



Masterarbeit

„Einbindung der Lärm- und Luftschadstoffmessung in das Projekt OpenBikeSensor“

Abgabetermin: 27.11.2024

Erstellt von: Merle Louisa Riecke

Vorgelegt bei: **Erstprüfende/r**

Prof. Dr.-Ing. Jörn Pacht

Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung

Zweitprüfende/r

Prof. Dr. rer. Nat. Meinhard Schilling

Institut für Elektrische Messtechnik und Grundlagen der
Elektrotechnik

Betreuung: Bastian Ehrenholz, M.Sc.



„Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten ebenso für weibliche und anderweitige Geschlechtsidentitäten.“



„Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.“

Braunschweig, (Abgabedatum)

Unterschrift (Name)

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Messgerät aufbauend auf dem OpenBikeSensor konzipiert, welches Feinstaub und Kohlenstoffdioxid während der Fahrt mit dem Fahrrad misst. Neben den beiden genannten Schadstoffen werden weitere Parameter wie Temperatur, Druck und relative Luftfeuchtigkeit gemessen. Für die Kalibrierung des Kohlenstoffdioxidsensors wurde die eingebaute Nullkalibrierung verwendet. Der Feinstaubsensor hat keine eingebaute Kalibrierung und wurde deswegen neben einer offiziellen Messstation des Staatlichen Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim (GAA) aufgehängt. Die bei dieser Messung erlangten Werte zeigen, dass der Feinstaubsensor HM3301 vom selbstgebauten Messgerät im Gegensatz zu der offiziellen Messstation geringere Werte für PM₁₀ und höhere Werte für PM_{2,5} aufzeigt. Generell misst der Feinstaubsensor HM3301 für PM_{2,5} und PM₁₀ die gleichen Werte. In der Theorie sollten die Werte für PM_{2,5} geringer sein als für PM₁₀ wie es bei der offiziellen Messstation ist.

Mit dem Messgerät wurden anschließend mehrere Messfahrten mit dem Fahrrad durchgeführt, um die Belastung durch Luftverschmutzungen für die Fahrradfahrer festzustellen. Die Werte aus den Messungen übersteigen, bis auf einer Ausnahme nicht die gesetzlich festgesetzten Grenzwerte. In den nächsten Jahren will die Europäische Union die Werte der Grenzwerte herabsetzen, da es in den letzten Jahrzehnten zu neuen Erkenntnissen im Bereich der Luftverschmutzungen gekommen ist. Nach den neuen gesetzlichen Vorgaben würden mehrere Werte aus den Messfahrten die Grenzwerte überschreiten.

Aus verschiedenen Studien ergab sich, dass Fahrradfahrer der größten Feinstaubexposition im Straßenverkehr ausgesetzt sind. Dies läge vor allem an der längeren Reisezeit, dem höheren Atemvolumen durch die Anstrengung und, der Ermangelung eines Schutzes vor der Außenluft, wie beispielsweise durch eine Fahrzeugkarosserie. Bei den Auswirkungen der Schadstoffe auf Menschen zeigten Studien verschiedene Ergebnisse. Einige stellten nach Fahrten mit Probanden keine Veränderungen der Lungen- oder Herzfunktion fest und andere zeigten auf, dass die Feinstaubexposition die Lungenfunktion vermindert, direkt nach der Fahrt. Diese Ergebnisse hingen dabei



vom Zeitraum der Messungen nach der Fahrt und dem unterschiedlichen Atemvolumen der Probanden ab.

Abstract

In this work, a measuring device was designed based on the OpenBikeSensor, which measures particulate matter and carbon dioxide while cycling. In addition to the two pollutants mentioned, other parameters such as temperature, pressure and relative humidity are measured. The built-in zero calibration was used to calibrate the carbon dioxide sensor. The particulate matter sensor has no built-in calibration and was therefore installed next to an official measuring station of the Hildesheim State Labour Inspectorate (GAA). The values obtained during this measurement show that the particulate matter sensor HM3301 from the self-built measuring device shows lower values for PM₁₀ and higher values for PM_{2.5} in contrast to the official measuring station. In general, the HM3301 particulate matter sensor measures the same values for PM_{2.5} and PM₁₀. In theory, the values for PM_{2.5} should be lower than for PM₁₀, as is the case with the official measuring station.

The measuring device was then used to carry out several measurement trips by bicycle to determine the exposure to air pollution for cyclists. With one exception, the values from the measurements do not exceed the legally stipulated limit values. Over the next few years, the European Union intends to lower the limit values, as new findings have been made in the field of air pollution in recent decades. According to the new legal requirements, several values from the measured journeys would exceed the limit values.

Various studies have shown that cyclists are exposed to the highest levels of particulate matter in road traffic. This is mainly due to the longer journey time, the higher breathing volume caused by the exertion and the lack of protection from the outside air, such as a vehicle body. Studies have shown different results regarding the effects of pollutants on people. Some found no changes in lung or heart function after driving with test subjects and others showed that particulate matter exposure reduced lung function immediately after driving. These results depended on the time period of the measurements after the journey and the different breathing volumes of the test subjects.



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
1 Einleitung	6
2 Theoretischer Hintergrund.....	8
2.1 Lärm- und Luftschadstoffe	8
2.1.1 Grenzwerte	8
2.1.2 Feinstaub.....	9
2.1.3 Kohlenstoffdioxid	12
2.1.4 Stickstoffoxide	14
2.1.5 Ozon.....	16
2.1.6 VOC	17
2.1.7 Lärm	18
2.2 Elektrotechnische Bauteile.....	20
2.2.1 ESP32 NodeMCU Development Board.....	20
2.2.2 Feinstaubsensor HM3301.....	22
2.2.3 Kohlenstoffdioxidssensor MH-Z19C	23
2.2.4 Multisensor BME680.....	24
2.2.5 ESP8266 STM-32 Arduino SPI Kartenleser 3,3V.....	26
2.2.6 U-blox NEO-6M GPS TTL Empfänger inkl. Antenne	26
2.3 OpenBikeSensor	27
2.4 Statistik.....	27
3 Elektronische Zusammensetzung	29
3.1 Schaltplan.....	29
3.2 Bauanleitung.....	31
3.3 Programmcode	33



4	Messungen	34
4.1	Kalibrierung der Messwerte	34
4.1.1	Kohlenstoffdioxidsensor MH-Z19C	34
4.1.2	Feinstaubsensor HM3301	34
4.2	Durchführung Messfahrten	37
5	Ergebnisse	38
5.1	Kalibrierung	38
5.2	Messfahrten	41
5.2.1	Messfahrt vom 16.11.2024	41
5.2.2	Messfahrt vom 17.11.2024	43
5.2.3	Messfahrt vom 18.11.2024	45
5.2.4	Messfahrt vom 20.11.2024	47
6	Diskussion	49
7	Fazit	53
8	Ausblick	55
9	Quellenverzeichnis	57
10	Anhang	63



Abkürzungsverzeichnis

39. BImSchV Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes

bzw. beziehungsweise

ca. circa

dB Dezibel

EEA Europäische Umweltagentur

EU Europäische Union

GAA Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim

IR Infrarot

KBA Kraftfahrtbundesamt

MIV motorisierter Individualverkehr

PM particulate matter

VOC volatile organic compounds

WHO world health organization

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bestand Kraftfahrzeuge in Deutschland nach Kraftstoffarten bis 2024..	6
Abbildung 2: Anteil des Verkehrs an den Partikelemissionen (PM10) in Deutschland	10
Abbildung 3: Verteilung der CO2-Emissionen in Deutschland nach Quellgruppen im Jahr 2023.....	13
Abbildung 4: Anteil des Verkehrs an den Stickoxidemissionen (NOx) in Deutschland.	15
Abbildung 5: Microcontroller ESP32.	21
Abbildung 6: Pinverteilung des Microcontroller ESP32.....	21
Abbildung 7: Feinstaubsensor HM3301.....	22
Abbildung 8: Aufbau des Feinstaubsensors HM3301.....	22
Abbildung 9: Kohlenstoffdioxidsensor MH-Z19C.	23
Abbildung 10: Multisensor BME680.....	25
Abbildung 11: microSDCard-Modul	26
Abbildung 12: GPS Modul	26
Abbildung 13: Schaltplan für die Verbindungen des Gerätes.	30
Abbildung 14: mögliche Platzierung der Stift- bzw. Buchsenleiste	32
Abbildung 15: fertige Verkabelung des Messgerätes	33
Abbildung 16: Standort der Messstelle DENIO75 Braunschweig, städtisch, verkehrsnah.....	35
Abbildung 17: Messstation mit den Geräten am Geländer	36
Abbildung 18: Messstation mit den Geräten auf dem Elektrokasten	36
Abbildung 19: Gerät in dem Gehäuse auf dem Gepäckträger des Fahrrades	37
Abbildung 20: Feinstaubmesswerte vom 26.09.2024 des ersten Messzeitraumes. .	38



Abbildung 21: Feinstaubmesswerte vom 26.09.2024 des zweiten Messzeitraumes.	39
Abbildung 22: Feinstaubmesswerte vom 28.10.2024	39
Abbildung 23: Fahrtstrecke der Messfahrt am 16.11.2024.	41
Abbildung 24: Feinstaubmesswerte vom 16.11.2024.	42
Abbildung 25: Kohlenstoffdioxidmesswerte vom 16.11.2024.....	42
Abbildung 26: Fahrtstrecke der Messfahrt vom 17.11.2024.	43
Abbildung 27: Feinstaubmesswerte vom 17.11.2024.	44
Abbildung 28: Kohlenstoffdioxidmesswerte vom 17.11.2024.....	44
Abbildung 29: Fahrtstrecke von der Messfahrt am 17.11.2024.	45
Abbildung 30: Feinstaubmesswerte vom 18.11.2024.	46
Abbildung 31: Kohlenstoffdioxidmesswerte vom 18.11.2024.....	46
Abbildung 32: Fahrtstrecke von der Messfahrt am 20.11.2024	47
Abbildung 33: Feinstaubmesswerte vom 20.11.2024.	48
Abbildung 34: Kohlenstoffdioxidmesswerte vom 20.11.2024.....	48



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Grenzwerte für Feinstaub	12
Tabelle 2: Grenzwerte für Stickoxide	16
Tabelle 3: Immissionsgrenzwerte für Verkehrsgeräusche in verschiedenen Nachbarschaften	19
Tabelle 4: technische Daten ESP32	20
Tabelle 5: technische Daten Feinstaubsensor HM3301	23
Tabelle 6: technische Daten des Kohlenstoffdioxidsensors MH-Z19C	24
Tabelle 7: technische Daten des Multisensors BME680	25
Tabelle 8: Pinverbindungen der Komponenten	29
Tabelle 9: Messdaten vom 26.09.2024 für den ersten Messzeitraum für die Kalibrierung	73
Tabelle 10: Messdaten vom 26.09.2024 für den zweiten Messzeitraum für die Kalibrierung	79
Tabelle 11: Messdaten vom 28.10.2024 für die Kalibrierung	83
Tabelle 12: Messdaten vom 16.11.2024	85
Tabelle 13: Messdaten vom 17.11.2024	93
Tabelle 14: Messdaten vom 18.11.2024	102
Tabelle 15: Messdaten vom 20.11.2024	113

1 Einleitung

Laut dem Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) sind am 01. Januar 2024 rund 49 Millionen Personenkraftwagen (PKW) in Deutschland zugelassen (Kraftfahrt-Bundesamt 2024b). Diese Anzahl spiegelt sich auch in dem Modal Split aus dem Jahr 2022 wieder bei dem die Verkehrsleistung durch den motorisierten Individualverkehr (MIV) rund 80,9 % ausmacht (BALM 2024). Viele dieser Kraftfahrzeuge sind täglich auf den Straßen in Deutschland unterwegs und ballen sich gerade in den Städten aufgrund der hohen Einwohnerzahlen (Deutschlandatlas 2024). Diesel- und Benzinmotoren, siehe Abbildung 1, machen immer noch den größten Teil der Kraftfahrzeuge aus, obwohl diese für eine starke Luftverschmutzung durch die Abgase verantwortlich sind (Umweltbundesamt 2022a).

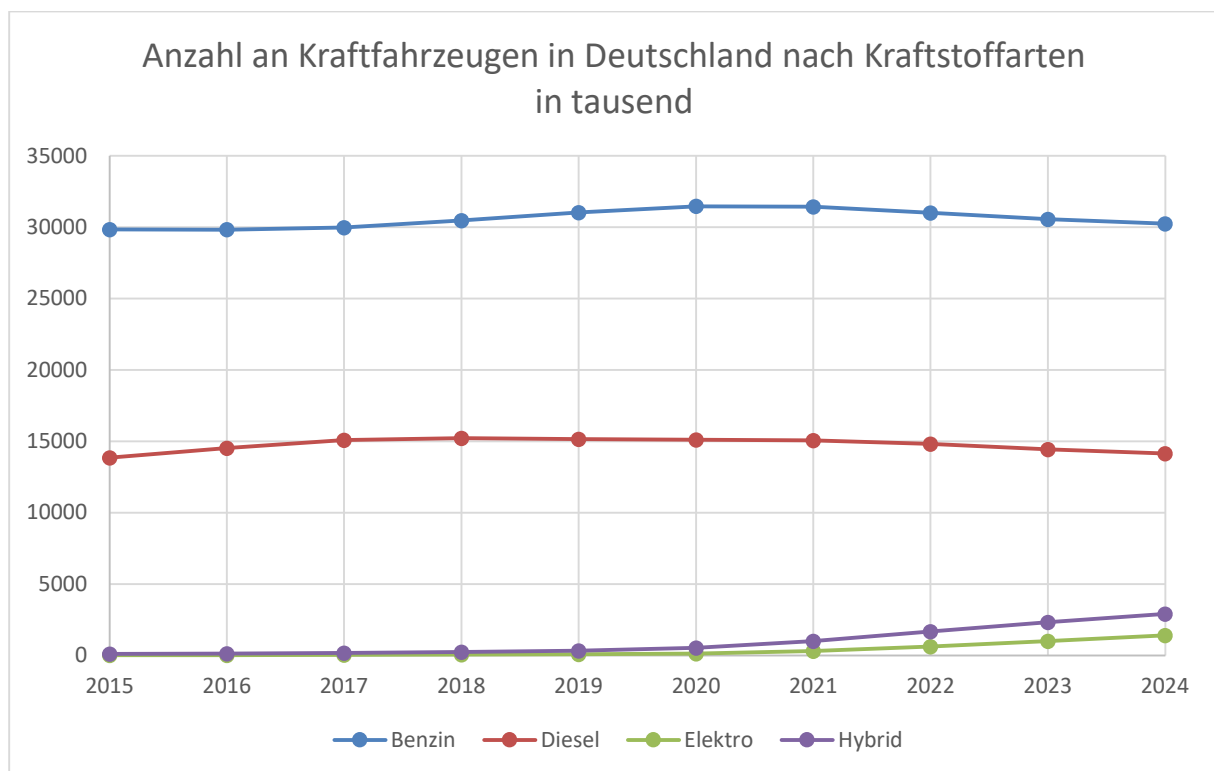


Abbildung 1: Bestand Kraftfahrzeuge in Deutschland nach Kraftstoffarten bis 2024 (Kraftfahrt-Bundesamt 2024a).

Die bedeutendsten Schadstoffe aus den Abgasemissionen der Kraftfahrzeuge sind Feinstaub, Kohlenstoffdioxid und Stickoxide, welche neben der Schädigung für den

Menschen auch unter anderem für den Klimawandel verantwortlich sind (Umweltbundesamt 2024d). Zusätzlich werden Schadstoffe wie Feinstaub durch den Abrieb von Reifen oder Bremsen in die Umwelt emittiert (Umweltbundesamt 2022a). Neben den Luftschadstoffen bergen die Lärmemissionen des Straßenverkehrs ein Gefährdungspotenzial für die naheliegende Umgebung, da Menschen durch dauerhafte Lärmeinwirkungen körperliche Langzeitschädigungen davontragen können (Umweltbundesamt 2022c).

Die Fahrradfahrer sind im Straßenverkehr oftmals direkt den Abgas- und Abriebemissionen der Kraftfahrzeuge ausgesetzt, da die Fahrradwege meistens direkt neben den Straßen entlangführen oder direkt innerhalb des Straßenverkehrs angesiedelt sind. Neben der Gefährdung durch die Abgase der Kraftfahrzeuge sind die Fahrradfahrer auch durch die Fahrzeuge an sich gefährdet, da sie die gleichen Straßenwege benutzen, was ein gewisses Unfallrisiko beinhaltet. Für die Messung von Überholabständen der Kraftfahrzeuge gegenüber den Fahrradfahrern wurde das Projekt OpenBike-Sensor (OBS) entwickelt. Mit diesem Gerät wird auf einem kleinen Display am Lenker des Fahrrades angezeigt in welchem Abstand das Auto am Fahrrad während des Überholvorgangs vorbeigefahren ist. In vielen Situationen werden die gesetzlich vorgeschriebenen 1,5 m aus verschiedensten Gründen nicht eingehalten (OpenBike-Sensor 2024).

Die modulare Grundidee des OBS soll während der Masterarbeit aufgegriffen und um ein Modul zur Messung der Luftschadstoffe Feinstaub und Kohlenstoffdioxid weiterentwickelt werden. Die Messung der Luftschadstoffe soll dabei parallel zu der bisherigen Abstandsmessung des OBS möglich sein. Das Ziel dieser Masterarbeit ist eine Kalibrierung der gewählten Sensoren sowie eine gesundheitliche Einstufung der Messwerte vor dem Hintergrund einschlägiger medizinischer Literatur. Die gemessenen Daten sollen nach der Fahrt auf einer Karte darstellbar sein. Dadurch könnten Routing-Algorithmen Wege hinsichtlich der Luftqualität optimieren oder in der Verkehrsplanung neue Konzepte für die Führung des Radverkehrs entwickelt werden.

Nach der Masterarbeit sollen die Daten als Opensourceprojekt wie das Projekt des OBS veröffentlicht werden.

2 Theoretischer Hintergrund

Mit dem zu entwickelnden Messgerät sollen verschiedene Schadstoffe während der Fahrt mit dem Fahrrad gemessen werden. Im Bereich des theoretischen Hintergrundes werden die verschiedenen Lärm- und Luftschadstoffe genauer beleuchtet, die beim Fahrradfahren im Straßenverkehr Auswirkungen auf den Menschen haben, und zudem werden die verwendeten elektronischen Bauteile mit den wichtigsten Daten vorgestellt.

2.1 Lärm- und Luftschadstoffe

In diesem Unterkapitel werden die einzelnen straßenverkehrsrelevanten Luftschadstoffe und die entstehende Lärmbelastung detaillierter vorgestellt.

2.1.1 Grenzwerte

Laut Aussage der „world health organization“ (WHO) ist die Luftverschmutzung weltweit die größte Gefahr für den Menschen. Durch die hohe Transportfähigkeit der Luftschadstoffe ist dies kein begrenztes Problem, sondern betrifft sämtliche Länder der Welt. Aufgrund dieses hohen Gefahrenpotenzials gibt die WHO Leitlinien heraus, die sich mit gewissen Luftschadstoffen befassen von denen die größte Gefahr ausgeht. Zu diesen Stoffen gehört der Feinstaub, die Stickoxide, die Schwefeloxide, das Ozon und seit neuerem Wissensstand auch das Kohlenmonoxid. Im Jahr 2005 hat die WHO basierend auf den Forschungen und Meinungen von Experten eine Leitlinie gegen die Luftverschmutzung veröffentlicht in der Richtwerte aufgeführt werden für die eben genannten Luftschadstoffe abzüglich des Kohlenmonoxids. Diese Leitlinien sollen weltweit den Ländern helfen gesetzliche Vorgaben für das eigene Land zu formulieren und durchzusetzen. Diese Leitlinien der WHO dienen hierbei jedoch nur als Richtwert und sind nicht rechtlich bindend (WHO 2006). Aufgrund neuester Erkenntnisse hat die WHO 2021 eine neue Leitlinie herausgebracht in der neue Luftschadstoffe aufgenommen wurden und die alten Richtwerte an die jetzige Situation angepasst wurden (WHO 2021).

Basierend auf der WHO Leitlinie aus dem Jahr 2005 hat die Europäische Union (EU) in der Richtlinie 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft für Europa unter anderem Grenzwerte für Feinstaub, Stickoxide und Ozon festgelegt. Diese Richtlinie entstand durch das Europäische Parlament und den Europäischen Rat am 21. Mai 2008 und richtet sich somit an die Mitgliedsstaaten der EU. Ziel der Richtlinie ist die Reduzierung der Luftverschmutzung, sodass keine oder eine nur geringe Schädigung für den Menschen erreicht wird. Zusätzlich werden auch die Auswirkungen auf die Umwelt berücksichtigt. Neben der Festlegung der Grenzwerte werden in der Richtlinie auch andere Ziele festgesetzt, wie die Ermittlung von effizienteren Maßnahmen für die Emissionsminderung. Durch die neuste Version der Leitlinien für Luftschadstoffe der WHO soll auch die EU-Richtlinie an die neuen Grenzwerte angepasst werden. Gründe dafür sind neben den veralteten Daten auch, dass sich vermehrt an die Vorschläge der WHO gehalten werden soll.

Richtlinien der EU müssen in nationales Recht übertragen werden in Form einer Verordnung. In Deutschland regelt die 39. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes über die Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen die Grenzwerte für die Luftschadstoffe.

2.1.2 Feinstaub

Der Feinstaub (*particulate matter*, PM) hat als Teil des sogenannten Schwebstaubes die Fähigkeit in der Luft zu schweben und wird in die Gruppen des primär und emittierten und sekundär gebildeten Feinstaubes eingeteilt. Der primäre Feinstaub wird direkt an der Quelle freigesetzt, welche in den meisten Fällen Verbrennungsprozesse sind, wie zum Beispiel die Emissionen von Kraftfahrzeugen oder Kraft- und Fernheizwerken. Neben anthropogenen Quellen kann primärer Feinstaub auch aus natürlichen Prozessen stammen wie zum Beispiel aus Bodenerosionen. In Ballungsräumen ist die Hauptquelle des primären Feinstaubes der Straßenverkehr, wobei vor allem die Dieselmotoren und der Abrieb von Reifen auf dem Straßenbelag von Bedeutung sind (Umweltbundesamt 2022a). Im Jahr 2022 machten die Feinstaubemissionen des Straßenver-

kehrs einen Anteil von 19 % an den gesamten Emissionen in Deutschland aus (Abbildung 2). Dies entspricht ungefähr 35,15 tausend Tonnen Feinstaubemissionen von PM10, dies sind Partikel bis zu einem Durchmesser von 10 μm (Umweltbundesamt 2024c). Der sekundäre Feinstaub entsteht durch gasförmige Vorläufersubstanzen wie Schwefel- und Stickoxide, wobei die Hauptquelle des sekundären Feinstaubes die Landwirtschaft mit den Ammoniakemissionen ist (Umweltbundesamt 2022a).

Anteil des Verkehrs an den Partikelemissionen (PM10) in Deutschland*

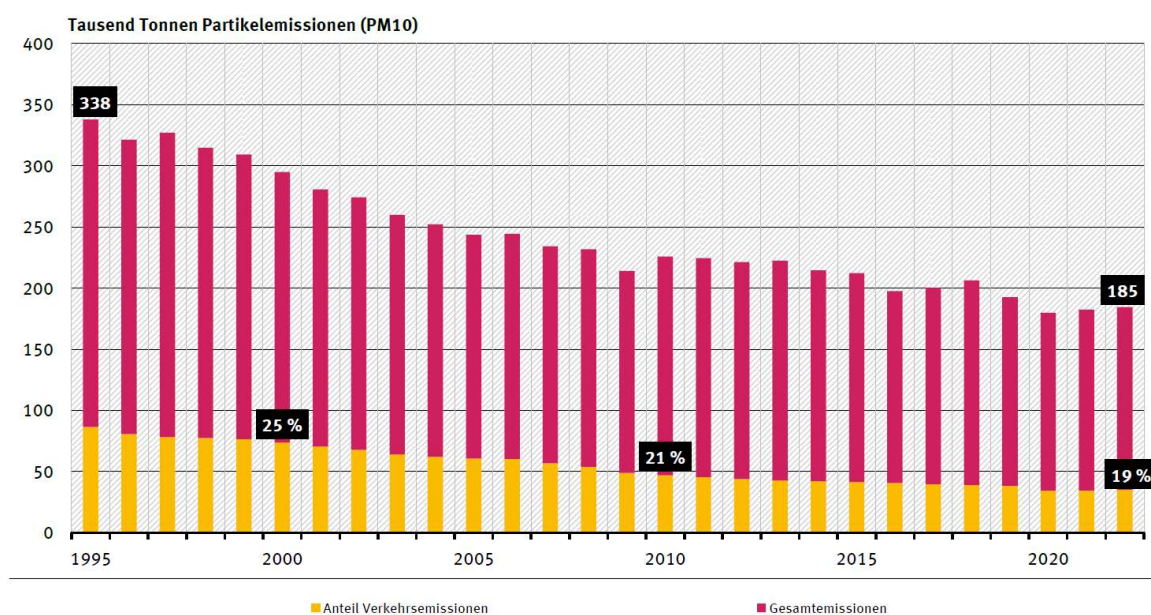


Abbildung 2: Anteil des Verkehrs an den Partikelemissionen (PM10) in Deutschland (Umweltbundesamt 2024c).

