Build 10.08.2020\n");
PRINTF("APP_VERSION=                %02X.%02X.%02X.%02X\n",
(uint8_t)(__APP_VERSION >> 24), (uint8_t)(__APP_VERSION >> 16),
(uint8_t)(__APP_VERSION >> 8), (uint8_t) __APP_VERSION);
PRINTF("MAC_VERSION=                %02X.%02X.%02X.%02X\n",
(uint8_t)(__LORA_MAC_VERSION >> 24), (uint8_t)(__LORA_MAC_VERSION >> 16),
(uint8_t)(__LORA_MAC_VERSION >> 8), (uint8_t) __LORA_MAC_VERSION);

if( HM3301_init() )
    PRINTF("HM3301_init failed!\n");

//Init OPC
//SPI_MODE_OPC;
OPC_InitDevice();
//StopOPC();
OPC_CS_HIGH;
// Configure the Lora Stack
LORA_Init(&LoRaMainCallbacks, &LoRaParamInit);

LORA_Join();

LoraStartTx(TX_ON_TIMER) ;
//STATIC_DEVICE_EUI
while (1)
{
    if (AppProcessRequest == LORA_SET)
    {
        /*reset notification flag*/
        AppProcessRequest = LORA_RESET;
    }
}
```

```
        /*Send*/
        Send(NULL);
    }
    if (LoraMacProcessRequest == LORA_SET)
    {
        /*reset notification flag*/
        LoraMacProcessRequest = LORA_RESET;
        LoRaMacProcess();
    }
    /*If a flag is set at this point, mcu must not enter low power
and must loop*/
    DISABLE_IRQ();

    /* if an interrupt has occurred after DISABLE_IRQ, it is kept
pending
    * and cortex will not enter low power anyway */
    if ((LoraMacProcessRequest != LORA_SET) && (AppProcessRequest
!= LORA_SET))
    {
#ifdef LOW_POWER_DISABLE
        //LPM_EnterLowPower();
#endif
    }

    ENABLE_IRQ();

    /* USER CODE BEGIN 2 */
    /* USER CODE END 2 */
}

void LoraMacProcessNotify(void)
{
    LoraMacProcessRequest = LORA_SET;
}

static void LORA_HasJoined(void)
{
    #if( OVER_THE_AIR_ACTIVATION != 0 )
        PRINTF("JOINED\n");
    #endif
    LORA_RequestClass(LORAWAN_DEFAULT_CLASS);
}

static void Send(void *context)
{
    mid_count ++;
    PRINTF("\nStarte neue Messung...\n");

    sensor_t sensor_data;

    RTC_DateTypeDef sDate;
    RTC_TimeTypeDef sTime;

    HW_RTC_GetCalendarValue( &sDate, &sTime);
```

```
sensor_data.date=sDate.Date;
sensor_data.month=sDate.Month;
sensor_data.hours=sTime.Hours;
sensor_data.minutes=sTime.Minutes;
sensor_data.seconds=sTime.Seconds;

//SPI_MODE_OPC;
__HAL_SPI_DISABLE(&hspi2);
SPI_MODE_OPC;
__HAL_SPI_ENABLE(&hspi2);
// xxx hier werden alle Sensoren eingelesen:
BSP_sensor_Read(&sensor_data);

sensor_data_sum.CO+=sensor_data.CO;
sensor_data_sum.NO2+=sensor_data.NO2;
sensor_data_sum.O3+=sensor_data.O3;
sensor_data_sum.SN1_ppb+=sensor_data.SN1_ppb;
sensor_data_sum.SN2_ppb+=sensor_data.SN2_ppb;
sensor_data_sum.SN3_ppb+=sensor_data.SN3_ppb;
sensor_data_sum.pm10_opc+=sensor_data.pm10_opc;
sensor_data_sum.pm10a+=sensor_data.pm10a;
sensor_data_sum.temperatur+=sensor_data.temperatur;

sensor_data_mid.CO=sensor_data_sum.CO/mid_count;
sensor_data_mid.NO2=sensor_data_sum.NO2/mid_count;
sensor_data_mid.O3=sensor_data_sum.O3/(float)mid_count;
sensor_data_mid.SN1_ppb=sensor_data_sum.SN1_ppb/mid_count;
sensor_data_mid.SN2_ppb=sensor_data_sum.SN2_ppb/mid_count;
sensor_data_mid.SN3_ppb=sensor_data_sum.SN3_ppb/mid_count;
sensor_data_mid.pm10_opc=sensor_data_sum.pm10_opc/mid_count;
sensor_data_mid.pm10a=sensor_data_sum.pm10a/mid_count;
sensor_data_mid.temperatur=sensor_data_sum.temperatur/mid_count;

SysTime_t stime = SysTimeGetMcuTime();

save_data(&sensor_data);

// Output:
PRINTF("\nMessung %d @ %d:\n", counter, stime.Seconds );
PRINTF("NO2 ppb: %.2f\n", sensor_data_mid.SN1_ppb/100.00f);
PRINTF("O3 ppb: %.2f\n", sensor_data_mid.SN2_ppb/100.00f );
PRINTF("CO ppb: %.2f\n", sensor_data_mid.SN3_ppb/100.00f );
PRINTF("NO2: %.2f\n", sensor_data_mid.NO2/100.00f );
PRINTF("O3: %d\n", sensor_data_mid.O3 );
PRINTF("CO: %.2f\n", sensor_data_mid.CO/1000.00f);
PRINTF("pm10 OPC: %.3f\n", sensor_data_mid.pm10_opc/100.00f );
PRINTF("pm10a: %d\n", sensor_data_mid.pm10a );
PRINTF("Temperatur: %.1f\n", (float) (sensor_data_mid.temperatur /
10.0f) );
//PRINTF("pm10s: %d\n", sensor_data_mid.pm10s );

/*PRINTF("WORKING SN1/NO2:\t%d\n",sensor_data.SN1_work);
PRINTF("AUX SN1/NO2:\t%d\n",sensor_data.SN1_aux);
PRINTF("WORKING SN2/O3:\t%d\n",sensor_data.SN2_work);
PRINTF("AUX SN2/O3:\t%d\n",sensor_data.SN2_aux);
```

```

    PRINTF("WORKING SN3/CO:\t%d\n", sensor_data.SN3_work);
    PRINTF("AUX SN3/CO:\t%d\n", sensor_data.SN3_aux);*/

    // todo: nur alle 15 Minuten (3 * 5 Minuten) übertragen: nur alle
    5min (60*5s)// neu: jede Minute Messen->5min Senden
    if( mid_count%5 )
    {
        PRINTF("Messung ohne Lora\n");
        return;
    }

    // können die Daten per Lora versendet werden?
    if (LORA_JoinStatus() != LORA_SET)
    {
        /*Not joined, try again later*/
        PRINTF("Not joined, try again later\n");
        LORA_Join();
        return;
    }
    else

        PRINTF("Lora joined\n");

    BSP_LED_On(LED_BLUE);

    TVL1(PRINTF("SEND REQUEST\n");)

#ifdef USE_B_L072Z_LRWAN1
    TimerInit(&TxLedTimer, OnTimerLedEvent);

    TimerSetValue(&TxLedTimer, 200);

    LED_On(LED_RED1) ;

    TimerStart(&TxLedTimer);
#endif

    AppData.Port = LORAWAN_APP_PORT;

    //RTC_DateTypeDef sDate;
    //RTC_TimeTypeDef sTime;

    /*HW_RTC_GetCalendarValue( &sDate, &sTime);
    uint32_t hour = sTime.Hours;
    uint32_t minutes = sTime.Minutes;
    uint32_t seconds = sTime.Seconds;

    AppData.Buff[0] = (counter >> 8) & 0xFF;
    AppData.Buff[1] = counter & 0xFF;
    AppData.Buff[2] = hour;
    AppData.Buff[3] = minutes;
    AppData.Buff[4] = seconds;
    AppData.Buff[5] = (sensor_data_mid.temperatur >> 8) & 0xFF;

```

```

AppData.Buff[6] = sensor_data_mid.temperatur & 0xFF;
    */
    counter ++;

AppData.Buff[0] = (counter >> 8) & 0xFF;
AppData.Buff[1] = counter & 0xFF;

AppData.Buff[2] = (sensor_data_mid.SN1_ppb >> 8) & 0xFF;
AppData.Buff[3] = sensor_data_mid.SN1_ppb & 0xFF;

AppData.Buff[4] = (sensor_data_mid.SN2_ppb >> 8) & 0xFF;
AppData.Buff[5] = sensor_data_mid.SN2_ppb & 0xFF;

AppData.Buff[6] = (sensor_data_mid.SN3_ppb >> 8) & 0xFF;
AppData.Buff[7] = sensor_data_mid.SN3_ppb & 0xFF;
// NO2
AppData.Buff[8] = (sensor_data_mid.NO2 >> 8) & 0xFF;
AppData.Buff[9] = sensor_data_mid.NO2 & 0xFF;
// O3
AppData.Buff[10] = (sensor_data_mid.O3 >> 8) & 0xFF;
AppData.Buff[11] = sensor_data_mid.O3 & 0xFF;
// CO
AppData.Buff[12] = (sensor_data_mid.CO >> 8) & 0xFF;
AppData.Buff[13] = sensor_data_mid.CO & 0xFF;

// PM10 OPC
AppData.Buff[14] = (sensor_data_mid.pm10_opc >> 8) & 0xFF;
AppData.Buff[15] = sensor_data_mid.pm10_opc & 0xFF;

// PM10a
AppData.Buff[16] = (sensor_data_mid.pm10a >> 8) & 0xFF;
AppData.Buff[17] = sensor_data_mid.pm10a & 0xFF;

AppData.Buff[18] = (sensor_data_mid.temperatur >> 8) & 0xFF;
AppData.Buff[19] = sensor_data_mid.temperatur & 0xFF;

AppData.BuffSize = 20;

LORA_send(&AppData, LORAWAN_DEFAULT_CONFIRM_MSG_STATE);
PRINTF("!!!!MESSUNG MIT LORA!!!!!!\n\n\n");
memset(&sensor_data_sum,0,sizeof(sensor_data_sum));
mid_count=0;
//MX_GPIO_Init();
/* USER CODE END 3 */
}

static void LORA_RxData(lora_AppData_t *AppData)
{
    /* USER CODE BEGIN 4 */
    PRINTF("PACKET RECEIVED ON PORT %d\n\r", AppData->Port);

    switch (AppData->Port)
    {
        case 3:
            /*this port switches the class*/
            if (AppData->BuffSize == 1)
            {

```