Die Belastung durch den Feinstaub verzeichnet seit der Aufzeichnung im Jahr 1995 einen Rückgang, jedoch nicht so deutlich wie bei anderen Luftschadstoffen. Im Laufe der Jahre haben sich die Quellen des Feinstaubes verschoben. Früher war eine der Hauptquellen noch der Kohleabbau, welcher in der heutigen Zeit jedoch nicht mehr gefördert wird und somit eine untergeordnete Rolle bei den Emissionen einnimmt. Mittlerweile entstehen die größten Fraktionen des Feinstaubes durch den Straßenverkehr und im Besonderen durch die Dieselmotoren (Wermelt 2015).

Für die Klassifizierung von Feinstaub wird der aerodynamische Durchmesser verwendet (WHO 2021). Eingeteilt wird der Feinstaub in PM10, welcher eine Größe von < 10

μm aufweist, $\text{PM}_{2,5}$, welcher eine Größe von $< 2,5 \mu\text{m}$ aufweist, und ultrafeiner Feinstaub, welcher eine Größe von $< 0,1 \mu\text{m}$ aufweist (Umweltbundesamt 2022a).

Im europäischen Bereich ist Feinstaub der für den Menschen gefährlichste Luftschadstoff (European Environment Agency 2013). Die Gefährdung des Menschen durch Feinstaub hängt vor allem von der Größe der einzelnen Partikel ab, da kleinere Feinstaubpartikel tiefer in den menschlichen Körper gelangen können. Der Feinstaub PM_{10} kann meist schon im Nasenbereich abgeschieden werden und hat somit nur geringe Folgen für den menschlichen Körper. Die kleineren Partikel können jedoch bis in die Lunge vordringen und die ultrafeinen Partikel können bis in den Blutkreislauf gelangen. Eine Belastung mit Feinstaub kann von Schleimhautreizungen über Entzündungen im Atembereich bis zu Lungenkrebs führen (Umweltbundesamt 2022a). Eine dauerhafte höhere Exposition von $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit PM_{10} kann bei Erwachsenen eine Verkürzung der Lebenszeit um bis zu 6 Monate bewirken (Schweisfurth 2018).

In der nachfolgenden Tabelle 1 sind die Grenzwerte für Feinstaub dargestellt mit den verschiedenen Leitlinien oder gesetzlichen Grundlagen. Unterschieden werden die Grenzwerte in einem Jahresmittelwert und einem Tagesmittelwert. Für den Tagesmittelwert wurden zulässige Anzahlen an Überschreitungen pro Jahr festgelegt. Der Informationsschwellenwert, bei dem die Bevölkerung über die Gefahr informiert werden muss, liegt für PM_{10} bei $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und für $\text{PM}_{2,5}$ bei $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Beide Werte müssen ein Tag lang überschritten werden. Bei der Überschreitung des Alarmschwellwertes müssen direkte Gegenmaßnahmen ergriffen werden und gilt für die Überschreitung von drei oder weniger Tagen. Der Wert liegt für PM_{10} bei $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und für $\text{PM}_{2,5}$ bei $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

An den Werten lässt sich erkennen, dass die WHO Leitlinie schärfere Richtwerte ermittelt hat als die EU nachher gesetzlich festgelegt hat. Außerdem sind die Grenzwerte für $\text{PM}_{2,5}$ strenger als die Grenzwerte für PM_{10} aufgrund der höheren Gefährlichkeit der kleineren Partikel. Dennoch gibt es in der momentanen gesetzlichen Vorlage lediglich einen Grenzwert für $\text{PM}_{2,5}$ für den Jahresmittelwert. Da es mittlerweile mehr Erkenntnisse in Bezug auf die Schädigung durch die kleineren Partikel gibt, hat die WHO 2021 eine neue Leitlinie herausgebracht mit angepassten Richtwerten (WHO

2021). Die EU hat auf diese neue Leitlinie reagiert und einen neuen Vorschlag für die Richtlinie 2008/50/EG herausgebracht (Umweltbundesamt 2024b).

Tabelle 1: Grenzwerte für Feinstaub

	Jahresmittelwert [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Tagesmittelwert [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Zulässige Überschreitung Tagesmittelwert
	Feinstaub PM 10		
WHO-Guideline 2005	20	50	-
Richtlinie 2008/50/EG 39. BImSchV	40	50	35
WHO-Guideline 2021	15	45	3 – 4
neue Richtlinie 2008/50/EG	20	45	18
	Feinstaub PM 2,5		
WHO-Guideline 2005	10	25	-
Richtlinie 2008/50/EG 39. BImSchV	25	-	-
WHO-Guideline 2021	5	15	3 - 4
neue Richtlinie 2008/50/EG	10	25	18

2.1.3 Kohlenstoffdioxid

Kohlenstoffdioxid CO_2 besteht aus zwei Sauerstoffatomen und einem Kohlenstoffatom und tritt bei einer Temperatur höher als $-78,5\text{ }^\circ\text{C}$ als ein farbloses Gas auf. In der Atemluft ist Kohlenstoffdioxid der viert häufigste Bestandteil und hat eine Hintergrundkonzentration von ungefähr 280 ppm ohne den anthropogenen Anteil. CO_2 entsteht auf biologischer Ebene durch die Oxidation von organischen Materialien, wie zum Beispiel durch die Atmung von Pflanzen und Menschen, wobei die ausgeatmete Luft von einem Menschen zu ungefähr 4 % aus Kohlenstoffdioxid besteht. Um den höheren Energiebedarf durch die industrielle Revolution zu decken, wurde begonnen fossile Brennstoffe wie Kohle oder Erdöl zu verbrennen, was zu CO_2 -Emissionen führt (Oelkers und Hartmann-Schreier 2024). So entsteht auch in Verbrennungsmotoren von Kraftfahrzeugen, insbesondere bei Dieselmotoren, CO_2 , welches in Form von Abgasen

ausgestoßen wird (Umweltbundesamt 2024c). Die Abbildung 3 zeigt, dass der Verkehrssektor mit 24,1 % im Jahr 2023 den zweitgrößten Anteil an den CO₂-Emissionen in Deutschland ausmachte (Umweltbundesamt 2024d).

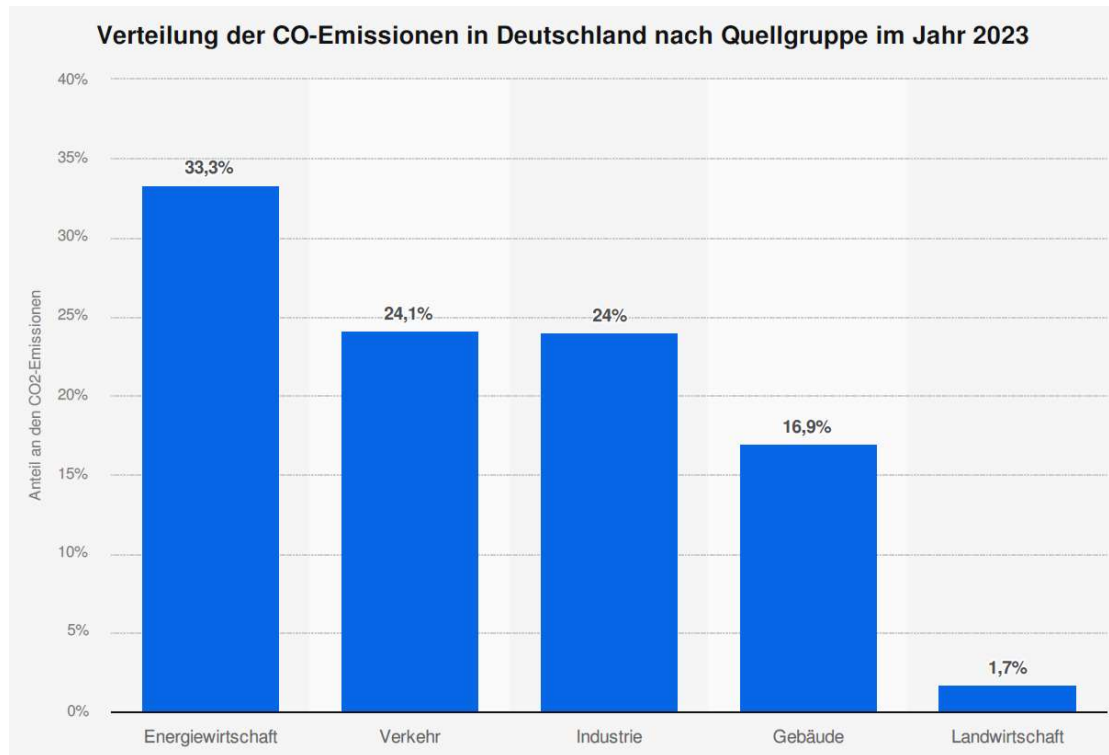


Abbildung 3: Verteilung der CO₂-Emissionen in Deutschland nach Quellgruppen im Jahr 2023 (Umweltbundesamt 2024d).

Kohlenstoffdioxid leistet den größten Beitrag an dem Treibhauseffekt, da das CO₂ die Fähigkeit besitzt das von der Erde emittierte Infrarotlicht zu absorbieren und anschließend teilweise wieder zu reflektieren. Die reflektierten Strahlen gelangen zum Teil wieder zur Erde zurück und tragen dadurch zur Erderwärmung bei, was unter anderem zur Folge hat, dass die Häufigkeit von Extremwetterereignissen sich erhöht.

Bei einer Konzentration von 2 % in der Atemluft treten keine Schädigungen für den Menschen auf. Ab einer Konzentration von 2 – 5 % können Kopfschmerzen und Schwindel auftreten. Da Kohlenstoffdioxid eine erstickende Wirkung hat, können ab einer Konzentration von 17 % Krämpfe, Koma und auch der Tod auftreten (Oelkers und Hartmann-Schreier 2024).

2.1.4 Stickstoffoxide

Stickstoff ist der größte Bestandteil der Luft mit 78,1 Vol.-% (Kolar 1990). Bei Emissionen mit Stickstoff wird oft von dem Sammelbegriff Stickoxide (NO_x) gesprochen, welcher verschiedenste reaktive Stickstoffverbindungen zusammenfasst. Die beiden häufigsten Komponenten der Stickoxide sind die Verbindungen Stickstoffmonoxid NO und Stickstoffdioxid NO₂ (Deutscher Wetterdienst).

Stickstoff ist im Allgemeinen ein träges Gas und benötigt eine Wärmezufuhr für eine Reaktion. Bei Verbrennungen mit einer Temperatur von über 1000 °C verbinden sich als unerwünschte Nebenreaktion Stickstoff und Sauerstoff zu Stickstoffmonoxid (Kolar 1990). Im nordischen Teil der Erdkugel wird Stickstoffmonoxid zu 90 % aus anthropogenen Quellen emittiert. In bodennahen Bereichen kann Stickstoffmonoxid mit Hilfe von Ozon zu Stickstoffdioxid oxidiert werden, wobei durch die vorhandene Strahlung diese Reaktion auch wieder zurückgeführt werden kann. Durch die eben genannten Reaktionen entsteht eine Art Gleichgewicht zwischen dem Stickstoffmonoxid und -dioxid in der Luft (Deutscher Wetterdienst).

In Ballungsräumen ist der Straßenverkehr die Hauptquelle der Stickstoffoxide mit den Dieselmotoren der Kraftfahrzeuge als Hauptemittenten (Umweltbundesamt 2023). Im Jahr 2023 haben die Stickoxidemissionen aus dem Verkehrsbereich 36 % der Gesamtemissionen der Stickoxide ausgemacht (Abbildung 4), was ungefähr 339 tausend Tonnen Stickoxide entspricht (Umweltbundesamt 2024c).

Anteil des Verkehrs an den Stickoxidemissionen (NOx) in Deutschland

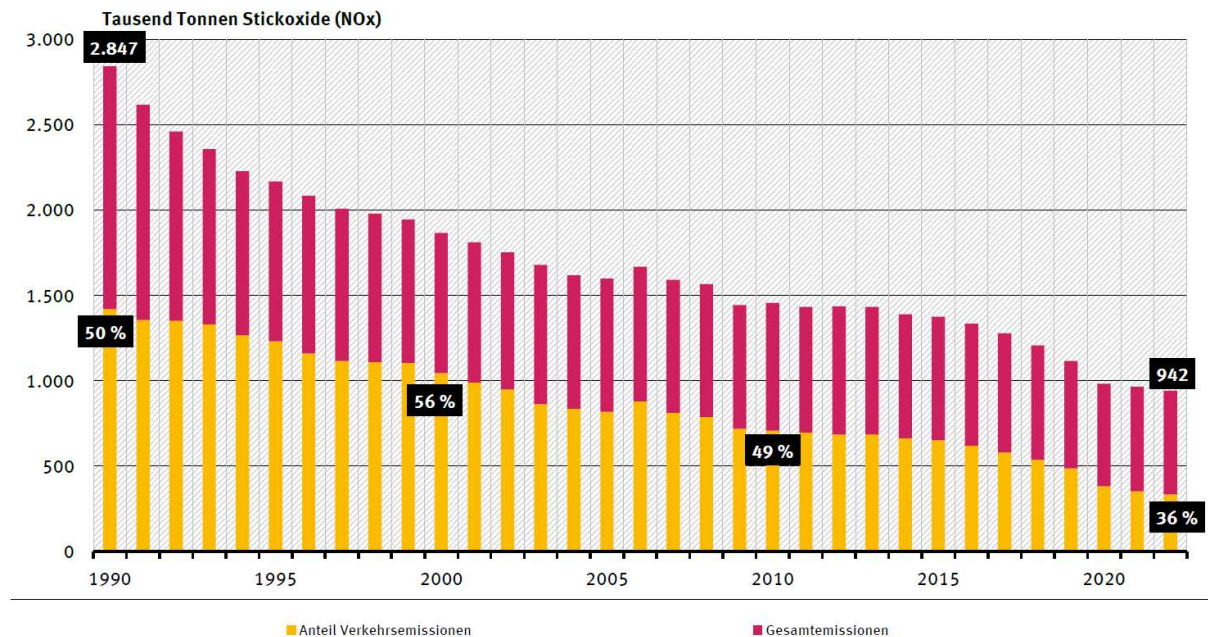


Abbildung 4: Anteil des Verkehrs an den Stickoxidemissionen (NOx) in Deutschland (Umweltbundesamt 2024c).

Aufgrund der fahrzeugtechnischen Verbesserungen konnten die Emissionen der Stickoxide reduziert werden, dennoch werden seit Jahren die Grenzwerte für Stickoxide in der Nähe des Straßenverkehrs überschritten (Udo Becker et al. 2009).

Weltweit sterben jährlich rund 4,2 Millionen Menschen an verschmutzter Luft, die im freien entsteht (Schweisfurth 2018). Die europäische Umweltagentur (EEA) schätzt, dass in Deutschland jährlich 12.200 Menschen durch die Exposition mit Stickoxiden vorzeitig sterben. Die gesundheitlichen Schäden für den Menschen hängen oft von der Länge der Exposition und der Konzentration der Stickstoffoxide in der Atemluft ab. Bei einer kurzen Aussetzung mit Stickstoffoxiden kann es zu einem Hustenreiz, Atemwegsbeschwerden und Augenreizungen führen. Bei einer langen Exposition kommt es im Allgemeinen zu Schädigungen der Atmungsorgane (NABU et al. 2018).

In der nachfolgenden Tabelle 2 sind die Grenzwerte für Stickstoffoxide aufgeführt. Die Richtlinie der EU orientiert sich dabei stark an dem Richtwert der WHO für den Jahresmittelwert. Im Gegensatz zu der WHO hat die Richtlinie der EU jedoch noch einen Tagesmittelwert verabschiedet mit einer Anzahl an zuverlässigen Überschreitungen.

In der WHO Leitlinie aus dem Jahr 2021 wird der Wert für die Richtwerte deutlich runtergesetzt und führt einen Tagesmittelwert auf. Der Informationsschwellen Wert für Stickstoffdioxid liegt bei $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für den Stundenmittelwert und gilt für eine Überschreitung dieses Wertes. Der Alarmschwellenwert liegt bei $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für den Stundenmittelwert und gilt für Überschreitungen bei drei aufeinanderfolgenden Stunden (Umweltbundesamt 2024b).

Tabelle 2: Grenzwerte für Stickoxide

	Jahresmittelwert [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Tagesmittelwert [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Stundenmittelwert [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
WHO-Guideline 2005	40	-	
Richtlinie 2008/50/EG 39. BImSchV	40	-	200 18 Überschreitungen
WHO-Guideline 2021	10	25 3-4 Überschreitungen	-
Neue Richtlinie 2008/50/EG	20	50 18 Überschreitungen	200 3 Überschreitungen

2.1.5 Ozon

Ozon O_3 ist ein sehr instabiles Molekül, welches aus drei Sauerstoffatomen besteht, und ein starkes Oxidationsmittel. Das Molekül wird als ein sekundärer Schadstoff eingestuft, weil es aus Vorläuferschadstoffen entsteht, dabei wird nur auf das Ozon eingegangen, welches in Bodennähe, der Troposphäre (bis zu 10 km über den Boden), gebildet wird (Deutscher Wetterdienst). Durch komplexe photochemische Prozesse kann Ozon entstehen. Zur Bildung von Ozon wird neben den Vorläuferschadstoffen Stickoxide und flüchtige organische Verbindungen, die hauptsächlich aus anthropogenen Prozessen entstehen, auch intensive Sonneneinstrahlung benötigt. Die Stickoxide entstehen dabei hauptsächlich im Verkehrssektor und die flüchtigen organischen Verbindungen stammen hauptsächlich aus Lösungsmitteln (Umweltbundesamt 2022b). Ozon kann durch die Reaktion mit Stickstoffmonoxid, welches in hohen Konzentrationen in Ballungsräumen vorhanden ist, abgebaut werden. Durch vorhandenes Stickstoffdioxid und UV-Strahlung kann Ozon jedoch wieder entstehen.

Das Molekül weist eine vergleichsweise lange Lebensdauer auf und kann auch über lange Strecken transportiert werden. Außerdem kann es vorkommen, dass Ozon aus der Stratosphäre in bodennahe Gebiete absinken kann.

Da die Vorläuferschadstoffe oftmals aus den urbanen Bereichen beispielsweise durch Wind rausgetragen werden, gibt es die meisten Überschreitungen der Ozongrenzwerte bei den ländlichen Hintergrundstationen. Dennoch weisen die städtischen und ländlichen Messstationen jedes Jahr mindestens einmal pro Jahr die Überschreitung der Grenzwerte auf (Tim Butler et al. 2020).

Aufgrund der oxidierenden Wirkung ist das Molekül Ozon giftig für den Menschen. Das Einatmen kann zu einer verminderten Lungenfunktion und Atemwegsbeschwerden führen. Durch Vorerkrankungen wie Asthma belastete Personen sind anfälliger für Beschwerden durch die Exposition von Ozon. Außerdem können sich die negativen Auswirkungen bei einem erhöhten Lungenvolumen, welches sich durch Anstrengung erhöht, verstärken. Da das Molekül sehr reaktionsfreudig ist, steht es im Verdacht krebserregend für den Menschen zu sein (Umweltbundesamt 2022b).

Die Grenzwerte für Ozon sind in der 39. Bundesimmissionsschutzverordnung verankert. Seit dem Jahr 2010 gibt es den europaweiten Zielwert von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als acht Stunden Mittelwert, welcher nicht mehr als 25-mal überschritten werden darf gemittelt über drei Jahre. Des Weiteren gibt es den Informationsschwellwert mit $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei dem die Medien dazu angehalten sind, Verhaltensempfehlungen an die Bevölkerung auszugeben. Der letzte Wert ist die Alarmschwelle bei $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Umweltbundesamt 2024b).

2.1.6 VOC

Unter flüchtigen organischen Verbindungen (*volatile organic compounds*, VOC) sind verschiedenste gas- und dampfförmige Stoffe aus einem organischen Ursprung zusammengefasst. Beispiele für VOC sind Kohlenwasserstoffe, Alkohole und organische Säuren. Die Quellen für VOC können in Außen- und Innenbereiche eingeteilt werden, wobei der Innenbereich einen weitaus größeren Anteil an den Emissionen einnimmt.

Im Außenbereich werden die Quellen zwischen biologischen und anthropogenen unterschieden. Biologische Quellen sind zum Beispiel die Stoffwechselprozesse einer Pflanze. Dabei sind die urbanen Grünflächen, wie Parks, die Hauptquelle in den Ballungsräumen. Der Anteil der anthropogenen Quellen ist in Ballungsgebieten deutlich höher als jener der biologischen Quellen. Im Allgemeinen entstehen die VOCs aus anthropogenen Quellen durch unvollständige Verbrennungen wie bei Kraftverkehrsabgasen, welche auch die Hauptquelle sind. Doch auch industrielle und gewerbliche Vorgänge können VOC-Emissionen freisetzen (Umweltbundesamt 2016).

In der freien Umgebung können die VOCs durch das in der Atmosphäre vorkommende Ozon und NO_3 oxidiert werden. Die dabei entstehenden Produkte sind meistens nicht mehr so flüchtig. Innerhalb der Städte kann es zu großen Unterschieden in der Konzentration der VOCs kommen. Dies wird durch die bauliche Struktur und sich bildende Wärmeinseln bedingt (Saarikoski et al. 2023).

Die Exposition mit VOCs kann Menschen und Umwelt gefährden. Die VOCs greifen beim Menschen vor allem die Lunge an, weil sie durch die Atemluft aufgenommen werden, wobei eine Exposition von Übelkeit und Kopfschmerzen bis zu Lungenerkrankungen und Asthma führen kann (Zhao et al. 2019).

2.1.7 Lärm

Geräusche sind Schallwellen, welche sich durch Schwingungen ausbreiten, die mit der Einheit Dezibel (dB) angegeben werden. Lärm wird als unerwünschte laute Geräusche definiert und wird subjektiv wahrgenommen (BMUV 2014).

In der 16. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) sind Immissionsgrenzwerte für den Straßenverkehrslärm festgelegt worden. Unterschieden werden die Grenzwerte nach Tages- und Nachtzeit sowie verschiedenster Nachbarschaften.

Tabelle 3: Immissionsgrenzwerte für Verkehrsgeräusche in verschiedenen Nachbarschaften (16. BIm-SchV)

	Tag [dB]	Nacht [dB]
Krankenhäuser, Schulen, Kurheime, Altenheime	57	47
Reine und allgemeine Wohnge- biete, Kleinsiedlungsgebiete	59	49
Kerngebiete, Dorfgebiete, Mischgebiete, urbane Gebiete	64	54
Gewerbegebiete	69	59

Der Straßenverkehr ist in Deutschland die dominierende Quelle für den Lärm, dabei wird der Straßenverkehrslärm von Fahrzeugen auf öffentlichen Straßen verursacht. Wie laut der Straßenverkehr ist, hängt von mehreren Faktoren ab. Das unterschiedliche Verhalten der Fahrzeugführer kann zu einer Reduktion des Lärms führen. Außerdem wirken die technische Ausstattung der Fahrzeuge und der Straßenbelag auf den Lärm ein. Tagsüber sind ca. 2,3 Millionen Menschen täglich einem Pegel von über 65 dB ausgesetzt, welches die Immissionsgrenzwerte überschreitet, außer innerhalb von Gewerbegebieten. Über die Nacht hinweg sind es 2,6 Millionen Menschen, die einem Pegel von über 55 dB ausgesetzt sind. Bei der Beeinträchtigung durch Lärm hat neben dem Pegel des Lärms auch die Dauer des Lärms negative Auswirkungen auf den Menschen. Durch den Lärm können psychische und soziale Beeinträchtigungen des Wohlbefindens auftreten (Umweltbundesamt 2022c).

Für eine Feststellung der Lärmquellen sollen Lärmkarten und daraus resultierend Lärmaktionspläne erstellt werden. Dabei werden die Grundsätze vermeiden, vermindern und ausgleichen angewendet. Die Lärmkarten basieren auf der Umgebungslärmrichtlinie. Diese Karten müssen unter anderem in Gebieten erstellt werden, die über 100.000 Einwohner haben. Dabei werden die Belastungen durch den Lärm tagsüber und nachts aufgezeichnet. Aufgrund der Lärmkarten werden dann die Aktionspläne

erstellt. In diesen werden die Lärmprobleme und Lärmauswirkungen reguliert. Darin gibt es konkrete Maßnahmen, um eine Lärminderung zu erreichen.

2.2 Elektrotechnische Bauteile

In den nächsten Kapiteln werden elektronischen Bauteile für den Bau des Messgerätes mit den Funktionsweisen und den technischen Daten vorgestellt.

2.2.1 ESP32 NodeMCU Development Board

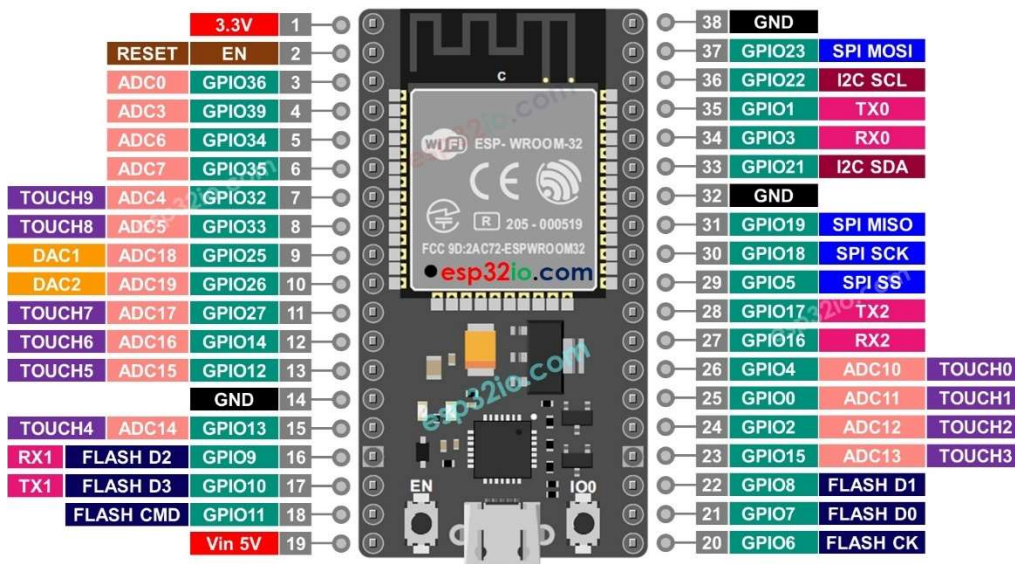
Dieser ESP32 Microcontroller basiert auf dem Espressif ESP32/ESP-Wroom-32 und ist ein Opensource-Entwicklungsboard, dass durch seine leichte Handhabung gut für Anfänger geeignet ist (Abbildung 5). Auf dem Board ist ein Modul mit WLAN- und Bluetooth-Funktion verbaut. Die Schnittstellen SPI, I²C und UART sind auf dem Board zu finden und außerdem die Spezialfunktionen ADC und PWM (Abbildung 6) (berrybase 2024b). In der nachfolgenden Tabelle 4 sind die wichtigsten technischen Daten des ESP32 aufgeführt.

Tabelle 4: technische Daten ESP32 (Espressif Systems 2023)

Parameter	Technische Daten
Anzahl Pins	38
Versorgungsspannung	3,3 V
Betriebsstrom	80 mA
Schnittstellen	SPI, I ² C, UART, PWM, ADC
Betriebstemperatur	-40 – 85 °C
Preis	Ca. 7 € (berrybase 2024b)



Abbildung 5: Microcontroller ESP32 (eigenes Foto).



2.2.2 Feinstaubsensor HM3301

Mit dem Feinstaubsensor HM3301 der Firma Seed ist es möglich kontinuierlich Echtzeitmesswerte zu ermitteln (Abbildung 7).



Abbildung 7: Feinstaubsensor HM3301 (eigenes Foto).

Der Sensor funktioniert nach der Mie-Streuungstheorie, die besagt, dass wenn Licht durch einen Partikel geht, welcher größer als die Wellenlänge des Lichtes ist, wird dieses Licht an dem Partikel gestreut. Dieses Licht wird auf einer hochempfindlichen Fotodiode geleitet und anschließend mit Hilfe von mathematischen Modellen als Zählkonzentration und Massenkonzentration der Staubpartikel dargestellt. Im Gegensatz zu anderen Sensoren wird in diesem Fall eine Lüftung benutzt, um die Luft mit den Staubpartikeln in die Probenkammer zu bringen (Abbildung 8) (Seed Studio 2024).

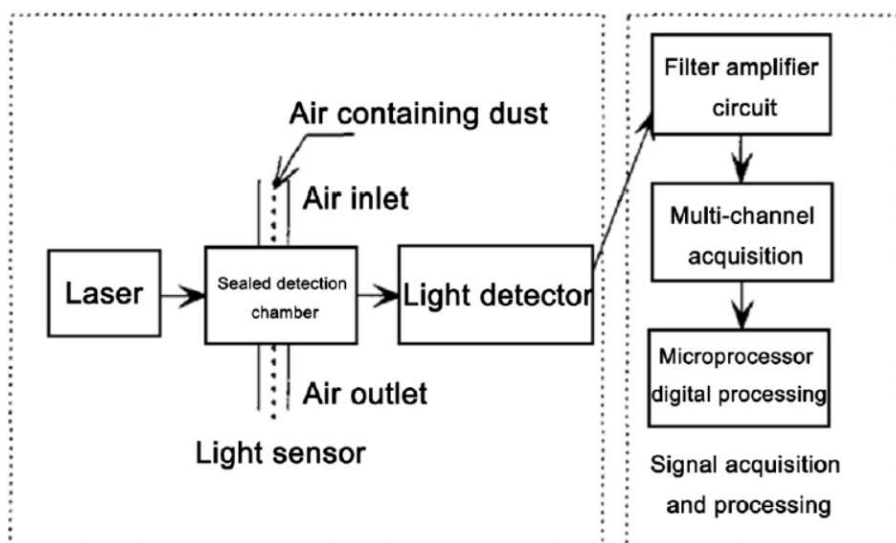


Abbildung 8: Aufbau des Feinstaubsensors HM3301 (Seed Studio 2024).

In der nachfolgenden Tabelle 5 sind die wichtigsten technischen Daten zu dem Feinstaubsensor HM3301 aufgelistet.

Tabelle 5: technische Daten Feinstaubsensor HM3301 (joy-it 2022)

Parameter	Technische Daten
Partikelgröße	3 Kanäle 2,5 μm , 5 μm , 10 μm
Messbereich	1 – 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Versorgungsspannung	3,3 V / 5 V
Schnittstelle	I ² C
Auflösung	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Anlaufzeit	30 sek
Betriebstemperatur	-10 – 60°C
Betriebsfeuchtigkeit	10 – 90%
Preis	Ca. 30 € (berrybase 2024d)

2.2.3 Kohlenstoffdioxidsensor MH-Z19C

Der Kohlenstoffdioxidsensor MH-Z19C ist dazu fähig mittels der nichtdispersiven Infrarot Gasmessung CO₂ zu messen (Abbildung 9) (Winsen 2020).

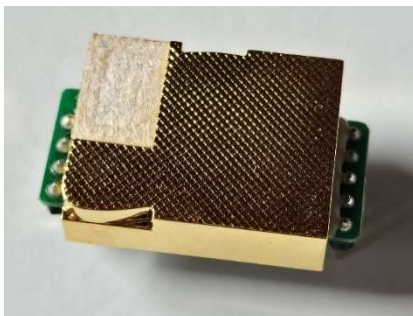


Abbildung 9: Kohlenstoffdioxidsensor MH-Z19C (eigenes Foto).

Die Kohlenstoffdioxidmoleküle sind dazu fähig Licht zu absorbieren, dabei hat jeder Molekültyp einen speziellen Absorptionsfingerabdruck. In dem Sensor sind ein Infrarot-Strahler, eine Probenkammer in Form einer Gasküvette, optische Wellenlängenfilter und ein Infrarot-Detektor verbaut. Das Infrarotlicht wird auf die Probenkammer mit der zu beprobenden Luft gestrahlt. Die Gasmoleküle absorbieren das Infrarotlicht und anhand der Absorptionsstärke kann auf die Konzentration des Kohlenstoffdioxids geschlossen werden. Das resultierende Infrarotlicht wird am Ende auf dem Detektor gemessen. Der optische Filter sorgt dafür, dass alle anderen Wellenlängen eliminiert werden außer die des Infrarotlicht. Für ein Referenzsignal gibt es einen Weg ohne Gas. Am Ende gibt die Lichtstärke auf den Detektoren eine inverse Beziehung zu der Gaskonzentration an (Werner Hagedorn 2024).

In der Tabelle 6 sind die wichtigsten technischen Daten des Kohlenstoffdioxidsensors MH-Z19C aufgeführt.

Tabelle 6: technische Daten des Kohlenstoffdioxidsensors MH-Z19C (Winsen 2020)

Parameter	Technische Daten
Messbereich	400 – 5000 ppm
Versorgungsspannung	5 V
Schnittstelle	UART, PWM
Durchschnittsstrom	< 40 mA
Aufheizzeit	1 min
Reaktionszeit	< 120s
Betriebstemperatur	-10 – 50 °C
Preis	Ca. 20 € (berrybase 2024c)

2.2.4 Multisensor BME680

Der Multisensor BME680 kann Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck und VOC messen. Der Sensor weist eine hohe Linearität und Genauigkeit auf. Er wurde speziell für mobile Anwendungen entwickelt (Abbildung 10) (berrybase 2024a).

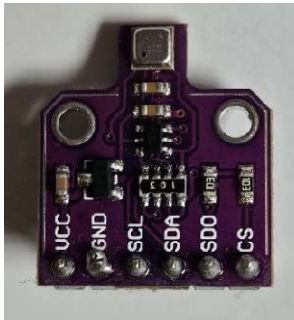


Abbildung 10: Multisensor BME680 (eigenes Foto).

In der nachfolgenden Tabelle 7 sind die wichtigsten technischen Daten dargestellt.

Tabelle 7: technische Daten des Multisensors BME680 (Bosch 2019)

Parameter	Technische Daten
Messbereich	Druck: 300 – 1100 hPa Feuchtigkeit: 0 – 100 % Temperatur: -40 – 85 °C
Versorgungsspannung	1,2 – 3,6 V
Schnittstelle	I ² C, SPI
<u>Gas Sensor</u>	
Reaktionszeit	< 1 s
Stromversorgung	< 0,1 ms
Genauigkeit	± 1 °C
<u>Feuchtigkeitssensor</u>	
Reaktionszeit	8 s
Genauigkeit	± 3 %
<u>Drucksensor</u>	
Genauigkeit	± 1 hPa
Preis	Ca. 15 € (berrybase 2024a)

2.2.5 ESP8266 STM-32 Arduino SPI Kartenleser 3,3V

Das microSD-Modul mit der SPI-Schnittstelle ist ein Kartenleser, welcher mit 3,3 V betrieben wird und dafür zuständig ist eine microSD-Card zu verwalten (Abbildung 11). Dieses Modul kostet ca. 2 € (androegg 2024).

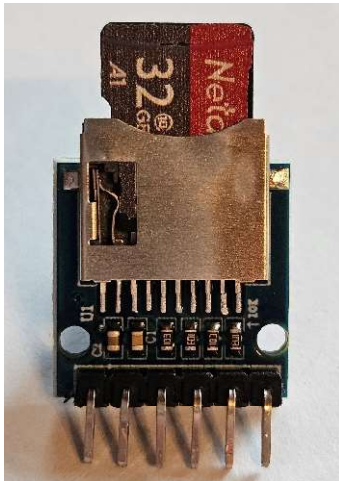


Abbildung 11: microSDCard-Modul (eigenes Foto).

2.2.6 U-blox NEO-6M GPS TTL Empfänger inkl. Antenne

Dieses GPS-Modul besteht aus dem Modul selbst, dem Empfänger und einer Keramik-Antenne (Abbildung 12). Mit der Kombination aus dem Empfänger und der Antenne lassen sich GPS-Koordinaten, Geschwindigkeit und die Zeit ermitteln. Die Antenne empfängt dabei Signale von Satelliten und der Empfänger wandelt die Signale in ein elektronisches Signal um. Das Modul wird mit 3,3 V betrieben und kostet ca. 7 € (ber-rybase 2024e).



Abbildung 12: GPS Modul (eigenes Foto).

2.3 OpenBikeSensor

Trotz des gesetzlich vorgeschriebenen Mindestabstands von 1,5 m im städtischen Bereich beim Überholen von Fahrradfahrern sieht die reale Version meistens anders aus. Grund für das zu enge Überholen von Autos gegenüber Fahrradfahrern ist meistens die Situation vor Ort. Autos haben gar nicht die Platzverhältnisse, um mit ausreichend Abstand zu überholen. Für die Forschung zu diesem Problem wurde der OpenBikeSensor entwickelt. Mit diesem Gerät kann während der Fahrt der Abstand von überholenden Autos gemessen werden. Die Abstandswerte werden während der Fahrt auf einem kleinen Display, welcher am Lenker angebracht ist, angezeigt. Die während der Fahrt gesammelten Daten können anschließend auf das Portal des OpenBikeSensors hochgeladen werden. In diesem werden der gefahrene Weg und die Gefahrezonen gekennzeichnet. Das ganze Projekt ist als ein Opensourceprojekt aufgebaut, sodass jede Person die Interesse hat mit der online verfügbaren Bauanleitung ihr eigenes Gerät bauen kann. Durch das Sammeln von vielen Daten können am Ende aussagekräftige Aussagen gemacht werden.

2.4 Statistik

Für die Berechnung der Mittelwerte μ wird folgende Gleichung (1) mit x_i für die Messwerte und n_i für die Anzahl der Messwerte verwendet.

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i \cdot n_i)}{n_{\text{ges}}} \quad (1)$$

Die Häufigkeit p_i wird mit folgender Gleichung (2) berechnet.

$$p_i = \frac{n_i}{n_{\text{ges}}} \quad (2)$$

Die Standardabweichung σ wird mit der folgenden Gleichung (3) berechnet.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \cdot p_i} \quad (3)$$

3 Elektronische Zusammensetzung

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie sich das Messgerät zusammensetzt und wie es anschließend zusammengebaut werden kann.

3.1 Schaltplan

In Abbildung 13 ist der Schaltplan für das Messgerät dargestellt. Die Tabelle 8 zeigt die nötigen Pinverbindungen.

Tabelle 8: Pinverbindungen der Komponenten

Komponente		MCU ESP32
HM3301	GND	GND
	VCC	3,3 V
	SDA	G21
	SCL	G22
MH-Z19C	PWM	G35
	GND	GND
	VCC	5 V
GPS-Modul	GND	GND
	VCC	3,3 V
	TX	G16
	RX	G17
SDCard-Modul	GND	GND
	MISO	G19
	CLK	G18
	MOSI	G23
	CS	G5
	VCC	5 V
BME680	VCC	3,3 V
	GND	GND
	SCL	G22
	SDA	G21

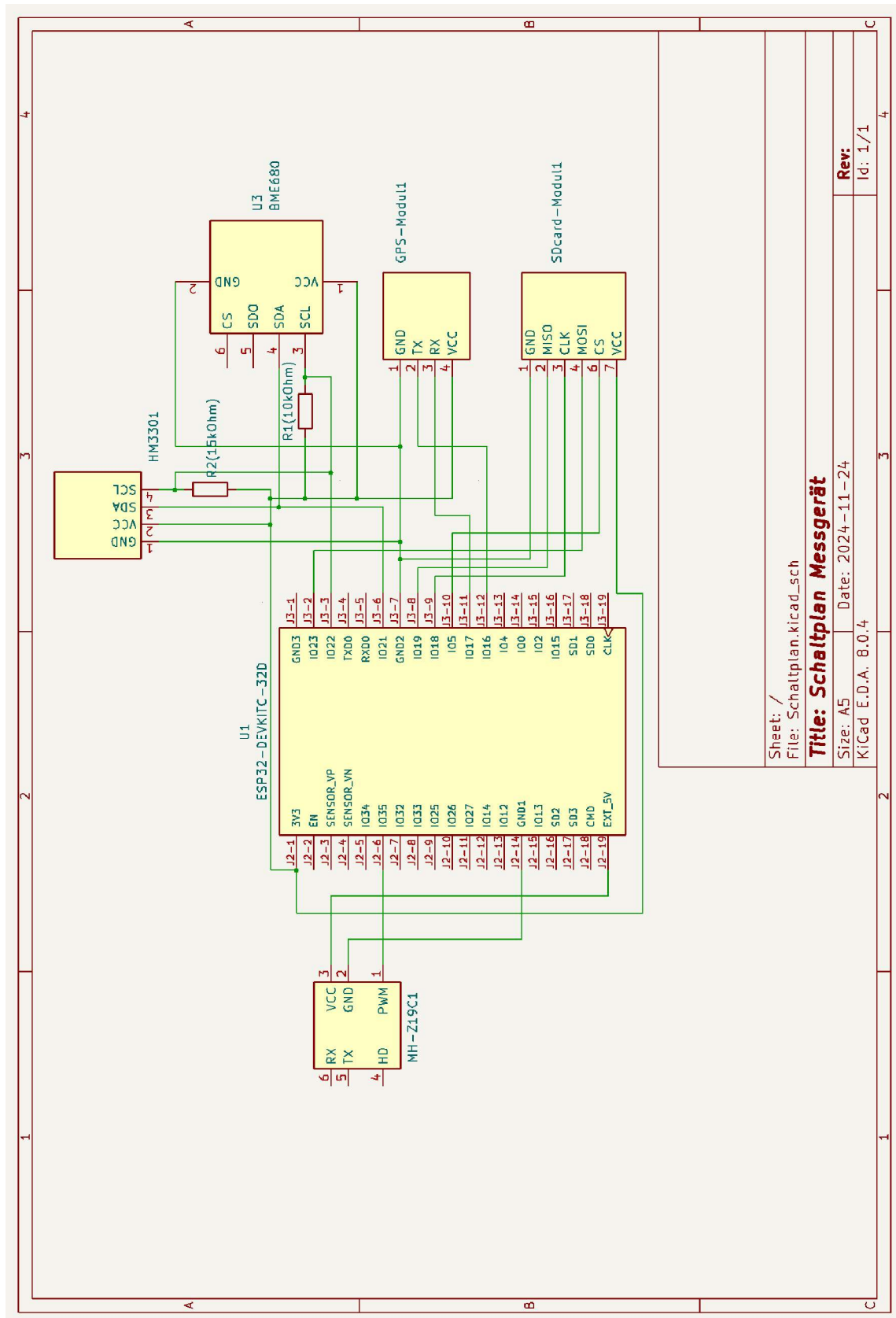


Abbildung 13: Schaltplan für die Verbindungen des Gerätes.

3.2 Bauanleitung

Für den Bau des Messgerätes werden zusätzlich zu den im Kapitel 2.3 beschriebenen Bauteilen folgende Teile beziehungsweise Werkzeuge benötigt.

Bauteile:

- Stift- bzw. Buchsenleiste
- Lochplatine
- Jumperkabel passend zu den Stift- bzw. Buchsenleisten
- Widerstände (10 k Ω und 15 k Ω)
- Abstandshalter
- Powerbank
- microUSB auf USB Kabel

Werkzeuge:

- Lötkolben
- Lötzinn
- Seitenschneider
- Zange
- Pfeile
- Akkuschauber

Vor dem Auflöten der verschiedenen Bauteile auf die Lochplatine müssen die Löcher für die Abstandshalter für den Microcontroller gebohrt werden. Dafür wird der Microcontroller auf die Lochplatine gelegt und die Stellen für die Halterung markiert. Anschließend können die markierten Löcher mit einem Akkuschauber und einem 2,5 Bohrer vorsichtig aufgebohrt werden.

Damit die Sensoren mit dem Microcontroller verbunden werden können, müssen die Stift- bzw. Buchsenleisten auf die Lochplatine mit verschiedenen Anzahlen der Stifte bzw. Buchsen gelötet werden.

Ob eine Stift- oder Buchsenleiste gewählt wird, hängt von den Jumperkabeln ab. Benötigt werden folgende Varianten der Leisten:

- 1x 7 Stifte oder Buchsen für die 3,3 V Spannungsversorgung
- 1x 5 Stifte oder Buchsen für die Erdung der 3,3 V Spannungsversorgung
- 2x 3 Stifte oder Buchsen für die I²C Verbindung der Anschlüsse SCL und SDA
- 2x 2 Stifte oder Buchsen für die 5 V Spannungsversorgung und die Erdung

Zusätzlich werden auf die Lochplatine die Pull-Up-Widerstände für den Feinstaubsensor und den Temperatursensor gelötet. Die Widerstände müssen mit der Stift- bzw. Buchsenleiste der 3,3 V Spannungsversorgung und einem der beiden Leisten mit den drei Stiften oder Buchsen verbunden werden (Abbildung 14). Beim Auflöten der Leisten und Widerstände ist darauf zu achten, dass genug Abstand zu den gebohrten Löchern vorhanden ist, da die Abstandhalter ansonsten nicht angebracht werden können.

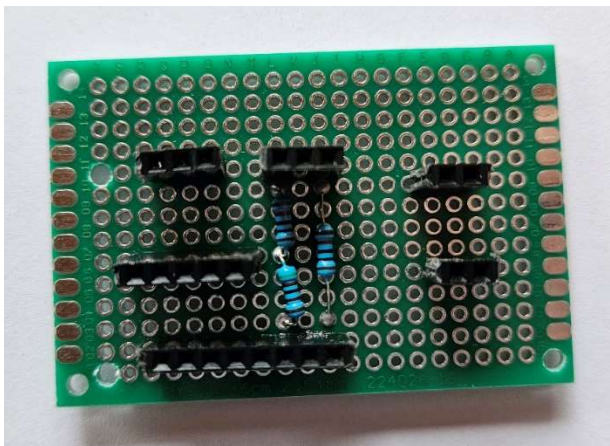


Abbildung 14: mögliche Platzierung der Stift- bzw. Buchsenleiste (eigenes Foto).

Nachdem alles auf der Lochplatine verlötet ist, kann der Microcontroller mit der Lochplatine mittels der Abstandhalter verbunden werden. Anschließend können die Sensoren gemäß dem Schaltplan an die Lochplatine und den Microcontroller angebracht werden (Abbildung 15). Am Ende kann dem Microcontroller mit der Powerbank verbunden werden.

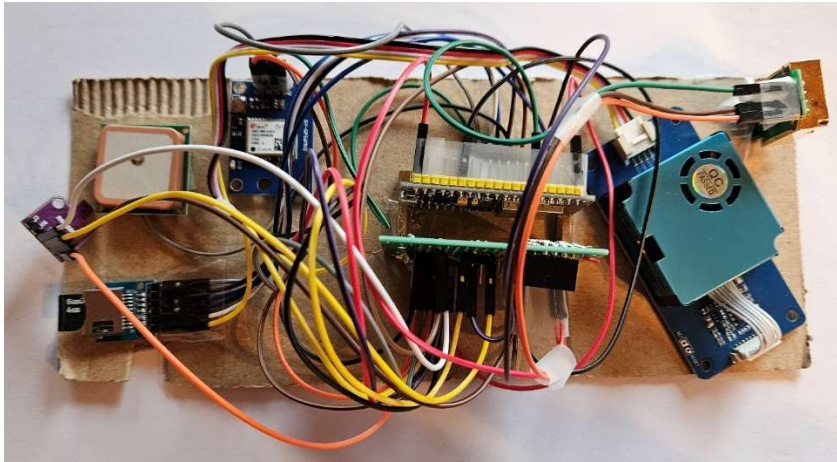


Abbildung 15: fertige Verkabelung des Messgerätes (eigenes Foto).

Zum Schutz vor Regen und anderen Umwelteinwirkungen wird das Modul in einem Rohr untergebracht (Abbildung 19).

3.3 Programmcode

Der Programmcode für das Modul zur Messung von Feinstaub und Kohlenstoffdioxid wurde mit der Arduino IDE in der Programmiersprache C++ geschrieben. Der vollständige Programmcode ist im Anhang zu finden.