```
        switch (AppData->Buff[0])
        {
        case 0:
        {
            LORA_RequestClass(CLASS_A);
            break;
        }
        case 1:
        {
            LORA_RequestClass(CLASS_B);
            break;
        }
        case 2:
        {
            LORA_RequestClass(CLASS_C);
            break;
        }
        default:
            break;
        }
    }
    break;
case LORAWAN_APP_PORT:
    if (AppData->BuffSize == 1)
    {
        AppLedStateOn = AppData->Buff[0] & 0x01;
        if (AppLedStateOn == RESET)
        {
            PRINTF("LED OFF\n");
            LED_Off(LED_BLUE) ;
        }
        else
        {
            PRINTF("LED ON\n");
            LED_On(LED_BLUE) ;
        }
    }
    break;
default:
    break;
}
/* USER CODE END 4 */
}

static void OnTxTimerEvent(void *context)
{
    /*Wait for next tx slot*/
    TimerStart(&TxTimer);

    AppProcessRequest = LORA_SET;
}

static void LoraStartTx(TxEventType_t EventType)
{
    if (EventType == TX_ON_TIMER)
    {
        /* send everytime timer elapses */
        TimerInit(&TxTimer, OnTxTimerEvent);
        TimerSetValue(&TxTimer, APP_TX_DUTYCYCLE);
        OnTxTimerEvent(NULL);
    }
}
```

```
    }
    else
    {
        /* send everytime button is pushed */
        GPIO_InitTypeDef initStruct = {0};

        initStruct.Mode = GPIO_MODE_IT_RISING;
        initStruct.Pull = GPIO_PULLUP;
        initStruct.Speed = GPIO_SPEED_HIGH;

        HW_GPIO_Init(USER_BUTTON_GPIO_PORT,          USER_BUTTON_PIN,
&initStruct);
        HW_GPIO_SetIrq(USER_BUTTON_GPIO_PORT,    USER_BUTTON_PIN,    0,
Send);
    }
}

static void LORA_ConfirmClass(DeviceClass_t Class)
{
    PRINTF("switch to class %c done\n", "ABC"[Class]);

    /*Optionnal*/
    /*informs the server that switch has occurred ASAP*/
    AppData.BuffSize = 0;
    AppData.Port = LORAWAN_APP_PORT;

    LORA_send(&AppData, LORAWAN_UNCONFIRMED_MSG);
}

static void LORA_TxNeeded(void)
{
    AppData.BuffSize = 0;
    AppData.Port = LORAWAN_APP_PORT;

    LORA_send(&AppData, LORAWAN_UNCONFIRMED_MSG);
}

/**
 * @brief This function return the battery level
 * @param none
 * @retval the battery level  1 (very low) to 254 (fully charged)
 */
uint8_t LORA_GetBatteryLevel(void)
{
    uint16_t batteryLevelmV;
    uint8_t batteryLevel = 0;

    batteryLevelmV = HW_GetBatteryLevel();

    /* Convert batterey level from mV to linea scale: 1 (very low) to
254 (fully charged) */
    if (batteryLevelmV > VDD_BAT)
    {
        batteryLevel = LORAWAN_MAX_BAT;
    }
    else if (batteryLevelmV < VDD_MIN)
    {
        batteryLevel = 0;
    }
}
```

```
        else
        {
            batteryLevel = (((uint32_t)(batteryLevelmV - VDD_MIN) *
LORAWAN_MAX_BAT) / (VDD_BAT - VDD_MIN));
        }

        return batteryLevel;
    }

#ifdef USE_B_L072Z_LRWAN1
static void OnTimerLedEvent(void *context)
{
    LED_Off(LED_RED1) ;
}
#endif

/***** (C) COPYRIGHT STMicroelectronics *****/
FILE*****/

/* ADC init function */
void MX_ADC_Init(void)
{
    ADC_ChannelConfTypeDef sConfig = {0};

    /** Configure the global features of the ADC (Clock, Resolution,
Data Alignment and number of conversion)
    */
    hadc.Instance = ADC1;
    hadc.Init.OversamplingMode = DISABLE;
    hadc.Init.ClockPrescaler = ADC_CLOCK_SYNC_PCLK_DIV2;
    hadc.Init.Resolution = ADC_RESOLUTION_12B;
    hadc.Init.SamplingTime = ADC_SAMPLETIME_1CYCLE_5;
    hadc.Init.ScanConvMode = ADC_SCAN_DIRECTION_FORWARD;
    hadc.Init.DataAlign = ADC_DATAALIGN_RIGHT;
    hadc.Init.ContinuousConvMode = DISABLE;
    hadc.Init.DiscontinuousConvMode = DISABLE;
    hadc.Init.ExternalTrigConvEdge = ADC_EXTERNALTRIGCONVEDGE_NONE;
    hadc.Init.ExternalTrigConv = ADC_SOFTWARE_START;
    hadc.Init.DMAContinuousRequests = DISABLE;
    hadc.Init.EOCSelection = ADC_EOC_SINGLE_CONV;
    hadc.Init.Overrun = ADC_OVR_DATA_PRESERVED;
    hadc.Init.LowPowerAutoWait = DISABLE;
    hadc.Init.LowPowerFrequencyMode = DISABLE;
    hadc.Init.LowPowerAutoPowerOff = DISABLE;
    if (HAL_ADC_Init(&hadc) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }
    /** Configure for the selected ADC regular channel to be converted.
    */
    sConfig.Channel = ADC_CHANNEL_0;
    sConfig.Rank = ADC_RANK_CHANNEL_NUMBER;
    if (HAL_ADC_ConfigChannel(&hadc, &sConfig) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }
}
```