Innerhalb der Arduinoplattform gibt es Bibliotheken für die Nutzung von verschiedenen Sensoren. Folgende Bibliotheken wurden genutzt:

- SD von Arduino, SparkFun in der Version 1.3.0 für die Nutzung des MicroSDCard-Moduls
- Adafruit BME680 Library von Adafruit in der Version 2.0.4 für die Nutzung des Multisensors BME680
- Grove – Laser PM2,5 Sensor HM3301 von Seed Studio in der Version 1.0.0 für die Nutzung des Feinstaubsensors HM3301
- TinyGPSPlus von Mikal Hart in der Version 1.0.3 für die Nutzung des GPS-Moduls

4 Messungen

Im folgenden Kapitel wird die Durchführung der Kalibrierung sowie der Messfahrten genauer beschrieben.

4.1 Kalibrierung der Messwerte

In diesem Unterkapitel wird die Durchführung der Kalibrierung für den Kohlenstoffdioxidsensor sowie den Feinstaubsensor dargestellt.

4.1.1 Kohlenstoffdioxidsensor MH-Z19C

Der Kohlenstoffdioxidsensor MH-Z19C hat eine eingebaute Nullkalibrierung. Dafür muss der Sensor für ungefähr 20 min in einen gut gelüfteten Raum gelegt werden. Anschließend werden der HD-Pin und der Ground-Pin mittels eines Jumperkabels miteinander für ca. 7 Sekunden verbunden. Die nun ermittelten Werte nimmt der Sensor als Nulllinie.

4.1.2 Feinstaubsensor HM3301

Der Feinstaubsensor hat keine eingebaute eigene Kalibrierung. Für die Kontrolle der Messwerte wurde der Sensor an eine offizielle Messstation in Braunschweig gehängt und anschließend wurden die ermittelten Werte verglichen.

Die Messstelle DENIO75 Braunschweig (städtisch, verkehrsnah) liegt in Braunschweig in dem Altewiekring nahe der Abzweigung zu der Bergstraße (Abbildung 16). Die Messstelle ist ein Teil der Luftüberwachung des Staatlichen Gewerbeaufsichtsamts Hildesheim. Mit der Messstation werden unterschiedlichste Luftschadstoffe gemessen, darunter auch PM_{2,5} und PM₁₀.

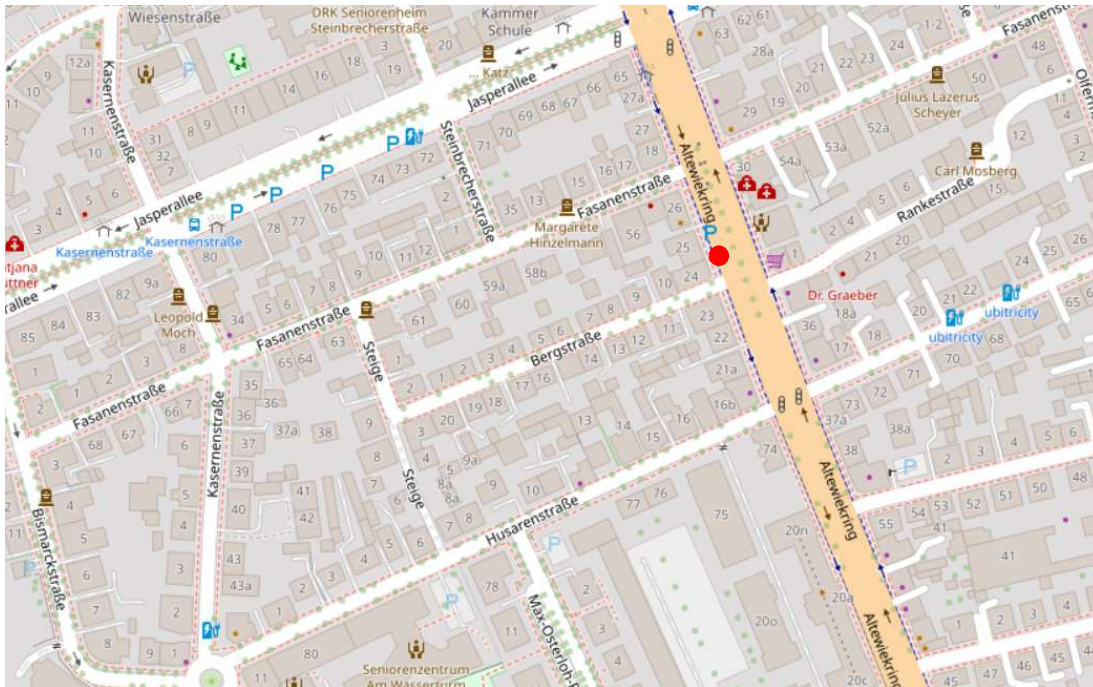


Abbildung 16: Standort der Messstelle DENIO75 Braunschweig, städtisch, verkehrsnah (openstreet-map).

Für die erste Messung wurden die Geräte direkt an die Messstation gehängt, um möglichst gleiche Bedingungen zu schaffen (Abbildung 17). Die beiden Geräte wurden am 26.09.2024 das erste Mal von 09:00 Uhr bis 12:30 Uhr aufgehängt und anschließend zur Wiederholung von 12:48 Uhr bis 15:19 Uhr. Aufgrund von technischen Problemen hat das Gerät auf der rechten Seite im ersten Messzeitraum keine Werte aufgezeichnet. Im zweiten Messzeitraum ist die Powerbank des linken Gerätes nach ca. 10 min ausgegangen, weswegen keine Werte aufgezeichnet wurden.



Abbildung 17: Messstation mit den Geräten am Geländer (eigenes Foto)

Aufgrund von nicht aussagekräftigen Messwerten wurde eine kürzere zweite Messung am 28.10.2024 vorgenommen. Dabei wurden die Geräte neben der Messstation für ca. 45 min auf dem Elektrokasten angebracht (Abbildung 18).



Abbildung 18: Messstation mit den Geräten auf dem Elektrokasten (eigenes Foto)

4.2 Durchführung Messfahrten

Für die Messfahrten mit dem Fahrrad wurde das Gerät auf dem Gepäckträger des Fahrrades befestigt (Abbildung 19) und anschließend unterschiedliche Routen im Landkreis Lüchow-Dannenberg befahren.



Abbildung 19: Gerät in dem Gehäuse auf dem Gepäckträger des Fahrrades (eigenes Foto).

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse der Kalibrierung und der Messfahrten dargestellt.

5.1 Kalibrierung

Die offizielle Messstation nimmt pro Minute jeweils einen Wert für PM_{2,5} und PM₁₀ auf. Das selbstgebaute Gerät nimmt jedoch ca. alle 10 Sekunden einen Wert auf. Für eine bessere Vergleichbarkeit wurde bei dem selbstgebauten Messgerät der erste aufgezeichnete Wert pro verwendet.

In Abbildung 20 sind die Messwerte für den ersten Messzeitraum für das selbstgebaute Messgerät HM3301 und der offiziellen Messstation MS dargestellt.

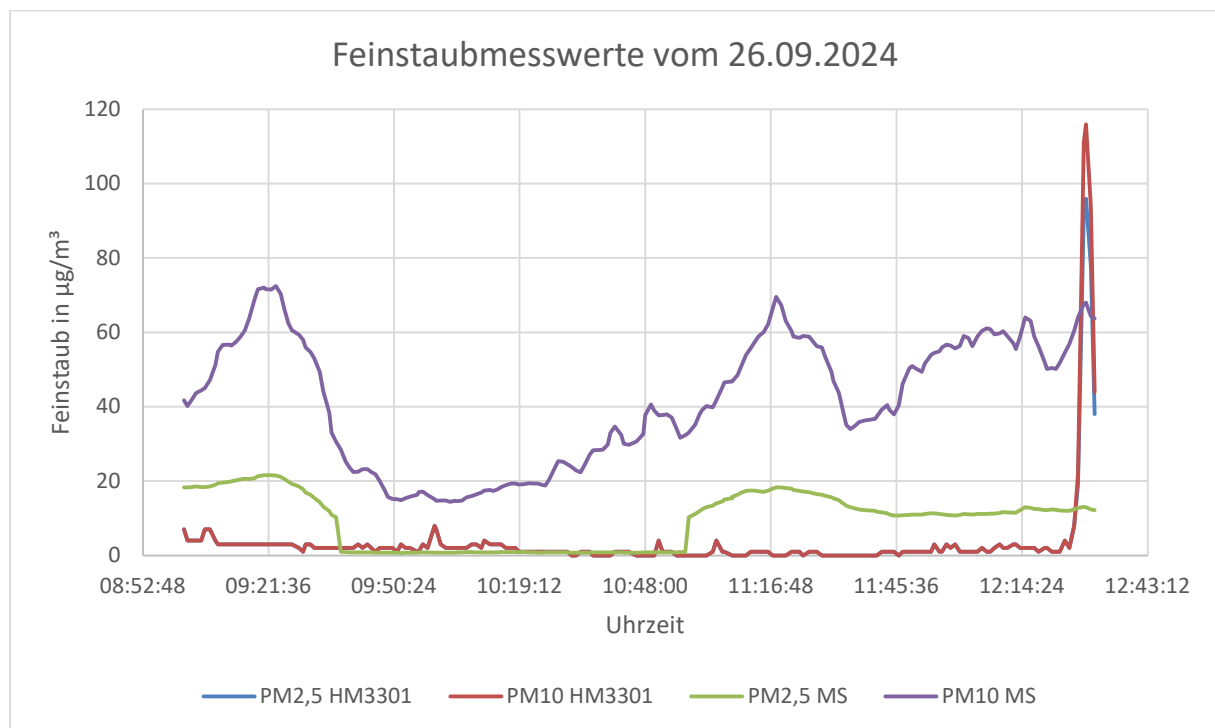


Abbildung 20: Feinstaubmesswerte vom 26.09.2024 des ersten Messzeitraumes.

In Abbildung 21 sind die Messwerte für den zweiten Messzeitraum für das selbstgebaute Messgerät HM3301 und der offiziellen Messstation MS dargestellt.

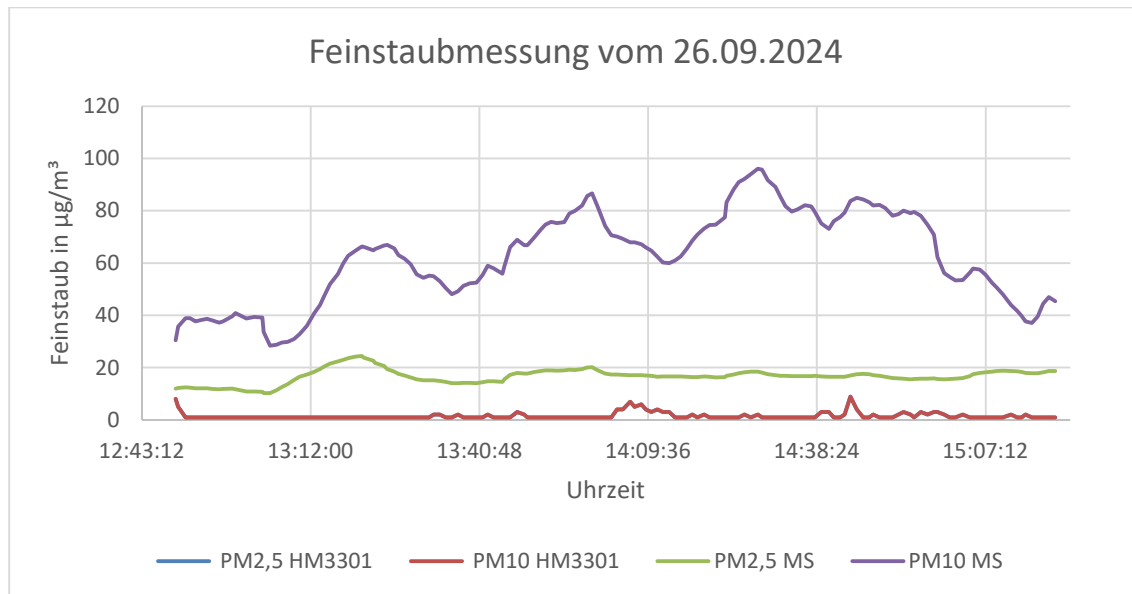


Abbildung 21: Feinstaubmesswerte vom 26.09.2024 des zweiten Messzeitraumes.

In Abbildung 22 sind die Messwerte vom 28.10.2024 für das selbstgebaute Messgerät, HM3301 und der offiziellen Messstation MS dargestellt.

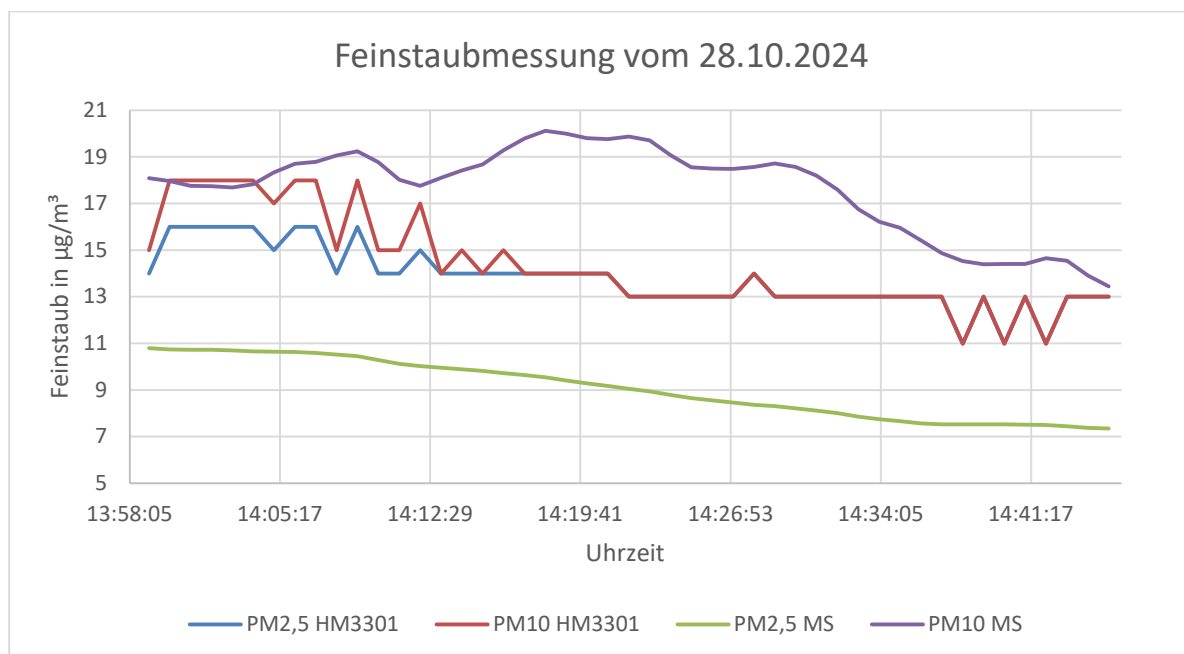


Abbildung 22: Feinstaubmesswerte vom 28.10.2024

Für den Messtag vom 26.09.2024 weichen die Messwerte vom Feinstaubsensor HM3301 deutlich von den Messwerten der offiziellen Messstation ab. Die Messwerte für PM10 vom Feinstaubsensor HM3301 liegen überwiegend unter den Messwerten für PM2,5 von der Messstation.

Die Unterschiede der Feinstaubmesswerte des selbstgebauten Messgerätes und der offiziellen Messstation bei der Messung am 28.10.2024 fallen geringer aus. Die Werte für PM2,5 vom Feinstaubsensor HM3301 liegen deutlich über den Werten der Messstation. Die Messwerte für PM2,5 des Feinstaubsensors HM3301 liegen zwischen $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit einem Mittelwert von $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und einer Standardabweichung von $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Für PM2,5 der Messstation liegen die Messwerte zwischen $7,35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $10,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit einem Mittelwert von $9,06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und einer Standardabweichung von $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die geringste Abweichung zwischen den Messwerten für PM2,5 des Feinstaubsensors H3301 und der Messstation liegt bei $3,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ was ca. einer Abweichung von 30 % entspricht. Die höchste Abweichung liegt bei $5,65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dies entspricht ca. 77 %. Die Werte des Feinstaubsensors HM3301 für PM10 haben jeweils am Anfang und Ende der Messung die geringste Abweichung. Für den Feinstaubsensor HM3301 liegen die Messwerte für PM10 zwischen $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit einem Mittelwert von $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und einer Standardabweichung von $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Für die Messstation liegen die Messwerte für PM10 zwischen $13,45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $20,13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit einem Mittelwert von $17,64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und einer Standardabweichung von $1,88 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die geringste Abweichung zwischen den beiden Messgeräten liegt bei $0,04 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dies entspricht ca. 0,24 %, und $6,87 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dies entspricht ca. 34,56 %.

5.2 Messfahrten

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der verschiedenen Messfahrten aufgezeigt. Hierbei werden nur die Abbildungen für Feinstaub und Kohlenstoffdioxid dargestellt. Die Tabellen mit allen Messwerten sind im Anhang zu finden.

5.2.1 Messfahrt vom 16.11.2024

Bei der Messfahrt vom 16.11.2024 wurde eine Strecke von ca. 9 km Länge über ein ländliches Gebiet und eine Bundesstraße befahren (Abbildung 23). Gestartet wurde die Strecke in Hitzacker, sie ging weiter über Seerau und Nienwedel und endete wieder in Hitzacker. Die Abbildung 24 und die Abbildung 25 zeigen die aufgenommenen Messwerte für Feinstaub und Kohlenstoffdioxid.

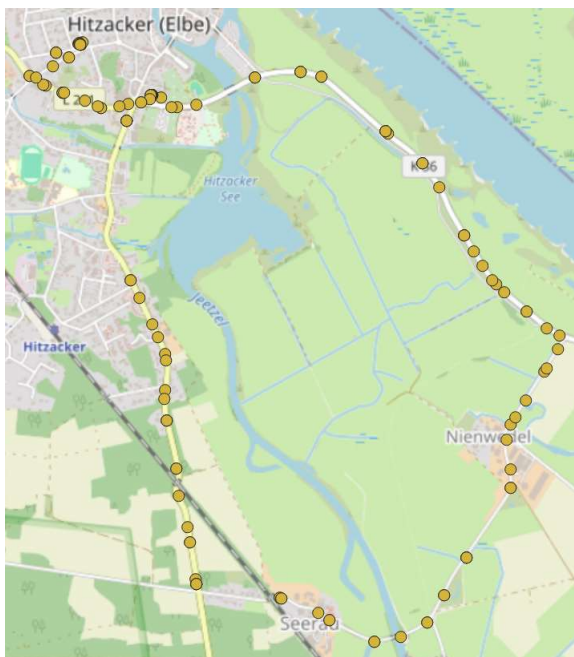


Abbildung 23: Fahrtstrecke der Messfahrt am 16.11.2024.

Bei der Messfahrt vom 16.11.2024 in einem ländlichen Gebiet liegen die Werte des Kohlenstoffdioxidsensors MH-Z19C bei $403,39 \pm 50$ ppm über den gesamten Fahrzeitraum, bis auf einen vermutlichen Ausreißer mit $398,41 \pm 50$ ppm. Der Mittelwert liegt bei $403,36 \pm 50$ ppm und die Standardabweichung bei $0,41$ ppm. Die Messwerte für PM_{1,0} liegen zwischen $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, der Mittelwert bei $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit einer

Standardabweichung von $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Mit einem Mittelwert von $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, einer Standardabweichung von $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ liegen die Messwerte für $\text{PM}_{2,5}$ zwischen $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Für PM_{10} liegen die Messwerte zwischen $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und der Mittelwert liegt bei $21,33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit einer Standardabweichung von $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

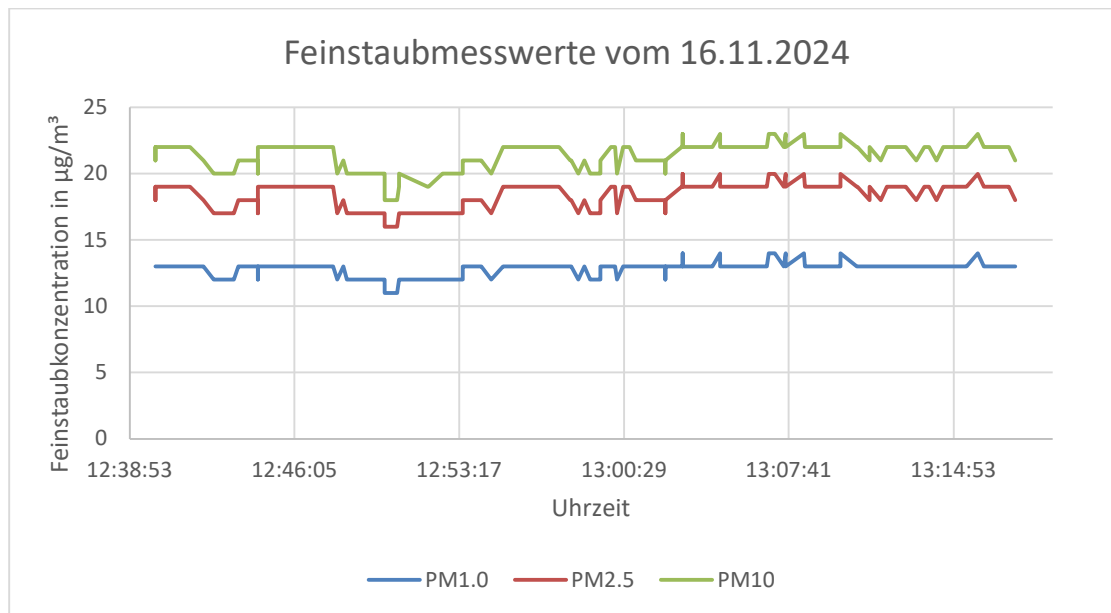


Abbildung 24: Feinstaubmesswerte vom 16.11.2024.

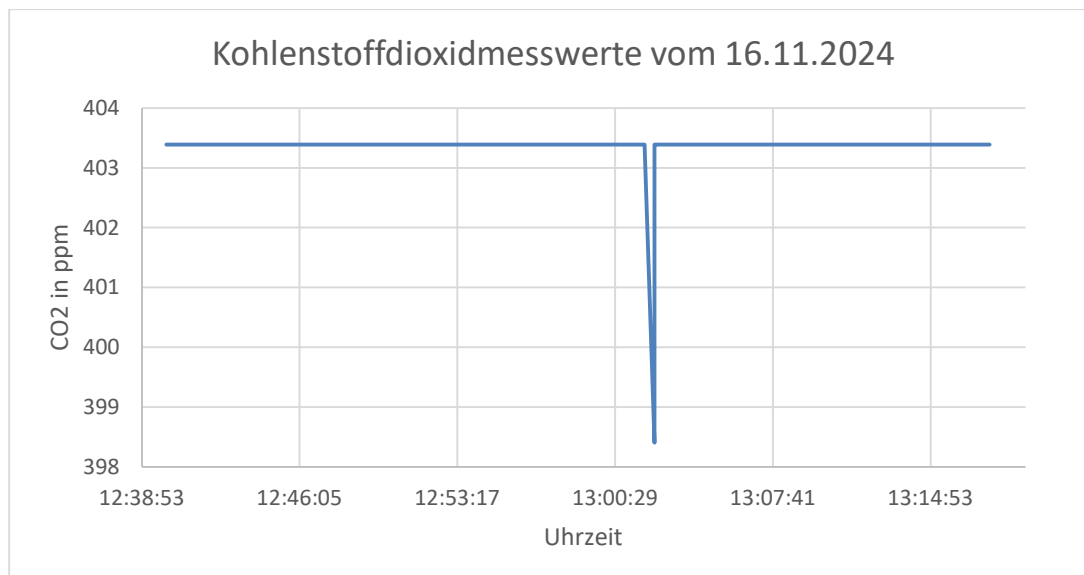


Abbildung 25: Kohlenstoffdioxidmesswerte vom 16.11.2024.

5.2.2 Messfahrt vom 17.11.2024

Die Messfahrt am 17.11.2024 führte durch Hitzacker entlang der beiden Hauptstraßen Lüneburger und Dannenberger Straße und misst eine Länge von ca. 4 km (Abbildung 26). Die Abbildung 27 und die Abbildung 28 stellen die Feinstaub- und Kohlenstoffmesswerte da.

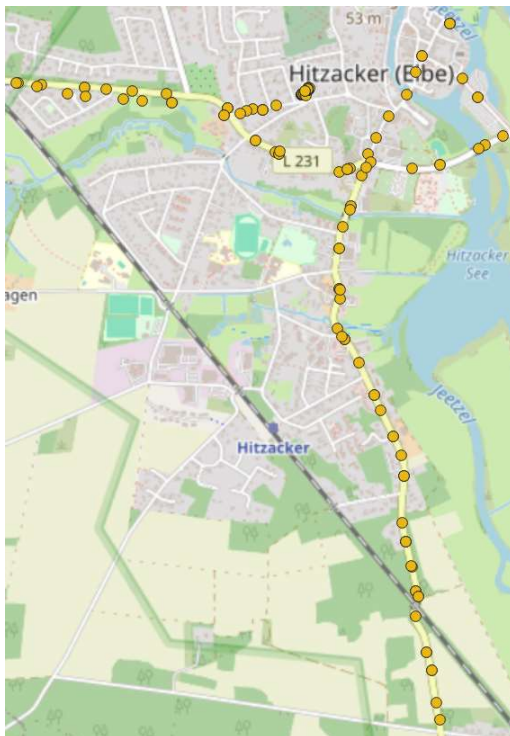


Abbildung 26: Fahrtstrecke der Messfahrt vom 17.11.2024.

Bei der Messfahrt vom 17.11.2024 wurde eine kürzere Strecke durch eine Kleinstadt gefahren. Die Kohlenstoffdioxidwerte des Sensors liegen überwiegend bei $408,37 \pm 50$ ppm mit einem Mittelwert von $408,82 \pm 50$ ppm und einer Standardabweichung von 49 ppm. Dabei liegt der Höchstwert bei $547,81 \pm 50$ ppm und der niedrigste Werte bei $403,39 \pm 50$ ppm. Es gibt zwei vermutliche Ausreißer mit 0 ppm bei der Messung. Der niedrigste Wert für Feinstaub liegt bei allen PM-Varianten bei $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Höchstwerte liegen für PM_{1,0} bei $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, für PM_{2,5} bei $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und für PM₁₀ bei $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Messwerte für PM_{2,5} und PM₁₀ sind fast über den gesamten Messbereich gleich. Für PM_{1,0} liegt der Mittelwert bei $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit einer Standardabwei-

chung von $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Der Mittelwert für $\text{PM}_{2,5}$ liegt bei $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit einer Standardabweichung von $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Bei PM_{10} liegt der Mittelwert bei $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und die Standardabweichung bei $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

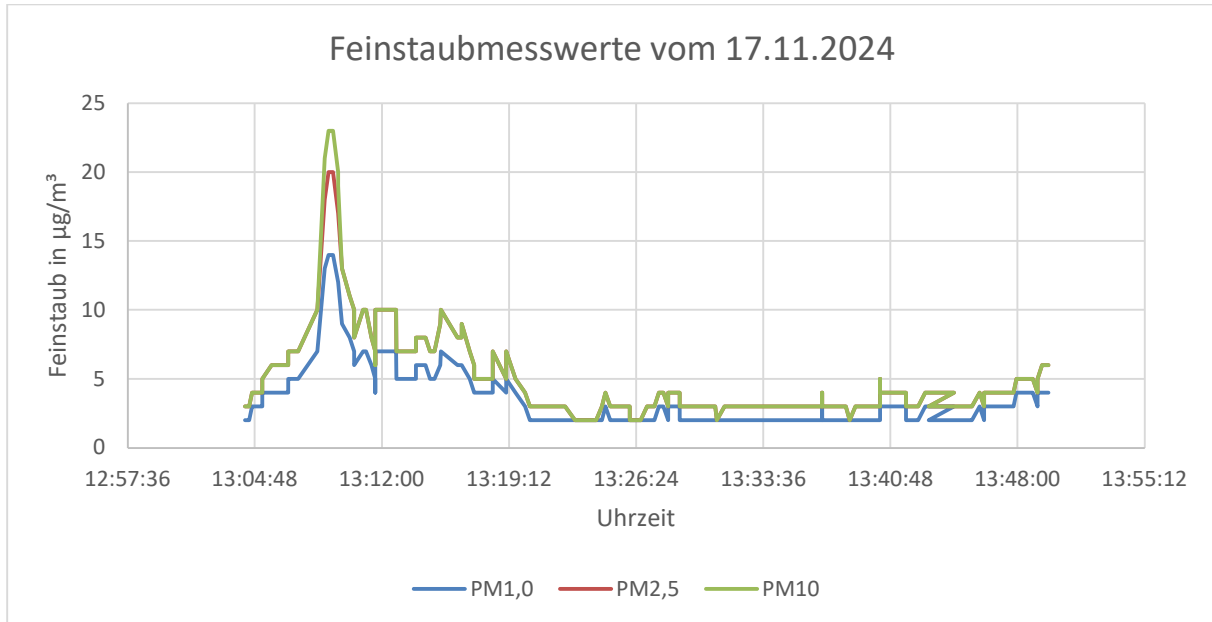


Abbildung 27: Feinstaubmesswerte vom 17.11.2024.

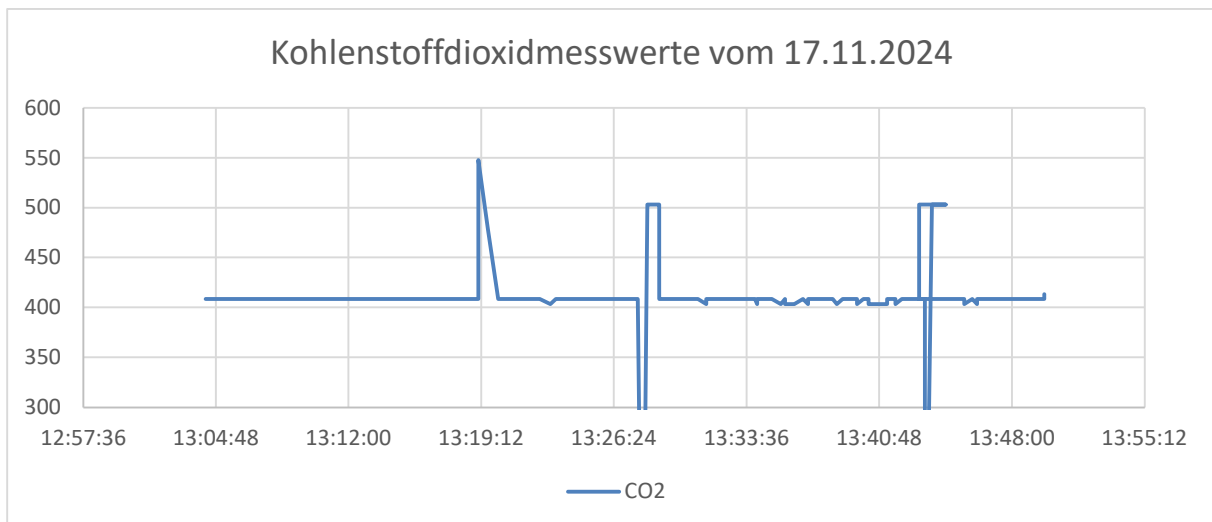


Abbildung 28: Kohlenstoffdioxidmesswerte vom 17.11.2024.

5.2.3 Messfahrt vom 18.11.2024

Bei der Messfahrt vom 18.11.2024 wurde eine Strecke von ca. 18 km Länge über ein ländliches Gebiet und einer Bundesstraße befahren (Abbildung 29). Gestartet wurde die Strecke in Hitzacker, sie ging weiter über Dannenberg und endete wieder in Hitzacker. Die Abbildung 30 und die Abbildung 31 zeigen die aufgenommenen Messwerte für Feinstaub und Kohlenstoffdioxid.

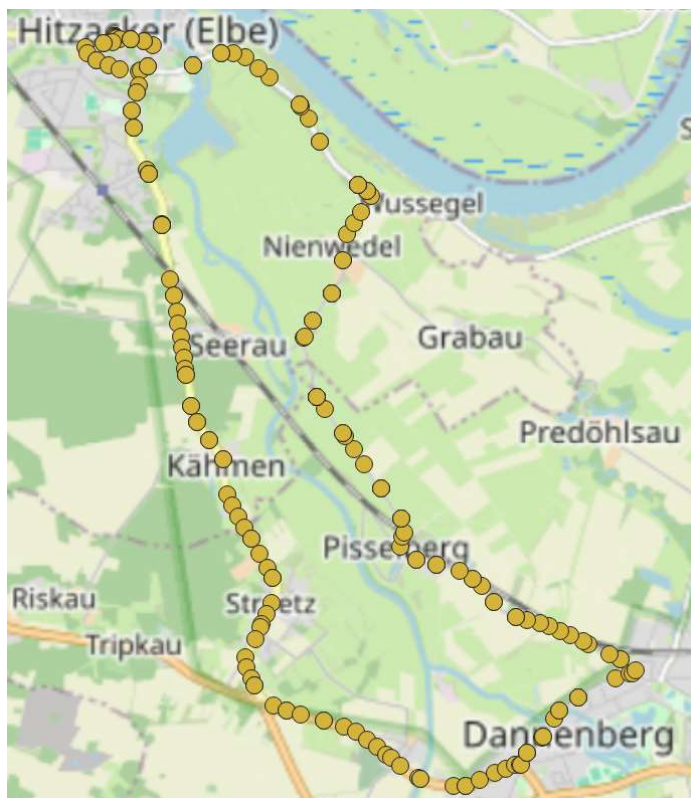


Abbildung 29: Fahrtstrecke von der Messfahrt am 17.11.2024.

Bei der Messfahrt vom 18.11.2024 liegen die Werte für Kohlenstoffdioxid überwiegend bei $403,39 \pm 50$ ppm mit zwei vermeintlichen Ausreißern mit 0 ppm. Der maximale Wert liegt bei $502,99 \pm 50$ ppm und der minimale Wert liegt bei $403,39 \pm 50$ ppm für Kohlenstoffdioxid. Dabei liegt der Mittelwert bei $403,33 \pm 50$ ppm mit einer Standardabweichung von 40,13 ppm. Die Feinstaubwerte liegen überwiegend in einem Bereich unter $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für alle PM-Varianten. Bei allen drei Partikelgrößen liegt der kleinste Werte bei $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Der maximale Wert für PM_{1,0} liegt bei $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$, für PM_{2,5} liegt bei $83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und für PM₁₀ bei $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Für PM_{1,0} liegt der Mittelwert bei $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit

einer Standardabweichung von $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Der Mittelwert für $\text{PM}_{2,5}$ liegt bei $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit einer Standardabweichung von $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Bei PM_{10} liegt der Mittelwert bei $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit einer Standardabweichung von $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

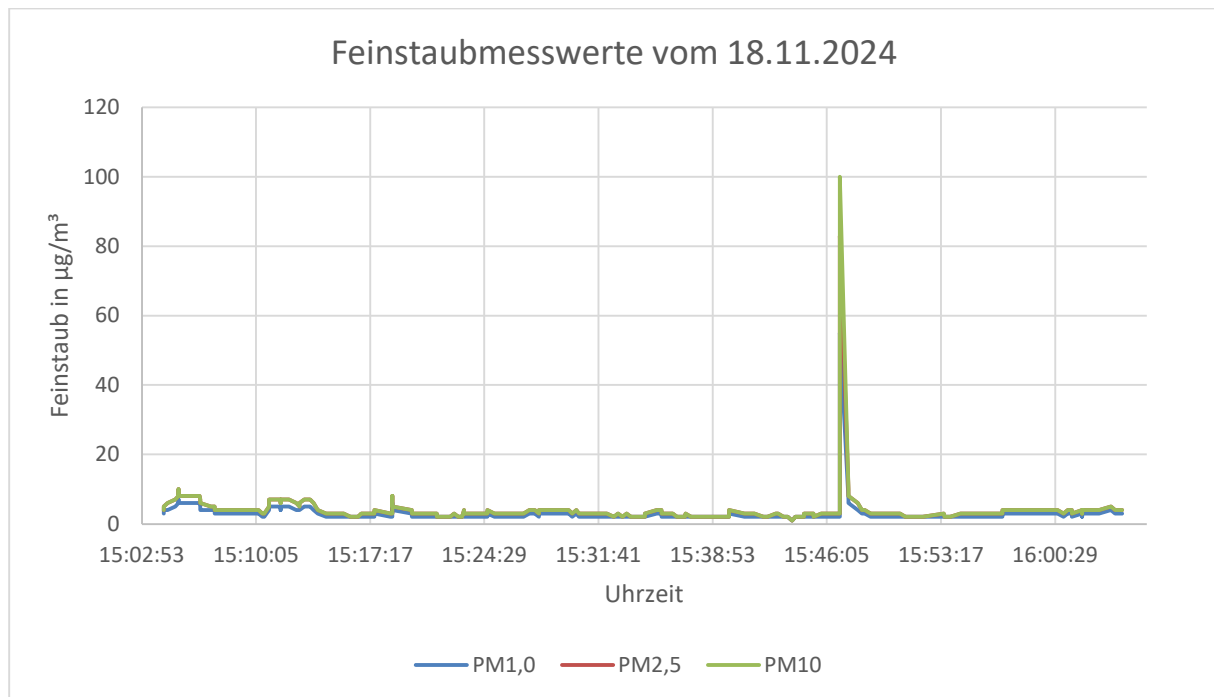


Abbildung 30: Feinstaubmesswerte vom 18.11.2024.

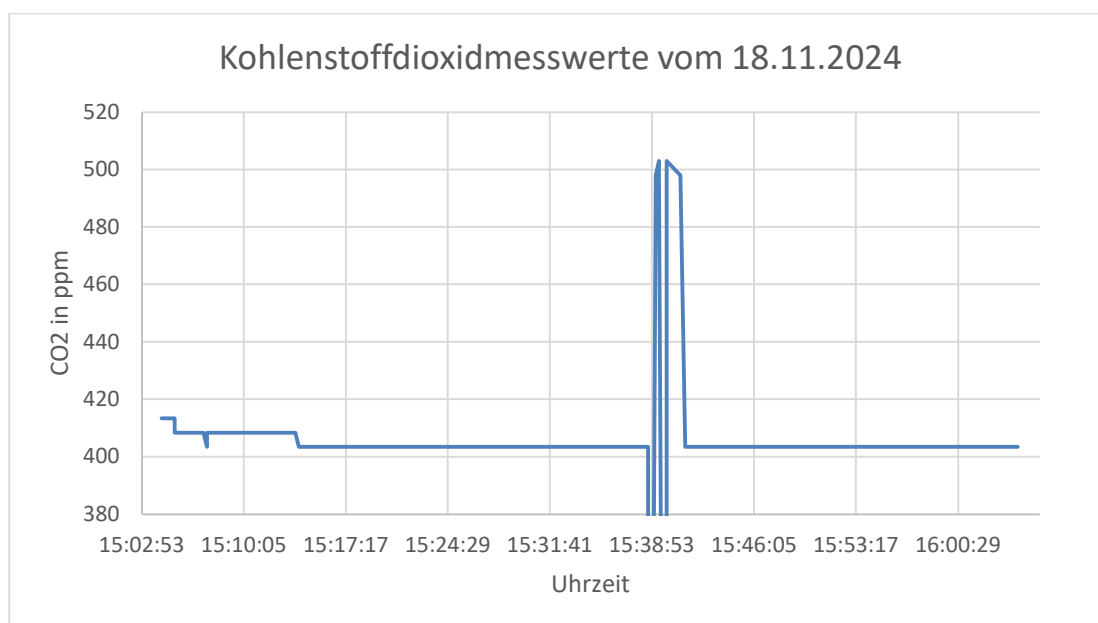


Abbildung 31: Kohlenstoffdioxidmesswerte vom 18.11.2024.

5.2.4 Messfahrt vom 20.11.2024

Bei der Messfahrt am 20.11.2024 wurde eine Strecke in Lüneburg befahren (Abbildung 32). In Abbildung 33 und Abbildung 34 sind die Messwerte für Feinstaub und Kohlenstoffdioxid dargestellt.

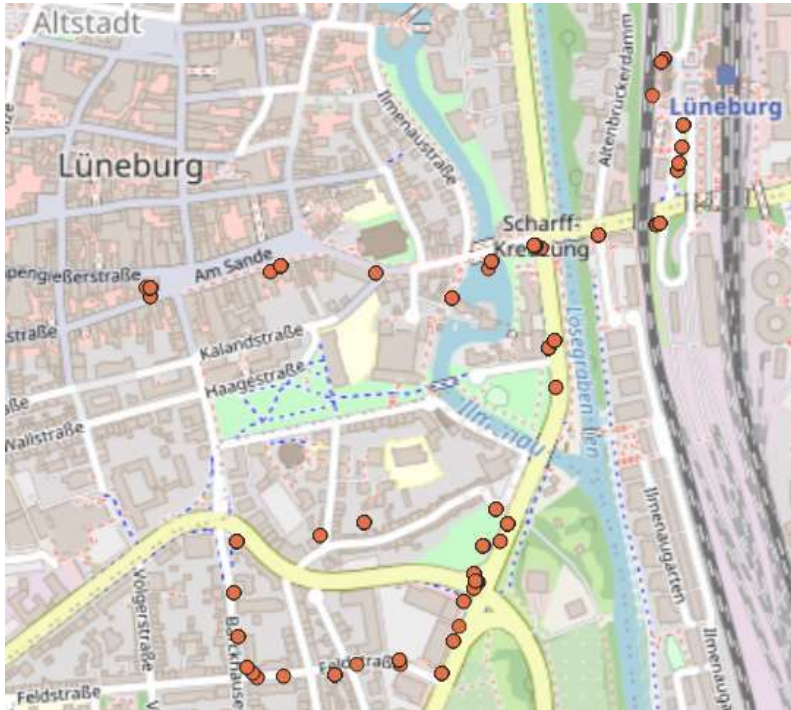


Abbildung 32: Fahrtstrecke von der Messfahrt am 20.11.2024

Bei der Messfahrt vom 20.11.2024 liegen die Werte für Kohlenstoffdioxid bis auf zwei Werte den gesamten Messbereich über bei $403,39 \pm 50$ ppm. Der Mittelwert beträgt $403,55 \pm 50$ ppm und die Standardabweichung $0,87$ ppm. Die Feinstaubwerte für $PM_{1,0}$ liegen zwischen $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Werte für $PM_{2,5}$ und PM_{10} sind den gesamten Messbereich gleich und liegen zwischen $4 \text{ mg}/\text{m}^3$ und $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Für $PM_{1,0}$ liegt der Mittelwert bei $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit einer Standardabweichung von $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Bei $PM_{2,5}$ und PM_{10} liegt der Mittelwert bei $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und einer Standardabweichung von $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

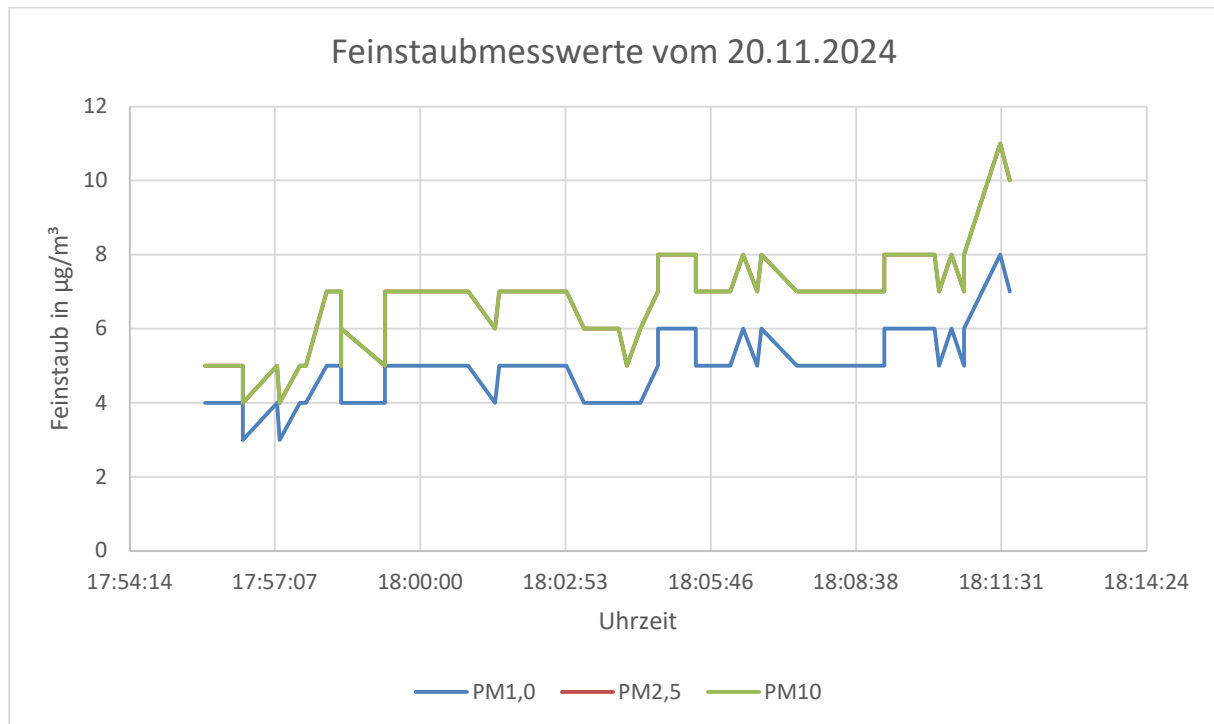


Abbildung 33: Feinstaubmesswerte vom 20.11.2024.

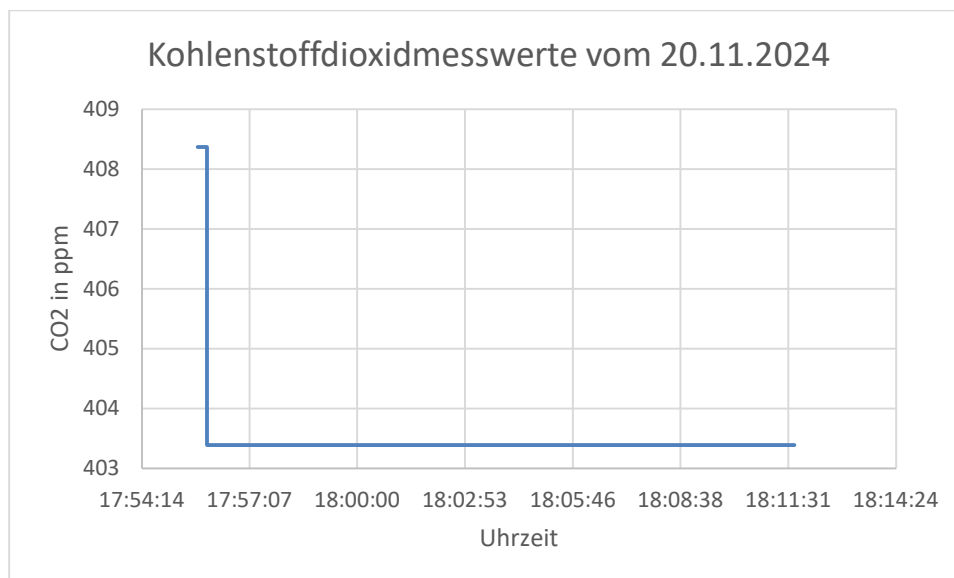


Abbildung 34: Kohlenstoffdioxidmesswerte vom 20.11.2024.

6 Diskussion

In dieser Arbeit wurde sich hauptsächlich auf Feinstaub und Kohlenstoffdioxid für die Messung konzentriert. Die Messung von Kohlenstoffdioxid wurde gewählt, weil es das bedeutendste Klimagas ist. Für diesen Luftschadstoff gibt es jedoch kein Grenzwert für den Außenbereich. Durch die Inhalation von Feinstaubpartikeln ergeben sich große Risiken für den Menschen, weshalb eine Überwachung dieser Werte im Bereich des Straßenverkehrs relevant ist. Außerdem wurden die Werte für PM_{1,0} mit aufgenommen jedoch ist der Bereich für den Sensor nicht geeignet und die Werte dementsprechend nicht aussagekräftig.