```

}

void HAL_ADC_MspInit(ADC_HandleTypeDef* adcHandle)
{
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStruct = {0};
    if(adcHandle->Instance==ADC1)
    {
        /* USER CODE BEGIN ADC1_MspInit 0 */

        /* USER CODE END ADC1_MspInit 0 */
        /* ADC1 clock enable */
        __HAL_RCC_ADC1_CLK_ENABLE();

        __HAL_RCC_GPIOA_CLK_ENABLE();
        /**ADC GPIO Configuration
PA0      -----> ADC_IN0
        */
        GPIO_InitStruct.Pin = GPIO_PIN_0;
        GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_ANALOG;
        GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
        HAL_GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStruct);

        /* USER CODE BEGIN ADC1_MspInit 1 */

        /* USER CODE END ADC1_MspInit 1 */
    }
}

void HAL_ADC_MspDeInit(ADC_HandleTypeDef* adcHandle)
{
    if(adcHandle->Instance==ADC1)
    {
        /* USER CODE BEGIN ADC1_MspDeInit 0 */

        /* USER CODE END ADC1_MspDeInit 0 */
        /* Peripheral clock disable */
        __HAL_RCC_ADC1_CLK_DISABLE();

        /**ADC GPIO Configuration
PA0      -----> ADC_IN0
        */
        HAL_GPIO_DeInit(GPIOA, GPIO_PIN_0);

        /* USER CODE BEGIN ADC1_MspDeInit 1 */

        /* USER CODE END ADC1_MspDeInit 1 */
    }
}

void MX_GPIO_Init(void)
{
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStruct = {0};

    /* GPIO Ports Clock Enable */
    __HAL_RCC_GPIOA_CLK_ENABLE();
    __HAL_RCC_GPIOB_CLK_ENABLE();

```

```
//HAL_GPIO_WritePin(GPIOB,
GPIO_PIN_6|GPIO_PIN_2|GPIO_PIN_5|GPIO_PIN_12, GPIO_PIN_RESET);

/*Configure GPIO pins : PB6 PB2 */
/*
GPIO_InitStruct.Pin = GPIO_PIN_6|GPIO_PIN_2|GPIO_PIN_5|GPIO_PIN_12;
GPIO_InitStruct.Mode =GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_PULLDOWN;
GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
HAL_GPIO_Init(GPIOB, &GPIO_InitStruct);
*/
/*Configure GPIO pins : PB6 PB2 */
GPIO_InitStruct.Pin = GPIO_PIN_10|GPIO_PIN_4;
GPIO_InitStruct.Mode =GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_PULLDOWN;
GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
HAL_GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStruct);
}

uint16_t counter24h = 0;
uint16_t tag = 0;

void save_data(sensor_t *sensor_data)
{
    static uint8_t init = 0;

    PRINTF("Speichere auf SD-Karte\n");
    OPC_CS_HIGH;

    __HAL_SPI_DISABLE(&hspi2);
    SPI_MODE_SD;
    __HAL_SPI_ENABLE(&hspi2);

    HAL_GPIO_WritePin( SD_CS_GPIO_Port, SD_CS_Pin, GPIO_PIN_SET );

    HAL_Delay(100);

    FRESULT result;

    if( init == 0)
    {
        PRINTF("f_mount...\n");

        fs = malloc(sizeof (FATFS));           // Get work area for
the volume
        result = f_mount(fs, "", 1);
        init = 1;
    }
    else
    {
        result = FR_OK;
    }
}
```

```
if(result == FR_OK)
{
    PRINTF("FileCounter: %d\n", counter24h);
    sprintf(logFilename, "LOG%05d.txt", tag);

    /*
    // Sucht nach der letzten Datei...
    uint16_t fileCounter = 0;

    do
    {
        sprintf(logFilename, "LOG%05d.txt", fileCounter);
        fileCounter++;
    }
    while(f_stat((char*)logFilename, &fno) == FR_OK);

    if( fileCounter > 0 )
    {
        sprintf(logFilename, "LOG%05d.txt", fileCounter-1);
    }
    else
    {
        sprintf(logFilename, "LOG%05d.txt", 0);
    }
    */
    // legt die Datei an/öffnen
    res = f_open(&logFile, (char*)logFilename, FA_OPEN_APPEND |
FA_WRITE | FA_READ);

    if((res == FR_OK) || (res == FR_EXIST))
    {
        PRINTF("File opened\n");
        //uint32_t size = f_size(&logFile);

        /*
        if( size > MAX_FILE_SIZE )
        {
            f_close(&logFile);

            sprintf(logFilename, "LOG%05d.txt", fileCounter);

            PRINTF("Neue Datei %s\n", logFilename);

            res = f_open(&logFile, (char*)logFilename,
FA_OPEN_ALWAYS | FA_WRITE | FA_READ);

            if(res == FR_OK || res == FR_EXIST)
            {
                size = f_size(&logFile);
            }
            else
            {
                goto UNMOUNT;
            }
            size = f_size(&logFile);
        }
        else
        {

```