Bis auf die Messwerte von der Messfahrt am 18.11.2024 liegen alle ermittelten Messwerte unterhalb der Grenzwerte der 39. Verordnung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. Die Überschreitung der Messwerte vom 18.11.2024 gilt für PM_{2,5} und PM₁₀ und betrifft jeweils nur zwei Messwerte. Die restlichen Messwerte liegen auch unterhalb der Grenzwerte der 39.BImSchV. Laut der zukünftig in Kraft tretenden Richtlinie, die sich auf die Leitlinie der WHO aus dem Jahr 2021 bezieht, überschreiten alle Messwerte für PM_{2,5} und PM₁₀ bis auf die PM₁₀ Messwerte vom 20.11.2024 die Grenzwerte für den Jahresmittelwert. Am 16.11.2024 wurde für PM_{2,5} neben dem Jahresmittelwert auch der Tagesmittelwert überschritten. Die in dieser Arbeit ermittelten Werte sind jedoch lediglich Momentaufnahmen und bedeuten nicht zwangsläufig, dass die Grenzwerte überschritten werden. Für einen besseren Vergleich der Grenzwerte mit den Messwerten müssen mehr Fahrten zu gleichen Zeiten durchgeführt werden.

Im Zeitraum des Peaks beim Feinstaub am 17.11.2024 stand das Fahrrad auf einem Grundstück entfernt von einer Straße. Der maximale Wert stammt von einem auf das Grundstück fahrende PKW. Am 18.11.2024 sind bei allen drei PM-Varianten ein definitives Maximum zu erkennen. Dieses Maximum wurde im Dorf Pisselberg gemessen bei der Vorbeifahrt an einem Haus mit einem offenen Feuer auf dem Grundstück in der Nähe der Straße. Bei der Messfahrt am 20.11.2024 wurde die Strecke so gewählt, dass sie entlang einer viel befahrenen Straße im Feierabendverkehr führte. Die Feinstaubwerte fallen jedoch geringer aus als bei der beschriebenen Verkehrsanlage erwartet wird, dies kann daran liegen das es zur Zeit der Messung geregnet hat.

Die Daten des Feinstaubsensors HM3301 für PM_{2,5} und PM₁₀ liegen häufig direkt beieinander. Der Wert für PM₁₀ sollte jedoch höher liegen als der Wert des PM_{2,5}, weil die Partikel von PM_{2,5} bei PM₁₀ mitgemessen werden, jedoch andersrum nicht.

Bei den Messfahrten wurden unterschiedliche Routen gewählt, um verschiedene Verkehrssituationen darzustellen. Am späten Nachmittag sind in Lüneburg wesentlich mehr Fahrzeuge unterwegs als im ländlichen Bereich um Hitzacker. Zukünftig sollten noch weitere Messungen auf einer gleichen Route durchgeführt werden, um eine bessere Aussagekraft der Messwerte des Sensors zu erreichen. Außerdem sollten die anderen Parameter wie Temperatur und Druck mehr in die Auswertung mit einbezogen werden. In den durchgeführten Messfahrten gab es mehrere technische Probleme auf denen eine Aufzeichnung der Messwerte des BME680 Sensors nicht möglich war.

Trotz der Grenzwerte, die für den Schutz des Menschen und der Umwelt konzipiert sind, gibt es keine Konzentration von Feinstaub die nicht gefährlich sein kann (Umweltbundesamt 2024a). Es gibt nur wenige Studien zu den Auswirkungen der Feinstaubbelastung auf Fahrradfahrern im Straßenverkehr, welche wiederum verschiedenste Ergebnisse aufweisen. Viele Studien beziehen sich bei der Auswertung nicht nur auf die Feinstaubkonzentration, sondern auch auf das Atemvolumen. Diese beiden Faktoren hängen beim Fahrradfahren direkt miteinander zusammen, da Fahrradfahrer ein erhöhtes Atemvolumen durch die Anstrengung haben. Einige Studien stellen keine Veränderungen der Lungen- oder Herzfunktion fest, nachdem Fahrradfahrer im Straßenverkehr unterwegs waren. Im Gegensatz dazu haben andere Studien gezeigt, dass sich durch das Einatmen verschmutzter Atemluft der Atemwiderstand erhöhen kann, woraus eine Verringerung der Lungenfunktion, ähnlich wie bei den Erkrankungen Asthma und chronischer Bronchitis folgt (Park et al. 2017).

Der zeitliche Aspekt der Messungen spielt ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Beurteilung der Auswirkungen der Feinstaubkonzentration auf den Menschen. In einer Studie von Zuurbier et al. zeigte sich, dass bei einer Messung zwei Stunden nach der Testfahrt bei einer Exposition mit ultrafeinem Feinstaub ein verminderter Spitzenexpirationsfluss auftrat. Bei einer Messung sechs Stunden nach der Testfahrt mit den gleichen Probanden zeigten sich jedoch keine Veränderungen mehr (Zuurbier et al. 2011).

Generell ist zu sagen je mehr Feinstaub eingeatmet wird desto höher das Risiko für gesundheitliche Einschränkungen bei Menschen ist. Zum einen nimmt das Wetter Einfluss auf die Feinstaubkonzentration, denn im Winter sind die Konzentrationen aufgrund der vermehrten Nutzung der Heizung höher als in den wärmeren Monaten. Ein anderer Aspekt ist das Fortbewegungsmittel: Fahrradfahrer sind im Vergleich zu den PKW-Fahrern aufgrund der längeren Fahrtzeit der größten Exposition ausgesetzt. Dazu kommt, dass Fahrradfahrer aufgrund der Anstrengung beim Fahren ein höheres Atemvolumen aufweisen und somit werden höhere Feinstaubkonzentrationen aufnehmen. Außerdem bieten Fahrzeuge einen Schutz gegen die Außenluft, welcher den Fahrradfahrern fehlt (Zhu et al. 2023).

In Bereichen von Kreuzungen und Ampeln ergeben sich durch stehende Fahrzeuge mit laufenden Motoren oftmals erhöhte Feinstaubkonzentrationen. Solche Bereiche sollten Fahrradfahrer für eine Reduktion der Feinstaubbelastung meiden. Vegetation und eine Trennung des Radweges vom Straßenverkehr zeigen auch eine Reduktion der Feinstaubbelastung. Die Vegetation dient dabei selber als ein Schutz gegen die Feinstaubbelastung sowie wird durch die größere Distanz zu der Straße (Ilenič et al. 2024).

Das Messgerät weist in der Anwendung noch Fehler auf und ist in der Nutzung instabil. Die Jumperkabel bieten nicht die beste Verbindungsform und zudem können sie sich zu leicht von der Stift- oder Buchsenleiste lösen, wodurch es immer wieder zu fehlerhaften Messwerten kam. Durch die Verkleidung des Messgerätes mit dem Plastikrohr war nicht immer ersichtlich, ob alle Kabel noch richtig verbunden waren, denn nicht alle Sensoren haben eine LED eingebaut, die auf ein Funktionieren des Sensors hindeutet. Dieses Problem kann im späteren Gebrauch durch eine für das Messgerät angefertigte Platine gelöst werden. Alle Bauteile wären hierdurch richtig verbunden und befestigt, sodass auch kleinere Erschütterungen keine Fehler herbeiführen. In Verbindung mit der Platine sollte außerdem ein besseres Gehäuse für das Messgerät angefertigt werden, damit das Gerät gegen die Wetterbedingungen geschützt ist. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass der Feinstaubsensor und der Kohlenstoffdioxidensor ausreichend belüftet werden. Für einen 3D-Druck könnte das Gehäuse des OBS als Vorbild dienen.

Das jetzige Gehäuse mit dem Rohr kann zu ungenauen Messungen führen. Die Luftströmung durch das Gehäuse ist nur in zwei Richtungen möglich, sodass seitliche Partikeln eventuell nicht gemessen werden können. Außerdem können die Temperaturwerte verfälscht sein da sich das Gehäuse deutlich mehr durch Sonneneinstrahlung aufwärmt und der Sensor somit eine andere Temperatur angibt.

Nach längerer Nutzung ist bei dem Temperatursensor ein Problem aufgetreten, bei dem dieser während der Messung verfälschte Werte ausgab. Dieses Problem tritt jedoch nicht jedes Mal auf und könnte somit auch mit der Nutzung einer Platine gelöst werden. Die Funktion des Temperatursensor muss weiterverfolgt werden.

Zurzeit funktionieren der OBS und das hier beschriebene Messgerät nur getrennt voneinander. Zukünftig sollten diese beiden Projekte miteinander verbunden werden. Dafür muss der Programmcode von dem Messgerät in den Code des OBS eingearbeitet werden. Beide Codes basieren auf der Programmiersprache C++ und sollte durch kleinere Änderungen möglich sein. Zudem muss die Art der Spannungsversorgung angepasst werden, da der Kohlenstoffdioxidssensor mit 5 V Betriebsspannung arbeitet und alle anderen elektronischen Komponenten mit 3,3 V. In der jetzigen Fassung des Messgerätes wird dies über eine Powerbank gelöst. Wenn beide Geräte zusammengefügt sind, sollte für die Schaffung von 5 V ein Boostmodul benutzt werden damit die 3,3 V Spannungsversorgung des OBS genutzt werden kann ohne eine zusätzliche Powerbank.

7 Fazit

Aus den Messfahrten geht hervor, dass die Grenzwerte bis auf wenige Ausnahmen eingehalten worden sind. Wenn jedoch die veränderte Richtlinie in den kommenden Jahren in Kraft tritt, gibt es mehrere Überschreitungen der Grenzwerte aufgrund der Verschärfung. Es ist dabei zu beachten, dass die Grenzwerte für ein Tages- und ein Jahresmittelwert angegeben sind und einmalige kurzzeitige Überschreitungen keine Überschreitung des Grenzwertes bedeutet. Die deutlichen maximalen Werte aus den Messungen der Messfahrten konnten eindeutigen Ereignissen zugeordnet werden.

Resultierend aus den Messfahrten ist zu erkennen, dass noch Verbesserungen an dem Messgerät vorzunehmen sind. Wie in der Diskussion schon erwähnt, fehlt eine geeignete Platine und ein Gehäuse für das Messgerät. Durch die Platine sollen mögliche Kontaktfehler wie das sich lösen von Jumperkabeln gelöst werden. Das Gehäuse soll dazu dienen das Messgerät gegen äußere Wetterbedingungen zu schützen und ein leichteres Anbringen an das Fahrrad zu ermöglichen. Die Auswahl der Sensoren ist für das Projekt geeignet, dennoch sollten einige der Bauteile noch weiter bewertet werden. Die Kalibrierung des Feinstaubensors ist in dieser Arbeit zu kurz aufgefallen und sollte noch länger durchgeführt werden für aussagekräftigere Werte. Außerdem muss allgemein getestet werden, wie sich die Sensoren über einen längeren Zeitraum von Monaten bis Jahre verhalten.

Studien weisen zu der Belastung durch Feinstaub bei der Fahrt mit dem Fahrrad unterschiedlichste Ergebnisse auf. Einige konnten kurz nach der Fahrt negative Veränderungen in der Lungen- oder Herzfunktion aufweisen. Diese Veränderungen waren meistens jedoch nicht lange nachweisbar. Andere Studien fanden gar keine Veränderungen bei dem Probanden in der Lungen- oder Herzfunktion weder kurz nach den Fahrten mit dem Fahrrad noch Stunden danach. Auf jeden Fall konnte bewiesen werden, dass die Feinstaubbelastung an Kreuzungen im Straßenverkehr die höchsten Werte aufzeigen und Vegetation im Bereich des Straßenverkehrs kann die Feinstaubexposition vermindern.



Zukünftig sollte außerdem daran gearbeitet werden die beiden Projekte des OBS und des Messgerätes zusammenzufügen. Dafür muss der Programmcode und die Spannungsversorgung angepasst werden.

8 Ausblick

Da dieses Projekt ein Opensourceprojekt ist, werden alle nötigen Informationen zum Nachbauen des Gerätes veröffentlicht, somit haben andere Personen die Möglichkeit dieses Messgerät noch weiterzuentwickeln.

Dieses Gerät kann getrennt von dem OBS und nicht nur am Fahrrad genutzt werden. Auch Fußgänger oder Bauarbeiter, welche oftmals direkt im Straßenverkehr arbeiten, könnten dieses Gerät nutzen, um ihre Belastung zu überwachen. Das Gehäuse müsste eventuell für diese Anwendungen angepasst werden. Außerdem kann hier die Größe des Messgerätes eine Rolle spielen. Die Anbringung direkt an einem Rucksack oder einer Jacke anzubringen kann komplizierter sein und auch störend für die Person. Bauarbeiter müssten das Gerät jedoch nicht direkt am Körper tragen, sondern könnten es zum Beispiel an der Baustellenabgrenzung anbringen.

Neben der Erweiterung der verschiedenen Anwendungen und Sensoren, kann auch die Elektronik erweitert und verbessert werden. Neben den vorhandenen Bauteilen können auch noch weitere verschiedene Sensoren angebracht werden. Durch Gespräche mit vielen verschiedenen Leuten auf der Messe Maker Faire hat sich der Wunsch nach einem Sensor für die Erschütterung geäußert. Dabei soll dieser Sensor dafür genutzt werden, um die Beschaffenheit der Fahrradwege und Straßen zu beurteilen. Viele Straßen in Deutschland weisen viele Schlaglöcher und Unebenheiten durch den massiven Gebrauch auf. Außerdem kann darüber nachgedacht werden, ob die Stromversorgung mit dem Akku eines E-Bikes gekoppelt werden kann. Heutzutage fahren viele Personen mit dem E-Bike, sodass der Akku des E-Bikes mit genutzt werden kann. Eine Fahrtsimultane Displayanzeige der Messwerte ist eine weitere denkbare Verbesserung. Hierbei ist es wichtig die Verbindung zu den Grenzwerten zu ziehen, damit die angezeigten Messwerte eingeordnet werden können.

Die am Ende erlangten Messwerte können auch über das auf dem Microcontroller integrierte WLAN direkt auf die Karte hochgeladen werden. Dafür muss jedoch erst ein dafür funktionierendes Programm entwickelt werden.



Außerdem gibt es Interesse daran dieses Projekt mit Schulklassen zu nutzen. Dabei können die Schüler verschiedene wissenschaftliche Fähigkeiten erlernen oder vertiefen. Neben dem Erlernen einiger handwerklicher Fähigkeiten wie dem Löten von elektronischen Bauteilen kann auch der Umgang mit Messdaten und deren Auswertung erlernt werden.

9 Quellenverzeichnis

androegg (2024): ESP8266 STM-32 Arduino SPI Kartenleser 3,3V. Hg. v. androegg. Online verfügbar unter <https://www.androegg.de/shop/esp8266-stm-32-arduino-spi-kartenleser-33v/>.

ArduinoGetStarted (2024): ESP32 I/O. Hg. v. ArduinoGetStarted. Online verfügbar unter <https://esp32io.com/>.

BALM (2024): Entwicklung des Modal Split im Personenverkehr in Deutschland in den Jahren 2013 bis 2022 und eine Prognose bis 2027. Hg. v. Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/168397/umfrage/modal-split-im-personenverkehr-in-deutschland/>.

berrybase (2024a): BME680 Breakout Board, 4in1 Sensor für Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck und Luftgüte. Hg. v. berrybase. Online verfügbar unter <https://www.berrybase.de/bme680-breakout-board-4in1-sensor-fuer-temperatur-luft-feuchtigkeit-luftdruck-und-luftguete>.

berrybase (2024b): ESP32 NodeMCU Development Board. Hg. v. berrybase. Online verfügbar unter <https://www.berrybase.de/esp32-nodemcu-development-board>.

berrybase (2024c): MH-Z19C Infrarot CO2 Sensor, Pinleiste. Hg. v. berrybase. Online verfügbar unter <https://www.berrybase.de/mh-z19c-infrarot-co2-sensor-pinleiste>.

berrybase (2024d): seeed Grove - Laser PM2.5 Staub Sensor (HM3301). Hg. v. berrybase. Online verfügbar unter <https://www.berrybase.de/seeed-grove-laser-pm2.5-staub-sensor-hm3301>.

berrybase (2024e): u-blox NEO-6M GPS TTL Empfänger inkl. Antenne. Hg. v. berrybase. Online verfügbar unter <https://www.berrybase.de/u-blox-neo-6m-gps-ttl-empfaenger-inkl.-antenne>.

BMUV (2014): Was ist Lärm? Hg. v. BMUV. Online verfügbar unter <https://www.bmuv.de/themen/laerm/laermenschutz-im-ueberblick/was-ist-laerm>.

Bosch (2019): BME680 - Datasheet. low power gas, pressure, temperature & humidity sensor. Hg. v. Bosch. Online verfügbar unter <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/gas-sensors/bme680/>.

Deutscher Wetterdienst: Ozon. Hg. v. Deutscher Wetterdienst. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=101994&lv2=101946>.

Deutscher Wetterdienst: Stickoxide (NO, NO₂, NO_x, NO_y). Hg. v. Deutscher Wetterdienst. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/forschung/atmosphaeren-beob/zusammensetzung_atmosphaere/spurengase/inh_nav/nox_node.html.

Deutschlandatlas (2024): Wo wir leben. Bevölkerungsdichte: Deutschland auf Platz 6 der dichtest besiedelten Länder in Europa. Hg. v. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. Online verfügbar unter <https://www.deutschlandatlas.bund.de/DE/Karten/Wo-wir-leben/006-Bevoelkerungsdichte.html>.

Espressif Systems (2023): ESP32-WROOM-32. Datasheet. Hg. v. Espressif Systems. Online verfügbar unter <https://www.espressif.com/en/support/download/documents>.

European Environment Agency (2013): Every breath we take. Improving air quality in Europe. Luxembourg (EEA signals, TH-AP-13-001-EN-C).

Ilenič, Anja; Pranjić, Alenka Mauko; Zupančič, Nina; Milačič, Radmila; Ščančar, Janez (2024): Fine particulate matter (PM_{2.5}) exposure assessment among active daily commuters to induce behaviour change to reduce air pollution. In: *The Science of the total environment* 912, S. 169117. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169117.

joy-it (2022): Feinstaubsensor Datenblatt. Hg. v. joy-it. Online verfügbar unter <https://joy-it.net/de/products/sen-hm3301>.

Kolar, Jörgen (1990): Stickstoffoxide und Luftreinhaltung. Grundlagen, Emissionen, Transmission, Immissionen, Wirkungen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer eBook Collection Life Science and Basic Disciplines).

Kraftfahrt-Bundesamt (2024a): Bestand nach Umwelt-Merkmalen. Zeitreihen. Hg. v. Kraftfahrt-Bundesamt. Flensburg. Online verfügbar unter https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2024/2024_b_umwelt_zeitreihen.html?nn=3525028&fromStatistic=3525028&yearFilter=2024&fromStatistic=3525028&yearFilter=2024.

Kraftfahrt-Bundesamt (2024b): Fahrzeugbestand 2024. Hg. v. Kraftfahrt-Bundesamt. Flensburg. Online verfügbar unter https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html.

NABU; Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland; Deutsche Umwelthilfe; Verkehrsclub Deutschland (2018): Einführung einer Blauen Plakette zur Minderung der NO₂-Belastung in Städten. Hg. v. NABU, Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, Deutsche Umwelthilfe und Verkehrsclub Deutschland.

Oelkers, Benjamin; Hartmann-Schreier, Jenny (2024): Kohlendioxid. Hg. v. F. Böckler, B. Dill, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, T. Gamse, et al.: Thieme Gruppe. Online verfügbar unter <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-11-01458>.

OpenBikeSensor (2024): Der OpenBikeSensor ist ein offenes System für die Überholabstands-messung am Fahrrad. Hg. v. OpenBikeSensor e. V. Online verfügbar unter <https://www.openbikesensor.org/>.

Park, Hye-Youn; Gilbreath, Susan; Barakatt, Edward (2017): Respiratory outcomes of ultrafine particulate matter (UFPM) as a surrogate measure of near-roadway exposures among bicyclists. In: *Environmental health : a global access science source* 16 (1), S. 6. DOI: 10.1186/s12940-017-0212-x.

Saarikoski, Sanna; Hellén, Heidi; Praplan, Arnaud P.; Schallhart, Simon; Clusius, Petri; Niemi, Jarkko V. et al. (2023): Characterization of volatile organic compounds and submicron organic aerosol in a traffic environment. In: *Atmos. Chem. Phys.* 23 (5), S. 2963–2982. DOI: 10.5194/acp-23-2963-2023.

Schweisfurth, H. (2018): Gesundheitsrisiken durch Feinstaub und Stickstoffoxide. In: *AT* 44 (07), S. 340–349. DOI: 10.5414/atx02295.

Seed Studio (2024): Grove - Laser PM_{2.5} Sensor (HM3301). Hg. v. Seed Studio. Online verfügbar unter https://wiki.seeedstudio.com/Grove-Laser_PM2.5_Sensor-HM3301/.

Tim Butler; Ute Dauert; Andrea Mues; Marion Wichmann-Fiebig (2020): Ozonsituation in Deutschland. Wissensstand, Forschungsbedarf und Empfehlungen. Hg. v.

Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>.

Udo Becker; Elke Clarus; Wolfram; Matthias Winter (2009): Stickoxide, Partikel und Kohlendioxid: Grenzwerte, Konflikte und Handlungsmöglichkeiten kommunaler Luftreinhaltung im Verkehrsbereich. Informationen und Empfehlungen für Mitarbeiter deutscher Kommunen. Hg. v. Technische Universität Dresden - Professur für Verkehrsökologie. Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr. Dresden.

Umweltbundesamt (2016): Flüchtige organische Verbindungen. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/chemische-stoffe/fluechtige-organische-verbindungen#fluchtige-organische-verbindungen-voc->, zuletzt aktualisiert am 21.11.2016.

Umweltbundesamt (2022a): Feinstaub. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschaedstoffe-im-ueberblick/feinstaub#undefined>, zuletzt aktualisiert am 09.12.2022.

Umweltbundesamt (2022b): Ozon. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschaedstoffe-im-ueberblick/ozon>, zuletzt aktualisiert am 09.12.2022.

Umweltbundesamt (2022c): Straßenverkehrslärm. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/laerm/verkehrslaerm/strassenverkehrslaerm#gerauschbelastung-im-strassenverkehr>.

Umweltbundesamt (2023): Stickstoffoxide. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschaedstoffe-im-ueberblick/stickstoffoxide#undefined>, zuletzt aktualisiert am 25.04.2023.

Umweltbundesamt (2024a): Bedeutung der Feinstaubbelastung für die Gesundheit. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-feinstaub#--12>.

Umweltbundesamt (2024b): Grenz-, Ziel- und Schwellenwerte. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.at/umweltthemen/luft/daten-luft/luft-grenzwerte>.

Umweltbundesamt (2024c): Nationale Trendtabellen. Anteil des Verkehrs an den Partikelemissionen (PM10) in Deutschland. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs#verkehr-belastet-luft-und-klima-minderungsziele-der-bundesregierung>, zuletzt aktualisiert am 03.2024.

Umweltbundesamt (2024d): Verteilung der CO₂-Emissionen in Deutschland nach Quellgruppe im Jahr 2023. Hg. v. Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/37595/umfrage/anteil-einzeln-sektoren-an-den-co2-emissionen-in-deutschland/>.

Wermelt, Mia (2015): Bestandsaufnahme einer individuellen Feinstaubaufnahme in öffentlichen Verkehrsmitteln im Großraum München über die Jahre 2005 bis 2009: Imu; Ludwig-Maximilians-Universität München. Online verfügbar unter <https://e-doc.ub.uni-muenchen.de/18836/>.

Werner Hagedorn (2024): Wie funktioniert die nichtdispersive Infrarot (NDIR) Gas-messung? Hg. v. m-u-t GmbH. Online verfügbar unter <https://www.mut-group.com/de/industrial-sensing/gasmesstechnik/ndir-multigassensoren/wie-funktioniert-die-ndir-gasmessung/>.

WHO (2006): Air Quality Guidelines. Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide. Geneva: World Health Organization. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=305215>.

WHO (2021): WHO Global Air Quality Guidelines. Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide. 1st ed. Geneva: World Health Organization. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=30479186>.

Winsen (2020): Infrared CO₂ Sensor Module. Model: MH-Z19C - Users Manual. Hg. v. Winsen. Online verfügbar unter <https://www.winsen-sensor.com/product/mh-z19c.html>.

Zhao, Qun; Li, Yingjie; Chai, Xiaolong; Xu, Linzhen; Zhang, Linfeng; Ning, Ping et al. (2019): Interaction of inhalable volatile organic compounds and pulmonary surfactant: Potential hazards of VOCs exposure to lung. In: *Journal of hazardous materials* 369, S. 512–520. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.01.104.

Zhu, Caihua; Xue, Yubing; Li, Yuran; Yao, Zhenxing; Li, Yan (2023): Assessment of particulate matter inhalation during the trip process with the considerations of exercise load. In: *The Science of the total environment* 866, S. 161277. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.161277.