```
        if( size == 0 )
        {
            // Header
            f_printf(&logFile, "Counter,  Temperatur,
SN1_ppb, SN2_ppb, SN3_ppb, ");
            f_printf(&logFile, "SN1_work,  SN2_work,
SN3_work, SN1_aux, SN2_aux, SN3_aux, ");
            f_printf(&logFile, "p08_10, p10_12, CO, NO2,
pm10s, pm10a");
            f_printf(&logFile, "\n");
        }

    }
    */

    //size = f_size(&logFile);
    // gehe zum Ende
    //f_lseek(&logFile, size);

    // todo hier anpassen:
    f_printf(&logFile, "%d, ", counter24h );
    f_printf(&logFile, "%d,%d:%d,%d:%d:%d, %d ",
counter,sensor_data->date,sensor_data->month,          sensor_data->hours,
sensor_data->minutes, sensor_data->seconds, sensor_data->temperatur);
    f_printf(&logFile, "%d, %d, %d", sensor_data->SN1_ppb,
sensor_data->SN2_ppb, sensor_data->SN3_ppb);
    f_printf(&logFile, "%d, %d, %d, %d, %d, %d",
sensor_data->SN1_work,  sensor_data->SN1_aux,  sensor_data->SN2_work,
sensor_data->SN2_aux, sensor_data->SN3_work, sensor_data->SN3_aux );
    f_printf(&logFile, "%d, %d, %d, %d, %d\n", sensor_data-
>NO2 , sensor_data->O3,sensor_data->CO, sensor_data->pm10a, sensor_data-
>pm10_opc );

    res = f_sync(&logFile);
    if( res != FR_OK )
        PRINTF("Sync error\n");

    res = f_close(&logFile);

    if( res != FR_OK )
        PRINTF("f_close error\n");

    PRINTF("file %s sizeof %d created\n", logFilename,
(uint16_t) f_size(&logFile));

}
else
{
    PRINTF("File konnte nicht geoeffnet werden\n");
}

counter24h ++;
if( counter24h > (60*24) )
{
    tag ++;
    counter24h = 0;
}
```

```
        }
    }
    else
        PRINTF("f_mount failed %X\n", result);

UNMOUNT:

//f_mount(NULL, "", 1);

// CS SD HIGH:
HAL_GPIO_WritePin( SD_CS_GPIO_Port, SD_CS_Pin, GPIO_PIN_SET );

__HAL_SPI_DISABLE(&hspi2);
SPI_MODE_OPC;
__HAL_SPI_ENABLE(&hspi2);
}
```


B Daten

Tägliche Verkehrs- und Umweltparameterdaten vom 15.12.2020 bis zum 21.12.2020:

Datum	PM10 - µg/m³	O3 - µg/m³	NO2 - µg/m³	CO - mg/m³	Anzahl Fahrzeuge
15.12.2020	21,537913	92,6686072	3,17321482	0,95173356	26473
16.12.2020	67,5966667	96,7676485	3,07058654	1,33024575	26686
17.12.2020	32,51325	94,8548112	2,88372874	1,21957469	26378
18.12.2020	38,5454167	93,4119935	3,0814563	1,17871228	26247
19.12.2020	95,85625	92,0590557	2,8157848	1,23681337	19385
20.12.2020	17,8000833	93,9790434	2,61426398	1,35936665	15232
21.12.2020	35,9095	94,4858962	2,82938793	1,58619623	25945

Stündliche Verkehrs- und Umweltparameterdaten vom 15.12.2020 bis zum 21.12.2020:

Zeit	PM10 - µg/m³	O3 - µg/m³	NO2 - µg/m³	CO - mg/m³	Anzahl Fahrzeuge
15.12.2020 01:00	18,298	92,94563237	2,857757675	0,66711214	137
15.12.2020 02:00	14,878	93,52033163	2,815489943	0,632178706	92
15.12.2020 03:00	15,854	92,96159623	2,896774043	0,614711989	146
15.12.2020 04:00	19,522	93,78173997	2,803440771	0,599224833	338
15.12.2020 05:00	22,088	92,43478858	2,88242979	0,585135015	1210
15.12.2020 06:00	27,612	90,49717406	2,989916057	0,697271337	1431
15.12.2020 07:00	27,722	90,868334	3,023385981	0,908269277	1736
15.12.2020 08:00	26,578	91,2195391	3,071200157	0,982561046	1723
15.12.2020 09:00	23,008	92,807944	2,952621	1,021337158	1539
15.12.2020 10:00	22,482	95,35218552	2,838632004	1,041249215	1490
15.12.2020 11:00	23,56	94,8692785	2,986090923	1,032515856	1531
15.12.2020 12:00	23,252	94,85331463	3,111172808	1,046605675	1527
15.12.2020 13:00	21,168	94,66773466	3,233003329	1,12031522	1649
15.12.2020 14:00	27,262	91,3532365	3,596391067	1,065935508	1654
15.12.2020 15:00	21,944	91,46897455	3,571718952	1,041249215	1595

15.12.2020 16:00	18,716	91,41908746	3,584533151	1,097957822	1762
15.12.2020 17:00	18,302	90,81445594	3,58051676	1,032515856	1642
15.12.2020 18:00	19,15	90,10805477	3,572483979	1,103314282	1483
15.12.2020 19:00	16,8	92,45474341	3,366883022	1,208580363	1203
15.12.2020 20:00	15,936	94,40632632	3,20680116	1,197867443	777
15.12.2020 21:00	18,228	91,44702423	3,515871994	1,050448352	803
15.12.2020 22:00	26,606	92,07161057	3,430762761	1,103780061	560
15.12.2020 23:00	26,406	95,05485847	3,096063528	1,039735433	275
16.12.2020 00:00	26,624	94,70165788	3,090325827	1,016446477	70
16.12.2020 01:00	29,742	94,8812514	3,116719252	1,013535357	28
16.12.2020 02:00	35,324	95,22846554	3,043467935	1,024714056	48
16.12.2020 03:00	40,532	95,02093525	3,088795774	1,045091893	73
16.12.2020 04:00	55,344	94,3963489	3,18767549	1,042180773	330
16.12.2020 05:00	79,632	94,09702637	3,228221911	1,221738623	1162
16.12.2020 06:00	112,75	92,00176865	3,484123381	1,458936638	1499
16.12.2020 07:00	117,362	92,34499182	3,52715614	1,853917328	1772
16.12.2020 08:00	116,548	108,3707201	1,933222767	1,801982957	1745
16.12.2020 09:00	96,272	103,2562958	2,471227876	1,845649749	1653
16.12.2020 10:00	77,062	102,9290365	2,687156695	2,229451741	1543
16.12.2020 11:00	58,378	99,59857449	3,103905053	1,882562744	1545
16.12.2020 12:00	46,456	96,70113239	3,398822891	1,484670934	1635
16.12.2020 13:00	32,956	98,60681917	3,253850309	1,228958199	1460
16.12.2020 14:00	36,54	96,74503303	3,413932171	1,05184569	1731
16.12.2020 15:00	37,394	95,61558934	3,441090623	1,1174041	1756
16.12.2020 16:00	44,35	95,82511512	3,335899435	1,318737124	1762
16.12.2020 17:00	58,762	96,07255507	3,242566164	1,252712934	1816
16.12.2020 18:00	82,822	97,13016135	3,108686471	1,224183963	1651
16.12.2020 19:00	72,776	97,00444589	3,065653712	1,24165068	1213
16.12.2020 20:00	109,116	96,10248733	3,030653735	1,128582799	824
16.12.2020 21:00	117,914	95,41404551	2,902320487	1,154782875	637
16.12.2020 22:00	85,228	94,24668763	2,920681131	1,231403539	495

16.12.2020 23:00	52,436	96,13241958	2,617921768	1,054756809	238
17.12.2020 00:00	39,066	96,19228409	2,515025661	0,971382347	133
17.12.2020 01:00	33,338	96,08851894	2,581200481	1,094115145	78
17.12.2020 02:00	27,004	96,88072591	2,54696553	1,108670742	54
17.12.2020 03:00	27,198	96,50158404	2,563604864	1,07571687	69
17.12.2020 04:00	30,728	93,7178845	2,688686748	1,027625176	338
17.12.2020 05:00	37,296	92,51859889	2,693468166	1,109136521	1151
17.12.2020 06:00	41,97	92,8199169	2,657703162	1,152337534	1448
17.12.2020 07:00	48,448	92,37891504	2,683140304	1,231403539	1716
17.12.2020 08:00	45,806	92,3469873	2,684861614	1,327004703	1743
17.12.2020 09:00	33,658	96,12643313	2,528604887	1,448340163	1601
17.12.2020 10:00	31,62	95,79917383	2,641828856	1,398268908	1534
17.12.2020 11:00	26,242	97,79864834	2,631309737	1,448805942	1571
17.12.2020 12:00	24,644	96,99446847	2,923932495	1,376493734	1635
17.12.2020 13:00	20,364	99,47485451	2,869615591	1,500740313	1593
17.12.2020 14:00	19,68	98,94206041	3,188440517	1,404091147	1664