Zuurbier, Moniek; Hoek, Gerard; Oldenwening, Marieke; Meliefste, Kees; van den Hazel, Peter; Brunekreef, Bert (2011): Respiratory effects of commuters' exposure to air pollution in traffic. In: *Epidemiology (Cambridge, Mass.)* 22 (2), S. 219–227. DOI: 10.1097/EDE.0b013e3182093693.

10 Anhang

Programmcode:

```
// Einbindung der Bibliotheken
#include "SD.h" // zum Ansprechen des SDCard-Moduls
#include <Wire.h> // für die I2C Schnittstelle
#include <SPI.h> // für die SPI Schnittstelle
#include "Adafruit_BME680.h" // Bibliothek für die Nutzung des Multisensors BME680
#include "Seeed_HM330X.h" // Bibliothek für die Nutzung des Feinstaubsenors HM3301
#include <TinyGPS++.h> // Bibliothek für die Nutzung des GPS-Moduls

// Definierung einiger Kennwerte und Pinverbindungen
#define SEALEVELPRESSURE_HPA (1013.25)
#define GPS_BAUDRATE 9600
#define RXD2 16
#define TXD2 17

TinyGPSPlus gps;
Adafruit_BME680 bme;

#ifdef ARDUINO_SAMD_VARIANT_COMPLIANCE
  #define SERIAL SerialUSB
#else
  #define SERIAL Serial
#endif
HM330X sensor;
u8 buff[30];
```

// Initialisierung der Variablen

int s = 1;

double n=1;

int m=25;

double h=1;

double Temperature=0;

double Gas=0;

double Humidity=0;

double Pressure=0;

double Altitude=0;

double lat=0;

double lng=0;

double speed=0;

double year=0;

double month=0;

double day=0;

double hour=0;

double minute=0;

double second=0;

double glat=0;

double glng=0;

double gspeed=0;

double gyear=0;

double gmonth=0;

double gday=0;

double ghour=0;

double gminute=0;

double gsecond=0;

double PM[6]={};

```
// Kohlenstoffdioxidsensor MH-Z19C
```

```
int DataPin = 35;
```

```
int ppmrange = 5000;
```

```
unsigned long pwmtime;
```

```
double PPM = 0;
```

```
double pulsepercent=0;
```

```
// Funktion um Informationen auf die SD-Karte zu schreiben
```

```
void writeFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message){
```

```
    File file = fs.open(path, FILE_WRITE);
```

```
    if(!file){
```

```
        Serial.println("Failed to open file for writing");
```

```
        return;
```

```
    }
```

```
    if(file.print(message)){
```

```
        Serial.println("File written");
```

```
    } else {
```

```
        Serial.println("Write failed");
```

```
    }
```

```
    file.close();
```

```
}
```

```
void appendFileDouble(fs::FS &fs, const char * path, double message, int count){
```

```
    File file = fs.open(path, FILE_APPEND);
```

```
    if(!file){
```

```
        Serial.println("Failed to open file for appending");
```

```
        return;
```

```
    }
```

```
    if(file.print(message, count)){
```

```
        Serial.println("Message appended");
```

```
    } else {
```

```
        Serial.println("Append failed");
```

```
    }
```

```
    file.close();
```

```
}
```

```
void appendFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message){
    File file = fs.open(path, FILE_APPEND);
    if(!file){
        Serial.println("Failed to open file for appending");
        return;
    }
    if(file.print(message)){
        Serial.println("Message appended");
    } else {
        Serial.println("Append failed");
    }
    file.close();
}

// Feinstaubsensor HM3301
int parse_result(u8 *data,int i)
{
    u16 value=0;
    if(NULL==data){
        return value;
    }
    value = (u16)data[i*2]<<8|data[i*2+1];
    return value;
}
```

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  delay(2000);
  Serial2.begin(9600, SERIAL_8N1, RXD2, TXD2);
  Serial.println(F("ESP32 - GPS module"));

  pinMode(14, OUTPUT);
  pinMode(DataPin, INPUT);

  if (!bme.begin()) {
    Serial.println(F("Could not find a valid BME680 sensor, check wiring!"));
  } else {
    Serial.println(F("BME680 async test"));
  }
  bme.setTemperatureOversampling(BME680_OS_8X);
  bme.setHumidityOversampling(BME680_OS_2X);
  bme.setPressureOversampling(BME680_OS_4X);
  bme.setIIRFilterSize(BME680_FILTER_SIZE_3);
  bme.setGasHeater(320, 150);

  if(sensor.init()) {
    Serial.println("HM330X init failed!!!");
  } else {
    Serial.println("HM330X works!");
  }

  Serial.print("Initializing SD card...");
  if (!SD.begin(5)) {
    Serial.println("initialization failed!");
  }
  Serial.println("initialization done.");

  writeFile(SD, "/hello.txt", "Nummer, Latitude, Longitude, Speed, Year, Month, Day, Hour,
Minute, Second, Temperature(°C), Pressure(hPa), Altitude(m), Humidity(%), Gas(%),
CO2(PPM), PM1.0, PM2.5, PM10 \r\n");
  writeFile(SD, "/gps.txt", "GPS: \r\n");
}
```

```
void loop() {  
  while (Serial2.available() > 0){  
    if (gps.encode(Serial2.read())){  
  
      if (s <= 4) {  
        Serial.print("s: ");  
        delay(100);  
        Serial.println(s);  
        gps_logging();  
        delay(2000);  
        s++;  
  
      } else {  
  
        Serial.println("Both:");  
        Serial.println(n);  
        gps_logging();  
        delay(100);  
        gps2_logging();  
        delay(100);  
        BME680_logging();  
        delay(100);  
        MHZ19C_logging();  
        delay(100);  
        HM3301_logging();  
        delay(2000);  
        s = 1;  
      }  
      if (millis() > 5000 && gps.charsProcessed() < 10){  
        Serial.println(F("No GPS detected: check wiring."));  
        while(true);  
      }  
    }  
  }  
}
```



```
// schreibt GPS-Daten in eine Textdatei "gps.txt"
void gps_logging() {

    if (gps.location.isValid()) {
        glat = gps.location.lat();
        glng = gps.location.lng();
    }
    if (gps.speed.isValid()) {
        gspeed = gps.speed.kmph();
    }
    if (gps.date.isValid() && gps.time.isValid()) {
        gyear = gps.date.year();
        gmonth = gps.date.month();
        gday = gps.date.day();
        ghour = gps.time.hour()+1;
        gminute = gps.time.minute();
        gsecond = gps.time.second();
    }
    appendFileDouble(SD, "/gps.txt", h, 0);
    appendFile(SD, "/gps.txt", ", ");
    appendFileDouble(SD, "/gps.txt", glat,8);
    appendFile(SD, "/gps.txt", ", ");
    appendFileDouble(SD, "/gps.txt", glng,8);
    appendFile(SD, "/gps.txt", ", ");
    appendFileDouble(SD, "/gps.txt", gspeed, 2);
    appendFile(SD, "/gps.txt", ", ");
    appendFileDouble(SD, "/gps.txt", gyear,0);
    appendFile(SD, "/gps.txt", ", ");
    appendFileDouble(SD, "/gps.txt", gmonth, 0);
    appendFile(SD, "/gps.txt", ", ");
    appendFileDouble(SD, "/gps.txt", gday, 0);
    appendFile(SD, "/gps.txt", ", ");
    appendFileDouble(SD, "/gps.txt", ghour, 0);
    appendFile(SD, "/gps.txt", ", ");
    appendFileDouble(SD, "/gps.txt", gminute, 0);
```

```
appendFile(SD, "/gps.txt", " ");
appendFileDouble(SD, "/gps.txt", gsecond,0);
appendFile(SD, "/gps.txt", "\n");
h++;
}

//schreibt GPS-Daten in eine Textdatei "hello.txt"
void gps2_logging(){
  if (gps.location.isValid()) {
    lat = gps.location.lat();
    lng = gps.location.lng();
  }
  if (gps.speed.isValid()) {
    speed = gps.speed.kmph();
  }
  if (gps.date.isValid() && gps.time.isValid()) {
    year = gps.date.year();
    month = gps.date.month();
    day = gps.date.day();
    hour = gps.time.hour()+2;
    minute = gps.time.minute();
    second = gps.time.second();
  }
  if (millis() > 5000 && gps.charsProcessed() < 10){
    Serial.println(F("No GPS detected: check wiring."));
    while(true);
  }
  appendFileDouble(SD, "/hello.txt", n, 0);
  appendFile(SD, "/hello.txt", " ");
  appendFileDouble(SD, "/hello.txt", lat,8);
  appendFile(SD, "/hello.txt", " ");
  appendFileDouble(SD, "/hello.txt", lng,8);
  appendFile(SD, "/hello.txt", " ");
  appendFileDouble(SD, "/hello.txt", speed, 2);
  appendFile(SD, "/hello.txt", " ");
```

```
appendFileDouble(SD, "/hello.txt", year,0);
appendFile(SD, "/hello.txt", " ");
appendFileDouble(SD, "/hello.txt", month, 0);
appendFile(SD, "/hello.txt", " ");
appendFileDouble(SD, "/hello.txt", day, 0);
appendFile(SD, "/hello.txt", " ");
appendFileDouble(SD, "/hello.txt", hour, 0);
appendFile(SD, "/hello.txt", " ");
appendFileDouble(SD, "/hello.txt", minute, 0);
appendFile(SD, "/hello.txt", " ");
appendFileDouble(SD, "/hello.txt", second,0);
appendFile(SD, "/hello.txt", " ");
}

//schreibt Messdaten des Multisensors BME680 in eine Textdatei "hello.txt"
void BME680_logging(){
    Temperature = bme.readTemperature();
    Pressure = bme.readPressure()/ 100.0F;
    Altitude = bme.readAltitude(SEALEVELPRESSURE_HPA);
    Humidity = bme.readHumidity();
    Gas = bme.readGas()/1000.0;

    if (Temperature > m){
        digitalWrite(14, HIGH);
    } else {
        digitalWrite(14, LOW);
    }
    appendFileDouble(SD, "/hello.txt",Temperature,2);
    appendFile(SD, "/hello.txt", " ");
    appendFileDouble(SD, "/hello.txt",Pressure,3);
    appendFile(SD, "/hello.txt", " ");
    appendFileDouble(SD, "/hello.txt",Altitude, 2);
    appendFile(SD, "/hello.txt", " ");
    appendFileDouble(SD, "/hello.txt",Humidity, 2);
    appendFile(SD, "/hello.txt", " ");
```

```
appendFileDouble(SD, "/hello.txt",Gas,2);
appendFile(SD, "/hello.txt", " ");
}
```

//schreibt Messdaten des Kohlenstoffdioxidsensor MH-Z19C in eine Textdatei "hello.txt"

```
void MHZ19C_logging(){
    pwmtime = pulseIn(DataPin, HIGH, 2000000) / 1000;
    double pulsepercent = pwmtime / 1004.0;
    PPM = ppmrange * pulsepercent;

    appendFileDouble(SD, "/hello.txt",PPM,2);
    appendFile(SD, "/hello.txt", " ");
}
```

//schreibt Messdaten des Feinstaubsensoren HM3301 in eine Textdatei "hello.txt"