17.12.2020 15:00	19,154	90,12002767	3,763740683	1,026227838	1671
17.12.2020 16:00	21,72	90,54506567	3,71745656	1,40513915	1712
17.12.2020 17:00	29,01	89,93045674	3,653003051	1,277515672	1448
17.12.2020 18:00	37,612	93,22100909	3,251363972	1,345402978	1512
17.12.2020 19:00	42,126	94,30455666	3,115954226	1,302201965	1335
17.12.2020 20:00	37,288	95,20451973	3,026637345	1,230006202	869
17.12.2020 21:00	34,786	96,38385051	2,83136425	1,050914132	730
17.12.2020 22:00	39,682	95,59962548	2,722156672	0,948093392	548
17.12.2020 23:00	31,878	96,62530402	2,729424426	1,010158459	225
18.12.2020 00:00	37,188	97,62903224	2,607402649	0,904892379	122
18.12.2020 01:00	39,134	96,49559758	2,728659399	0,923290654	82
18.12.2020 02:00	41,858	95,67545385	2,668031024	0,839333968	59
18.12.2020 03:00	43,362	92,65628725	2,941336855	0,822449475	118
18.12.2020 04:00	57,826	91,11377848	3,063358632	0,856334906	371
18.12.2020 05:00	63,706	90,81844691	3,05303077	0,949490729	1170

18.12.2020 06:00	58,38	92,37691956	2,892757652	1,038338095	1504
18.12.2020 07:00	56,09	95,61359386	2,652156718	1,179469168	1743
18.12.2020 08:00	66,924	93,98328381	2,795599246	1,373582615	1682
18.12.2020 09:00	62,93	94,66374369	2,6473753	1,38371331	1541
18.12.2020 10:00	30,448	99,76020866	2,545435477	1,543126213	1379
18.12.2020 11:00	24,084	96,98848202	2,961227552	1,393960451	1548
18.12.2020 12:00	18,968	102,0689831	2,733440817	1,542427544	1545
18.12.2020 13:00	15,09	107,0656739	2,73267579	1,553140464	1576
18.12.2020 14:00	13,468	99,74624027	3,619533128	1,148960636	1679
18.12.2020 15:00	16,062	89,27593813	4,312073654	0,832580171	1719
18.12.2020 16:00	20,484	84,91979756	4,211663884	0,975690804	1674
18.12.2020 17:00	25,836	86,47427924	3,83469692	1,305695308	1661
18.12.2020 18:00	24,636	89,6071884	3,370134386	1,22849242	1476
18.12.2020 19:00	25,2	88,15048542	3,432292814	1,392446669	1181
18.12.2020 20:00	32,364	88,20835444	3,323085236	1,395823567	882
18.12.2020 21:00	37,438	89,3158478	3,096063528	1,23093776	621
18.12.2020 22:00	49,172	90,17191024	2,883194817	1,258535173	571
18.12.2020 23:00	64,442	89,10831752	2,849724893	1,216382163	343
19.12.2020 00:00	83,734	90,22379282	2,658468189	1,144535734	230
19.12.2020 01:00	103,292	89,34777554	2,743768679	1,087827127	127
19.12.2020 02:00	141,134	89,49743681	2,608167676	1,044160334	84
19.12.2020 03:00	163,666	88,01279705	2,685626641	1,048003012	96
19.12.2020 04:00	208	88,55756406	2,609123959	1,090738246	134
19.12.2020 05:00	356	86,4064328	2,754861568	1,188668305	306
19.12.2020 06:00	364	85,98538578	2,770735874	1,16491357	395
19.12.2020 07:00	330	85,01358529	2,874397008	1,3415603	514
19.12.2020 08:00	218	83,90409644	3,038686517	1,374048394	770
19.12.2020 09:00	109,228	87,55982229	2,89983415	1,408981827	1127
19.12.2020 10:00	25,55	101,5621303	2,07111885	1,549181341	1280
19.12.2020 11:00	15,884	95,32624423	2,801910717	1,150357973	1448
19.12.2020 12:00	12,106	101,6140129	2,449615868	1,406070708	1458

19.12.2020 13:00	10,994	107,0716604	2,46166504	1,425516986	1510
19.12.2020 14:00	8,854	102,6317095	3,023385981	1,203806127	1597
19.12.2020 15:00	11,096	93,61012838	3,657019442	0,856334906	1432
19.12.2020 16:00	14,944	89,58523808	3,556609672	0,998513981	1202
19.12.2020 17:00	14,988	91,18960685	3,192456907	1,245027578	1333
19.12.2020 18:00	15,114	92,36095569	2,986090923	1,353670557	1183
19.12.2020 19:00	16,502	92,40884729	2,851254947	1,285783251	962
19.12.2020 20:00	16,698	91,91396738	2,821801414	1,287646368	719
19.12.2020 21:00	18,764	91,75033772	2,764424403	1,338183402	558
19.12.2020 22:00	19,546	92,31505957	2,633796074	1,3493621	511
19.12.2020 23:00	22,456	91,56874872	2,664014633	1,340628742	409
20.12.2020 00:00	20,096	92,18535314	2,603577515	1,205669243	227
20.12.2020 01:00	20,338	92,31705505	2,558823446	1,152337534	138
20.12.2020 02:00	22,756	92,16739378	2,489588519	1,163050454	96
20.12.2020 03:00	26,956	90,66080371	2,592293369	1,210094145	56
20.12.2020 04:00	27,896	91,58271711	2,528604887	1,2333831	79
20.12.2020 05:00	30,114	90,90824367	2,598604841	1,329450043	163
20.12.2020 06:00	35,506	90,52511083	2,516555714	1,327936261	172
20.12.2020 07:00	33,742	91,25346232	2,464725148	1,356581677	218
20.12.2020 08:00	34,122	93,31280134	2,319752566	1,303715747	367
20.12.2020 09:00	28,284	93,4744355	2,3421296	1,404673371	720
20.12.2020 10:00	18,804	99,97971185	2,007430368	1,638494487	956
20.12.2020 11:00	14,038	96,47165178	2,519807078	1,457073521	1221
20.12.2020 12:00	10,74	100,6701492	2,329315401	1,474540238	1248
20.12.2020 13:00	10,546	97,35964196	2,7158452	1,268782313	1243
20.12.2020 14:00	10,336	94,49612308	2,90155546	1,355184339	1319
20.12.2020 15:00	8,64	95,00896235	2,783550074	1,389535549	1214
20.12.2020 16:00	7,79	94,46219986	2,837675721	1,464758877	1161
20.12.2020 17:00	7,336	94,47816373	2,81855005	1,490958952	1153
20.12.2020 18:00	6,76	95,09476814	2,728659399	1,500158089	1071
20.12.2020 19:00	6,902	95,8151377	2,663249607	1,393960451	860

20.12.2020 20:00	8,418	94,19480506	2,782785047	1,353204778	636
20.12.2020 21:00	9,352	94,77549077	2,705517338	1,388603991	435
20.12.2020 22:00	11,732	92,84386271	2,90155546	1,383247531	315
20.12.2020 23:00	15,998	91,45899713	3,032183789	1,379404853	164
21.12.2020 00:00	28,156	91,76231063	2,890271315	1,325490921	74
21.12.2020 01:00	32,8	92,5904363	2,787566464	1,315360225	60
21.12.2020 02:00	46,418	93,41058003	2,700735921	1,288228591	62
21.12.2020 03:00	49,278	93,29883295	2,789096518	1,254226716	89
21.12.2020 04:00	46,362	94,50210953	2,649670381	1,235246217	350
21.12.2020 05:00	54,114	93,18109942	2,793112909	1,263891633	1114
21.12.2020 06:00	77,256	92,43079761	2,81395989	1,302667744	1414
21.12.2020 07:00	68,192	91,01001333	2,923741238	7,771757448	1502
21.12.2020 08:00	80,144	90,84239271	2,869615591	1,355067895	1634
21.12.2020 09:00	53,958	93,42853938	2,63054471	1,3415603	1592
21.12.2020 10:00	25,294	101,6539225	2,194670681	1,513316349	1447
21.12.2020 11:00	20,67	97,56517676	2,709533729	1,209046142	1502
21.12.2020 12:00	17,604	102,4241792	2,426665063	1,327004703	1463
21.12.2020 13:00	15,88	103,4299029	2,591528343	1,278913009	1605
21.12.2020 14:00	16,562	104,0225615	2,755626595	1,28089257	1674
21.12.2020 15:00	22,598	90,62688049	3,688003028	0,79333828	1633
21.12.2020 16:00	27,954	88,30613313	3,543795473	1,275070331	1730
21.12.2020 17:00	34,22	89,12428138	3,306254646	1,588073898	1855
21.12.2020 18:00	29,704	92,50063954	2,957402418	1,481759814	1697
21.12.2020 19:00	26,242	93,21901361	2,853741284	1,388603991	1099
21.12.2020 20:00	25,844	94,09702637	2,769970848	1,440072583	752
21.12.2020 21:00	22,358	94,31652956	2,754096541	1,350759438	692
21.12.2020 22:00	20,328	95,07880427	2,731719507	1,340046518	604
21.12.2020 23:00	19,892	94,83934625	2,773987238	1,348314097	301

C Interviewmaterial

Interview mit Guido Burger zum Thema Kategorisierung von Umweltsensoren am 20.02.2020:

- 1. Es gibt sehr günstige Sensoren (wenige Euros), die allerdings nur den Gesamtgehalt von Gasen in der Luft messen können (VOCs) oder meteorologische Faktoren wie Temperatur
- 2. Es gibt günstige Sensoren (ca. 20-30€ plus minus), die spezifische Gase messen können
- 3. Es gibt teure Sensoren, die bereits kalibriert und validiert sind
- Optische Feinstaubsensoren saugen Luft ein und zählt die Partikel per Laser
 - Problem: bei hoher Luftfeuchtigkeit, zählt der Feinstaubsensor die Wasserteilchen in der Luft als Feinstaub und das erhöht die Anzahl gezählter Partikel
 - Lösung: ein parallellaufenden Luftfeuchtigkeitssensor

Telefonat mit Krzysztof Janiuk von Alphasense Ltd über ihr Angebot an Umweltsensoren am 20.04.2020

- Datenblätter und Dokumentationen per E-Mail zusenden
- Erklärung der von Alphasense angebotenen Sensoren und des angebotenen Zubehörs, wie die Analogue Front Ends
- Austausch über den bestehenden Aufwand für die Inbetriebnahme der Sensoren

Telefonat mit Robert Heinecke von Breeze Technologies über ihr Angebot an Umweltsensoren und ihre Funktionsweise am 22.05.2020:

- Vorstellung des von Breeze angebotenen Sensorpakets
 - Welche Parameter sind enthalten und welche können zu Aufpreisen zusätzlich angeboten werden
 - Preise und darin inkludierte Leistungen
 - Ablauf des Datentransfers über LoRaWAN an die Cloud von Breeze, dortige Kalibrierung und Versand der Daten an den Nutzer
 - Aufwand für den Nutzer

Telefonat mit Karim Tarraf von Hawa Dawa über ihr Angebot an Umweltsensoren und ihre Funktionsweise am 27.05.2020:

- Vorstellung des von Hawa Dawa angebotenen Sensorpakets
 - Welche Parameter sind enthalten
 - Preise und darin inkludierte Leistungen
 - Ablauf des Datentransfers über LoRaWAN
 - Kalibrierung der Daten
 - Aufwand für den Nutzer

Telefonat mit Sebastian Schulz vom DLR über bereits gemachte Erfahrungen mit Umweltsensoren am 23.06.2020:

- Sensoren bzw. Mikrochips der MQ Reihe sind sehr temperaturanfällig
- Feinstaub wichtig der Lüfter
- Für Feinstaub sind optische Sensoren besser als andere! (ist meiner optisch?)
- Kontakte zu Referenzstationen
- Dafür Gehäuse überlegen
- Strom ist vorhanden: Steckdose 230Volt →geht einfach mit einem Ladegerät fürs Handy

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Masterarbeit eigenständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Alle von anderen Autoren wörtlich übernommenen Stellen, wie auch die sich an die Gedankengänge anderer Autoren eng anlehnenden Ausführungen meiner Arbeit sind besonders gekennzeichnet.

Diese Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Berlin, den 12. Januar 2021

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'H. Zepner'.