```
void HM3301_logging(){
    if(sensor.read_sensor_value(buf,29)){
        for(int i=0;i<6;i++){
            PM[i] = parse_result(buf, i+2);
        }
        appendFileDouble(SD, "/hello.txt",PM[3],1);
        appendFile(SD, "/hello.txt", " ");
        appendFileDouble(SD, "/hello.txt",PM[4],1);
        appendFile(SD, "/hello.txt", " ");
        appendFileDouble(SD, "/hello.txt",PM[5],1);
        appendFile(SD, "/hello.txt", "\n");
        n++;
    }
}
```

Tabelle 9: Messdaten vom 26.09.2024 für den ersten Messzeitraum für die Kalibrierung

Uhrzeit	PM2,5 HM3301 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	PM10 HM3301 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	PM2,5 MS [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	PM10 MS [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
09:02:11	7	7	18,3	41,7
09:03:02	4	4	18,3	40,2
09:04:06	4	4	18,4	41,9
09:05:02	4	4	18,5	43,7
09:06:12	4	4	18,4	44,4
09:07:00	7	7	18,4	45,0
09:08:13	7	7	18,6	47,1
09:09:27	4	4	19,0	51,2
09:10:00	3	3	19,4	54,8
09:11:07	3	3	19,6	56,7
09:12:33	3	3	19,8	56,7
09:13:08	3	3	19,9	56,5
09:14:11	3	3	20,2	57,5
09:15:11	3	3	20,5	58,8
09:16:10	3	3	20,7	60,5
09:17:14	3	3	20,6	63,9
09:18:27	3	3	20,8	69,0
09:19:12	3	3	21,3	71,6
09:20:36	3	3	21,6	72,0
09:21:02	3	3	21,6	71,6
09:22:17	3	3	21,5	71,5
09:23:20	3	3	21,5	72,5
09:24:24	3	3	21,1	70,4
09:25:17	3	3	20,5	66,1
09:26:11	3	3	19,9	62,5
09:27:00	3	3	19,3	60,5
09:28:37	2	2	18,6	59,3
09:29:32	1	1	17,8	58,0
09:30:07	3	3	17,0	55,9
09:31:14	3	3	16,3	54,7
09:32:09	2	2	15,5	53,0
09:33:21	2	2	14,4	49,4
09:34:11	2	2	13,1	44,2
09:35:35	2	2	11,9	38,4
09:36:05	2	2	10,9	33,0
09:37:07	2	2	10,3	30,6
09:38:15	2	2	1,0	28,5
09:39:19	2	2	0,9	25,3
09:40:14	2	2	0,8	23,5
09:41:04	2	2	0,8	22,5

Uhrzeit	PM2,5 HM3301 [µg/m³]	PM10 HM3301 [µg/m³]	PM2,5 MS [µg/m³]	PM10 MS [µg/m³]
09:42:11	3	3	0,8	22,5
09:43:11	2	2	0,8	23,2
09:44:18	3	3	0,8	23,2
09:45:13	2	2	0,8	22,4
09:46:07	1	1	0,8	21,9
09:47:12	2	2	0,7	19,9
09:48:19	2	2	0,7	17,4
09:49:00	2	2	0,7	15,7
09:50:01	2	2	0,7	15,2
09:51:10	1	1	0,7	15,1
09:52:00	3	3	0,7	14,9
09:53:02	2	2	0,7	15,3
09:54:04	2	2	0,7	15,8
09:55:44	1	1	0,8	16,3
09:56:01	1	1	0,8	17,0
09:57:01	3	3	0,8	17,1
09:58:08	2	2	0,8	16,2
09:59:45	8	8	0,8	15,1
10:00:05	7	7	0,7	14,6
10:01:05	3	3	0,8	14,8
10:02:16	2	2	0,8	14,8
10:03:13	2	2	0,8	14,5
10:04:21	2	2	0,8	14,7
10:05:00	2	2	0,8	14,6
10:06:00	2	2	0,9	14,8
10:07:02	2	2	0,9	15,6
10:08:12	3	3	0,9	16,0
10:09:14	3	3	0,8	16,4
10:10:26	2	2	0,8	16,9
10:11:04	4	4	0,9	17,5
10:12:23	3	3	0,8	17,6
10:13:08	3	3	0,8	17,4
10:14:03	3	3	0,9	17,7
10:15:00	3	3	0,9	18,4
10:16:02	2	2	0,9	18,9
10:17:17	2	2	0,9	19,3
10:18:14	2	2	0,9	19,4
10:19:02	1	1	0,9	19,1
10:20:11	1	1	0,9	19,2
10:21:23	1	1	0,8	19,4
10:22:23	1	1	0,8	19,3
10:23:20	1	1	0,8	19,3

Uhrzeit	PM2,5 HM3301 [µg/m³]	PM10 HM3301 [µg/m³]	PM2,5 MS [µg/m³]	PM10 MS [µg/m³]
10:24:35	1	1	0,8	18,9
10:25:07	1	1	0,8	18,8
10:26:00	1	1	0,8	20,4
10:27:09	1	1	0,8	23,3
10:28:04	1	1	0,8	25,3
10:29:14	1	1	0,8	25,2
10:30:11	1	1	0,8	24,5
10:31:08	0	0	0,8	23,8
10:32:08	0	0	0,7	22,8
10:33:10	1	1	0,7	22,3
10:34:10	1	1	0,7	24,4
10:35:17	1	1	0,8	27,2
10:36:02	0	0	0,8	28,3
10:37:34	0	0	0,8	28,4
10:38:19	0	0	0,8	28,5
10:39:24	0	0	0,8	29,9
10:40:01	0	0	0,8	32,9
10:41:03	1	1	0,8	34,7
10:42:30	1	1	0,8	32,5
10:43:05	1	1	0,8	30,0
10:44:17	1	1	0,8	29,8
10:45:59	0	0	0,8	30,6
10:46:24	0	0	0,8	31,1
10:47:36	0	0	0,8	32,7
10:48:01	0	0	0,8	37,7
10:49:21	0	0	0,8	40,6
10:50:03	0	0	0,8	39,0
10:51:08	4	4	0,8	37,6
10:52:00	1	1	0,8	37,8
10:53:00	1	1	0,8	37,9
10:54:07	1	1	0,8	37,1
10:55:14	0	0	0,8	34,1
10:56:02	0	0	0,9	31,7
10:57:11	0	0	0,9	32,4
10:58:01	0	0	10,3	33,1
10:59:26	0	0	11,1	35,2
11:00:28	0	0	11,9	38,0
11:01:06	0	0	12,4	39,1
11:02:00	0	0	12,9	40,2
11:03:30	1	1	13,4	39,8
11:04:20	4	4	14,0	41,7
11:05:42	1	1	14,5	45,2

Uhrzeit	PM2,5 HM3301 [µg/m³]	PM10 HM3301 [µg/m³]	PM2,5 MS [µg/m³]	PM10 MS [µg/m³]
11:06:09	1	1	15,0	46,5
11:07:59	0	0	15,4	46,8
11:08:01	0	0	15,8	46,9
11:09:11	0	0	16,3	48,4
11:10:08	0	0	17,0	51,1
11:11:10	0	0	17,4	53,9
11:12:10	1	1	17,5	55,7
11:13:00	1	1	17,4	57,1
11:14:02	1	1	17,2	59,0
11:15:12	1	1	17,1	60,0
11:16:14	1	1	17,5	62,2
11:17:16	0	0	18,0	66,4
11:18:01	0	0	18,3	69,5
11:19:11	0	0	18,3	67,3
11:20:13	0	0	18,1	63,1
11:21:35	1	1	17,9	60,3
11:22:00	1	1	17,6	58,8
11:23:22	1	1	17,3	58,5
11:24:12	0	0	17,2	59,0
11:25:34	1	1	17,0	58,9
11:26:24	1	1	16,8	57,6
11:27:21	1	1	16,5	56,2
11:28:33	0	0	16,3	55,9
11:29:13	0	0	16,0	53,7
11:30:43	0	0	15,6	49,3
11:31:10	0	0	15,4	46,9
11:32:25	0	0	14,9	43,7
11:33:22	0	0	14,0	38,8
11:34:07	0	0	13,4	35,1
11:35:04	0	0	13,0	34,0
11:36:09	0	0	12,6	34,9
11:37:01	0	0	12,4	35,9
11:38:16	0	0	12,2	36,3
11:39:21	0	0	12,1	36,5
11:40:41	0	0	12,0	36,8
11:41:03	0	0	11,8	37,3
11:42:15	1	1	11,6	39,2
11:43:30	1	1	11,3	40,4
11:44:02	1	1	11,0	39,1
11:45:04	1	1	10,7	38,0
11:46:09	0	0	10,7	40,4
11:47:04	1	1	10,8	46,1

Uhrzeit	PM2,5 HM3301 [µg/m³]	PM10 HM3301 [µg/m³]	PM2,5 MS [µg/m³]	PM10 MS [µg/m³]
11:48:36	1	1	10,9	50,3
11:49:13	1	1	11,0	51,0
11:50:08	1	1	10,9	50,3
11:51:28	1	1	10,9	49,4
11:52:05	1	1	11,1	51,5
11:53:32	1	1	11,4	53,9
11:54:17	3	3	11,3	54,4
11:55:29	1	1	11,2	54,9
11:56:02	1	1	11,0	56,0
11:57:06	3	3	10,9	56,7
11:58:01	2	2	10,8	56,4
11:59:06	3	3	10,7	55,6
12:00:11	1	1	10,9	56,4
12:01:03	1	1	11,2	59,0
12:02:10	1	1	11,1	58,4
12:03:00	1	1	11,0	56,3
12:04:12	1	1	11,2	59,0
12:05:12	2	2	11,1	60,4
12:06:19	1	1	11,1	61,1
12:07:09	1	1	11,2	60,8
12:08:04	2	2	11,2	59,4
12:09:16	3	3	11,4	59,7
12:10:04	2	2	11,6	60,3
12:11:03	2	2	11,6	59,0
12:12:25	3	3	11,5	57,0
12:13:00	3	3	11,5	55,5
12:14:00	2	2	12,2	58,9
12:15:07	2	2	12,9	64,0
12:16:24	2	2	12,8	63,1
12:17:14	2	2	12,5	59,0
12:18:14	1	1	12,4	56,2
12:19:36	2	2	12,2	52,0
12:20:06	2	2	12,2	50,1
12:21:13	1	1	12,3	50,4
12:22:13	1	1	12,2	50,1
12:23:05	1	1	12,1	51,8
12:24:15	4	4	12,0	54,6
12:25:15	2	2	12,0	56,9
12:26:22	8	8	12,4	60,4
12:27:14	19	22	12,8	64,0
12:28:34	92	111	13,1	67,7
12:29:06	96	116	12,9	68,0



Uhrzeit	PM2,5 HM3301 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	PM10 HM3301 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	PM2,5 MS [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	PM10 MS [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
12:30:12	78	94	12,3	64,4
12:31:04	38	44	12,2	63,7

Tabelle 10: Messdaten vom 26.09.2024 für den zweiten Messzeitraum für die Kalibrierung

Uhrzeit	PM2,5 HM3301 [µg/m³]	PM10 HM3301 [µg/m³]	PM2,5 MS [µg/m³]	PM10 MS [µg/m³]
12:48:57	8	8	11,9	30,5
12:49:26	5	5	12,2	35,7
12:50:40	1	1	12,5	39,0
12:51:25	1	1	12,3	38,9
12:52:21	1	1	12,1	37,6
12:53:14	1	1	12,1	38,1
12:54:20	1	1	12,1	38,7
12:55:14	1	1	11,9	38,0
12:56:24	1	1	11,7	37,2
12:57:04	1	1	11,9	37,7
12:58:40	1	1	12,0	39,6
12:59:11	1	1	11,8	40,9
13:00:17	1	1	11,2	39,7
13:01:04	1	1	10,9	38,8
13:02:26	1	1	10,9	39,3
13:03:46	1	1	10,8	39,2
13:04:00	1	1	10,3	33,6
13:05:05	1	1	10,3	28,4
13:06:12	1	1	11,3	28,7
13:07:05	1	1	12,5	29,6
13:08:06	1	1	13,7	29,8
13:09:10	1	1	15,2	30,9
13:10:08	1	1	16,5	32,8
13:11:23	1	1	17,4	36,0
13:12:33	1	1	18,4	40,6
13:13:36	1	1	19,4	44,0
13:14:20	1	1	20,4	47,3
13:15:19	1	1	21,5	51,8
13:16:40	1	1	22,3	55,8
13:17:36	1	1	23,0	59,9
13:18:24	1	1	23,6	62,7
13:19:39	1	1	24,2	64,7
13:20:45	1	1	24,5	66,3
13:21:01	1	1	23,9	66,2
13:22:44	1	1	22,7	64,9
13:23:00	1	1	21,8	65,3
13:24:33	1	1	20,7	66,7
13:25:06	1	1	19,4	66,9
13:26:17	1	1	18,5	65,6
13:27:01	1	1	17,7	63,0

Uhrzeit	PM2,5 HM3301 [µg/m³]	PM10 HM3301 [µg/m³]	PM2,5 MS [µg/m³]	PM10 MS [µg/m³]
13:28:03	1	1	17,0	61,7
13:29:04	1	1	16,2	59,6
13:30:05	1	1	15,5	55,7
13:31:16	1	1	15,1	54,3
13:32:14	1	1	15,2	55,2
13:33:00	2	2	15,2	54,9
13:34:01	2	2	14,9	53,1
13:35:06	1	1	14,5	50,4
13:36:08	1	1	14,1	48,1
13:37:09	2	2	14,0	49,1
13:38:04	1	1	14,2	51,3
13:39:09	1	1	14,1	52,2
13:40:20	1	1	14,1	52,5
13:41:20	1	1	14,4	55,5
13:42:15	2	2	14,8	58,9
13:43:14	1	1	14,7	58,0
13:44:45	1	1	14,5	55,9
13:45:05	1	1	15,5	58,7
13:46:05	1	1	17,3	66,0
13:47:17	3	3	17,9	68,9
13:48:27	2	2	17,7	66,8
13:49:02	1	1	17,8	66,8
13:50:12	1	1	18,3	69,9
13:51:18	1	1	18,8	72,9
13:52:04	1	1	18,9	74,6
13:53:04	1	1	18,9	75,7
13:54:03	1	1	18,9	75,2
13:55:18	1	1	19,0	75,7
13:56:11	1	1	19,2	78,9
13:57:05	1	1	19,1	80,0
13:58:20	1	1	19,4	82,0
13:59:14	1	1	20,0	85,7
14:00:02	1	1	20,1	86,7
14:01:02	1	1	19,0	81,4
14:02:16	1	1	17,7	74,2
14:03:20	1	1	17,3	70,6
14:04:19	4	4	17,4	70,1
14:05:18	4	4	17,3	69,2
14:06:34	7	7	17,1	67,9
14:07:17	5	5	17,1	68,0
14:08:26	6	6	17,1	67,2
14:09:12	4	4	17,0	65,9

Uhrzeit	PM2,5 HM3301 [µg/m³]	PM10 HM3301 [µg/m³]	PM2,5 MS [µg/m³]	PM10 MS [µg/m³]
14:10:09	3	3	16,8	64,8
14:11:12	4	4	16,6	62,4
14:12:06	3	3	16,6	60,2
14:13:11	3	3	16,7	60,0
14:14:12	1	1	16,7	60,9
14:15:11	1	1	16,6	62,5
14:16:11	1	1	16,5	65,5
14:17:08	2	2	16,4	68,5
14:18:02	1	1	16,4	70,8
14:19:10	2	2	16,6	73,2
14:20:05	1	1	16,5	74,6
14:21:08	1	1	16,3	74,7
14:22:43	1	1	16,4	77,4
14:23:00	1	1	16,8	83,2
14:24:10	1	1	17,3	88,1
14:25:03	1	1	17,9	90,9
14:26:03	2	2	18,3	92,2
14:27:08	1	1	18,5	94,0
14:28:20	2	2	18,5	96,2
14:29:02	1	1	18,1	95,7
14:30:02	1	1	17,5	91,7
14:31:22	1	1	17,2	89,1
14:32:08	1	1	16,9	85,5
14:33:03	1	1	16,8	81,7
14:34:07	1	1	16,7	79,7
14:35:08	1	1	16,7	80,5
14:36:22	1	1	16,8	82,1
14:37:26	1	1	16,8	81,6
14:38:02	1	1	16,8	79,5
14:39:10	3	3	16,7	75,1
14:40:29	3	3	16,5	73,1
14:41:17	1	1	16,5	76,1
14:42:23	1	1	16,5	77,5
14:43:09	2	2	16,6	79,3
14:44:07	9	9	17,0	83,7
14:45:12	4	4	17,5	85,0
14:46:17	1	1	17,7	84,3
14:47:22	1	1	17,5	83,3
14:48:00	2	2	17,2	82,0
14:49:07	1	1	16,9	82,2
14:50:05	1	1	16,5	81,1
14:51:20	1	1	16,0	78,1

Uhrzeit	PM2,5 HM3301 [µg/m³]	PM10 HM3301 [µg/m³]	PM2,5 MS [µg/m³]	PM10 MS [µg/m³]
14:52:20	2	2	15,9	78,7
14:53:11	3	3	15,8	80,0
14:54:24	2	2	15,6	79,1
14:55:00	1	1	15,6	79,6
14:56:07	3	3	15,7	78,0
14:57:16	2	2	15,7	74,6
14:58:23	3	3	15,9	70,9
14:59:00	3	3	15,7	62,3
15:00:09	2	2	15,5	56,1
15:01:02	1	1	15,7	54,7
15:02:02	1	1	15,7	53,3
15:03:17	2	2	16,0	53,5
15:04:31	1	1	16,7	56,3
15:05:04	1	1	17,5	57,9
15:06:12	1	1	17,9	57,5
15:07:12	1	1	18,2	55,6
15:08:19	1	1	18,4	52,4
15:09:04	1	1	18,7	50,6
15:10:09	1	1	18,8	48,0
15:11:33	2	2	18,7	44,0
15:12:35	1	1	18,5	41,7
15:13:20	1	1	18,3	39,8
15:14:01	2	2	18,0	37,6
15:15:06	1	1	17,8	37,1
15:16:05	1	1	17,9	39,5
15:17:01	1	1	18,3	44,4
15:18:00	1	1	18,7	47,0
15:19:05	1	1	18,7	45,5

Tabelle 11: Messdaten vom 28.10.2024 für die Kalibrierung

Für die Berechnung der Messwerte wurde der Werte von HM3301 von MS abgezogen.

Die Werte der Abweichung sind als Betrag dargestellt.

Uhrzeit	PM2,5 HM3301 [µg/m³]	PM10 HM3301 [µg/m³]	PM2,5 MS [µg/m³]	PM10 MS [µg/m³]	Abweichung PM2,5 [µg/m³]	Abweichung PM10 [µg/m³]
13:59:00	14	15	10,80	18,09	3,20	3,09
14:00:00	16	18	10,74	17,96	5,26	0,04
14:01:00	16	18	10,72	17,75	5,28	0,25
14:02:00	16	18	10,73	17,74	5,27	0,26
14:03:00	16	18	10,70	17,69	5,30	0,31
14:04:00	16	18	10,66	17,82	5,34	0,18
14:05:00	15	17	10,64	18,33	4,36	1,33
14:06:00	16	18	10,64	18,71	5,37	0,70
14:07:00	16	18	10,59	18,79	5,41	0,79
14:08:00	14	15	10,52	19,07	3,48	4,07
14:09:00	16	18	10,45	19,23	5,56	1,23
14:10:00	14	15	10,29	18,77	3,71	3,77
14:11:00	14	15	10,12	18,02	3,88	3,02
14:12:00	15	17	10,02	17,75	4,98	0,75
14:13:00	14	14	9,95	18,09	4,05	4,09
14:14:00	14	15	9,89	18,41	4,11	3,41
14:15:00	14	14	9,81	18,68	4,19	4,68
14:16:00	14	15	9,73	19,28	4,27	4,28
14:17:00	14	14	9,64	19,79	4,36	5,79
14:18:00	14	14	9,54	20,13	4,46	6,13
14:19:00	14	14	9,40	20,00	4,60	6,00
14:20:00	14	14	9,28	19,81	4,72	5,81
14:21:00	14	14	9,17	19,77	4,83	5,77
14:22:00	13	13	9,05	19,87	3,95	6,87
14:23:00	13	13	8,93	19,71	4,07	6,71
14:24:00	13	13	8,79	19,08	4,21	6,08
14:25:00	13	13	8,65	18,56	4,35	5,56
14:26:00	13	13	8,55	18,50	4,45	5,50
14:27:00	13	13	8,46	18,48	4,54	5,48
14:28:00	14	14	8,37	18,56	5,63	4,56
14:29:00	13	13	8,30	18,72	4,70	5,72
14:30:00	13	13	8,22	18,57	4,78	5,57
14:31:00	13	13	8,12	18,20	4,88	5,20
14:32:00	13	13	8,00	17,59	5,00	4,59
14:33:00	13	13	7,86	16,76	5,14	3,76
14:34:00	13	13	7,74	16,22	5,26	3,22



Uhrzeit	PM2,5 HM3301 [µg/m³]	PM10 HM3301 [µg/m³]	PM2,5 MS [µg/m³]	PM10 MS [µg/m³]	Abweichung PM2,5 [µg/m³]	Abweichung PM10 [µg/m³]
14:35:00	13	13	7,66	15,96	5,34	2,96
14:36:00	13	13	7,57	15,42	5,43	2,42
14:37:00	13	13	7,53	14,87	5,47	1,87
14:38:00	11	11	7,53	14,53	3,47	3,53
14:39:00	13	13	7,53	14,39	5,47	1,39
14:40:00	11	11	7,53	14,40	3,47	3,40
14:41:00	13	13	7,52	14,41	5,48	1,41
14:42:00	11	11	7,50	14,65	3,50	3,65
14:43:00	13	13	7,45	14,55	5,55	1,55
14:44:00	13	13	7,37	13,91	5,63	0,91
14:45:00	13	13	7,35	13,45	5,65	0,45

Tabelle 12: Messdaten vom 16.11.2024

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
22	19	13	403,39	71,61	63,96	-3,08	1013,62	10,95	12:40:00	0,07	11,0402997	53,150355
21	18	13	403,39	73,81	63,9	-2,08	1013,53	11,08	12:40:00	0,07	11,0402997	53,150355
21	18	13	403,39	76,48	64,03	-2	1013,48	11,05	12:40:00	0,07	11,0402997	53,150355
22	19	13	403,39	78,69	64,17	-3,16	1013,6	10,91	12:40:00	0,07	11,0402997	53,150355
22	19	13	403,39	81,74	64,68	-5,08	1013,8	10,85	12:41:16	0,07	11,0387005	53,1500272
22	19	13	403,39	84,36	64,91	-7,16	1014,06	10,68	12:41:31	0,07	11,0387005	53,1500272
22	19	13	403,39	86,52	65,52	-8,74	1014,26	10,58	12:41:31	0,07	11,0387005	53,1500272
21	18	13	403,39	89,27	65,85	-10,15	1014,44	10,51	12:42:06	22,69	11,0369765	53,1491367
21	18	13	403,39	91,2	66	-10,73	1014,53	10,52	12:42:06	22,69	11,0369765	53,1491367
20	17	12	403,39	93,31	65,68	-10,57	1014,52	10,47	12:42:33	19,72	11,0391075	53,148479
20	17	12	403,39	94,89	65,91	-9,82	1014,45	10,44	12:42:33	19,72	11,0391075	53,148479
20	17	12	403,39	94,48	65,89	-9,9	1014,44	10,38	12:43:05	19,67	11,0415967	53,1478842
20	17	12	403,39	95,99	66,24	-10,73	1014,5	10,35	12:43:05	19,67	11,0415967	53,1478842
20	17	12	403,39	98,22	66,35	-12,31	1014,69	10,34	12:43:26	18,15	11,0433628	53,1480497
21	18	13	403,39	100,45	66,51	-13,06	1014,8	10,31	12:43:38	20,35	11,043274	53,14739
21	18	13	403,39	90,61	67,51	-13,15	1014,83	10,25	12:44:27	20,35	11,043274	53,14739
21	18	13	403,39	96,59	67,11	-13,15	1014,83	10,17	12:44:29	20,35	11,043274	53,14739
20	17	12	403,39	101,9	67,11	-13,31	1014,83	10,15	12:44:29	20,35	11,043274	53,14739

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Langtude	Latitude
20	17	12	403,39	103,72	67,33	-13,98	1014,9	10,14	12:44:29	20,35	11,043274	53,14739
22	19	13	403,39	106,06	67,22	-13,89	1014,92	10,17	12:44:29	20,35	11,043274	53,14739
22	19	13	403,39	107,48	67,03	-13,98	1014,92	10,16	12:44:29	20,35	11,043274	53,14739
22	19	13	403,39	109,65	67,17	-13,65	1014,9	10,15	12:46:00	17,09	11,0435453	53,1411502
22	19	13	403,39	111,83	67,03	-13,23	1014,84	10,14	12:46:00	17,09	11,0435453	53,1411502
22	19	13	403,39	113,48	66,82	-12,65	1014,79	10,14	12:46:17	17,09	11,0440782	53,1404712
22	19	13	403,39	112,65	67,24	-11,73	1014,68	10,13	12:46:46	13,93	11,0449188	53,1394498
22	19	13	403,39	115,58	67,38	-11,32	1014,63	10,13	12:46:58	17,39	11,0453137	53,138924
22	19	13	403,39	117,92	67,57	-10,65	1014,54	10,12	12:47:13	17,08	11,045757	53,1382885
22	19	13	403,39	119,6	67,31	-10,07	1014,47	10,09	12:47:20	11,85	11,0458415	53,1380313
22	19	13	403,39	120,79	67,25	-9,4	1014,38	10,03	12:47:46	11,85	11,045745	53,136862
20	17	12	403,39	121,75	67,68	-9,49	1014,38	9,97	12:47:57	8,69	11,045716	53,136517
21	18	13	403,39	120,97	68,33	-9,4	1014,38	9,94	12:48:13	17,72	11,0458887	53,135684
20	17	12	403,39	122,73	68,87	-9,49	1014,39	9,9	12:48:22	17,72	11,0458887	53,135684
20	17	12	403,39	124,72	68,77	-9,57	1014,41	9,88	12:48:22	17,72	11,0458887	53,135684
20	17	12	403,39	124,91	68,93	-9,99	1014,44	9,89	12:49:02	17,56	11,0464943	53,1337992
20	17	12	403,39	127,84	68,82	-10,32	1014,48	9,9	12:49:02	17,56	11,0464943	53,1337992
20	17	12	403,39	127,94	68,35	-10,15	1014,47	9,9	12:49:24	15,04	11,0466665	53,1327535

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
20	17	12	403,39	128,23	68,43	-9,99	1014,45	9,9	12:49:49	18,59	11,0472145	53,13152217
20	17	12	403,39	129,71	68,51	-9,49	1014,4	9,93	12:50:01	19,26	11,0473705	53,13092067
18	16	11	403,39	132,15	68,21	-8,49	1014,28	9,96	12:50:01	19,26	11,0473705	53,13092067
18	16	11	403,39	131,53	68,18	-8,9	1014,31	9,93	12:50:34	19,26	11,047761	53,12948917
19	17	12	403,39	132,56	68,04	-10,49	1014,46	9,89	12:50:39	19,26	11,04782417	53,1292895
20	17	12	403,39	134,03	67,91	-12,07	1014,66	9,89	12:50:39	19,26	11,04782417	53,1292895
20	17	12	403,39	133,61	68,21	-12,73	1014,76	9,89	12:50:39	19,26	11,04782417	53,1292895
20	17	12	403,39	134,78	68,4	-12,73	1014,78	9,92	12:50:39	19,26	11,04782417	53,1292895
19	17	12	403,39	134,57	68,25	-12,81	1014,78	9,96	12:51:54	16,71	11,05321267	53,12876133
19	17	12	403,39	134,46	68,6	-12,98	1014,81	9,99	12:51:56	16,67	11,05334683	53,12873717
19	17	12	403,39	135,54	68,51	-12,98	1014,81	9,99	12:51:56	16,67	11,05334683	53,12873717
20	17	12	403,39	136,86	68,38	-13,06	1014,81	10	12:52:33	16,02	11,05573367	53,12818
20	17	12	403,39	138,21	68,61	-13,98	1014,89	9,99	12:52:45	19,22	11,05646383	53,12788533
20	17	12	403,39	139,35	68,92	-14,31	1014,96	9,95	12:52:45	19,22	11,05646383	53,12788533
20	17	12	403,39	139,81	68,58	-14,14	1014,95	9,95	12:53:26	19,63	11,059383	53,12704233
21	18	13	403,39	139,81	68,94	-14,14	1014,94	9,94	12:53:26	19,63	11,059383	53,12704233
21	18	13	403,39	140,16	68,88	-13,98	1014,93	9,94	12:53:49	18,65	11,0610995	53,127246
21	18	13	403,39	141,81	68,67	-12,9	1014,82	9,96	12:54:15	16,37	11,06282917	53,12779817

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
21	18	13	403,39	143,98	68,32	-13,23	1014,82	9,97	12:54:15	16,37	11,06282917	53,12779817
20	17	12	403,39	143,62	68,57	-14,48	1014,96	9,95	12:54:41	27,06	11,06390233	53,12887083
20	17	12	403,39	144,23	69,03	-14,98	1015,05	9,92	12:54:41	27,06	11,06390233	53,12887083
22	19	13	403,39	143,98	69,23	-15,14	1015,07	9,89	12:55:12	20,37	11,06534317	53,13032683
22	19	13	403,39	144,48	69,44	-15,23	1015,07	9,88	12:55:12	20,37	11,06534317	53,13032683
22	19	13	403,39	144,35	69,45	-15,31	1015,08	9,89	12:55:12	20,37	11,06534317	53,13032683
22	19	13	403,39	145,85	68,92	-15,23	1015,08	9,89	12:55:12	20,37	11,06534317	53,13032683
22	19	13	403,39	145,1	69,03	-14,56	1015,02	9,91	12:56:19	20,13	11,0682615	53,13306883
22	19	13	403,39	145,72	69,67	-14,39	1014,98	9,92	12:56:19	20,13	11,0682615	53,13306883
22	19	13	403,39	146,1	69,88	-14,06	1014,94	9,92	12:56:34	17,65	11,06822417	53,13378217
22	19	13	403,39	145,85	69,71	-13,81	1014,91	9,92	12:57:02	15,59	11,06796533	53,13494717
22	19	13	403,39	146,99	69,56	-14,23	1014,95	9,94	12:57:16	16,52	11,06822717	53,13551233
22	19	13	403,39	148,29	69,58	-14,64	1015,01	9,93	12:57:23	18,28	11,06852333	53,13580233
22	19	13	403,39	148,29	69,41	-14,73	1015,02	9,91	12:57:39	18,74	11,06920033	53,13645383
21	18	13	403,39	149,2	69,2	-14,64	1015,01	9,9	12:58:08	18,78	11,07042367	53,13760633
21	18	13	403,39	150	69,08	-14,48	1014,98	9,89	12:58:11	18,83	11,070557	53,137728
20	17	12	403,39	150,67	69,38	-13,06	1014,85	9,87	12:58:29	19,15	11,07133333	53,1384575
21	18	13	403,39	152,99	69,51	-11,57	1014,67	9,79	12:58:45	14,91	11,071414	53,138998
20	17	12	403,39	154,53	69,92	-10,4	1014,52	9,69	12:59:00	15,28	11,070586	53,13927983

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
20	17	12	403,39	154,25	70,16	-10,07	1014,46	9,66	12:59:27	16,39	11,06927483	53,1399515
21	18	13	403,39	152,3	70,91	-10,24	1014,47	9,67	12:59:27	16,39	11,06927483	53,1399515
22	19	13	403,39	155,24	70,9	-9,82	1014,43	9,68	12:59:55	16,39	11,06783517	53,140689
22	19	13	403,39	154,11	71,1	-9,74	1014,42	9,63	13:00:06	15,91	11,06727217	53,14100433
20	17	12	403,39	155,1	70,95	-9,74	1014,42	9,56	13:00:11	15,91	11,067036	53,141161
22	19	13	403,39	154,39	70,64	-9,99	1014,44	9,54	13:00:27	16,8	11,066386	53,14171383
22	19	13	403,39	156,98	70,57	-10,07	1014,45	9,54	13:00:43	16,46	11,0658145	53,14229717
21	18	13	403,39	156,54	70,78	-9,99	1014,45	9,52	13:01:00	16,46	11,06520617	53,142916
21	18	13	403,39	155,67	70,95	-9,99	1014,45	9,53	13:01:00	16,46	11,06520617	53,142916
21	18	13	403,39	156,68	70,97	-9,99	1014,45	9,54	13:01:00	16,46	11,06520617	53,142916
21	18	13	403,39	156,83	71,24	-9,9	1014,43	9,54	13:01:50	16,46	11,06359117	53,14478567
21	18	13	398,41	156,83	71,28	-10,07	1014,45	9,55	13:02:17	17,08	11,06249583	53,14571783
20	17	12	403,39	156,68	71,32	-10,07	1014,46	9,56	13:02:17	17,08	11,06249583	53,14571783
21	18	13	403,39	157,42	71,65	-9,99	1014,45	9,62	13:02:17	17,08	11,06249583	53,14571783
22	19	13	403,39	157,86	71,57	-10,07	1014,45	9,67	13:03:00	16,06	11,06023833	53,14689383
22	19	13	403,39	157,56	71,3	-10,07	1014,45	9,7	13:03:03	16,91	11,06007983	53,146972
22	19	13	403,39	158,15	71,26	-9,74	1014,41	9,72	13:03:03	16,91	11,06007983	53,146972
23	20	14	403,39	160,26	70,98	-9,57	1014,39	9,75	13:03:03	16,91	11,06007983	53,146972
22	19	13	403,39	160,26	70,58	-9,4	1014,38	9,77	13:03:03	16,91	11,06007983	53,146972

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
22	19	13	403,39	160,41	70,3	-9,32	1014,38	9,75	13:04:21	17,09	11,05592	53,14909083
22	19	13	403,39	161,48	70,7	-9,07	1014,34	9,72	13:04:21	17,09	11,05592	53,14909083
23	20	14	403,39	161,17	70,56	-8,66	1014,3	9,7	13:04:41	16,43	11,0545945	53,14928033
22	19	13	403,39	162,41	70,42	-8,16	1014,24	9,68	13:04:41	16,43	11,0545945	53,14928033
22	19	13	403,39	162,1	70,3	-7,99	1014,21	9,66	13:04:41	16,43	11,0545945	53,14928033
22	19	13	403,39	161,95	70,48	-8,57	1014,27	9,68	13:05:26	16,43	11,05161017	53,149077
22	19	13	403,39	161,95	70,23	-8,99	1014,33	9,71	13:05:26	16,43	11,05161017	53,149077
22	19	13	403,39	162,41	70,1	-9,32	1014,37	9,74	13:05:26	16,43	11,05161017	53,149077
22	19	13	403,39	163,04	69,93	-9,65	1014,41	9,75	13:06:25	475,58	11,04779417	53,148007
22	19	13	403,39	162,89	69,88	-10,15	1014,46	9,77	13:06:43	17,08	11,04655567	53,1479145
23	20	14	403,39	161,17	69,96	-10,4	1014,49	9,79	13:06:48	15,43	11,0462075	53,14791817
23	20	14	403,39	162,41	69,7	-10,49	1014,5	9,81	13:07:04	13,98	11,0454825	53,14828083
22	19	13	403,39	163,83	69,77	-10,49	1014,5	9,76	13:07:28	0,48	11,04493367	53,14837167
23	20	14	403,39	164,79	69,81	-10,49	1014,5	9,67	13:07:33	0,48	11,0449155	53,14837433
22	19	13	403,39	166,09	69,84	-10,4	1014,5	9,6	13:07:33	0,48	11,0449155	53,14837433
23	20	14	403,39	167,24	70,09	-10,4	1014,5	9,51	13:08:21	0,39	11,044898	53,14837767
22	19	13	403,39	167,24	70,3	-10,32	1014,48	9,46	13:08:23	0,39	11,04489917	53,14837783
22	19	13	403,39	164,79	70,35	-10,24	1014,48	9,44	13:08:39	0,39	11,0448935	53,14837683
22	19	13	403,39	167,91	70,37	-10,24	1014,49	9,45	13:09:01	0,11	11,04489867	53,14836983

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
22	19	13	403,39	168,41	70,49	-10,24	1014,48	9,43	13:09:19	0,28	11,04486817	53,14835817
22	19	13	403,39	167,58	70,59	-10,4	1014,49	9,43	13:09:22	0,11	11,0448635	53,14835733
22	19	13	403,39	165,77	70,67	-10,32	1014,48	9,44	13:09:56	0,07	11,0448395	53,1483635
23	20	14	403,39	165,77	70,55	-10,24	1014,48	9,48	13:09:56	0,07	11,0448395	53,1483635
23	20	14	403,39	167,58	70,58	-10,32	1014,49	9,48	13:09:56	0,07	11,0448395	53,1483635
22	19	13	403,39	169,09	70,56	-10,24	1014,48	9,43	13:10:39	0,67	11,04485483	53,14836983
22	19	13	403,39	169,43	70,51	-10,24	1014,48	9,43	13:10:41	0,15	11,04485317	53,14836967
21	18	13	403,39	170,8	70,55	-10,15	1014,47	9,41	13:11:13	0,19	11,04485467	53,14837183
22	19	13	403,39	168,92	70,52	-10,07	1014,46	9,39	13:11:13	0,19	11,04485467	53,14837183
21	18	13	403,39	167,41	70,45	-10,07	1014,46	9,42	13:11:42	0,2	11,04482667	53,1483675
22	19	13	403,39	166,09	70,51	-9,9	1014,45	9,47	13:11:58	0,33	11,04482783	53,14836817
22	19	13	403,39	169,94	70,46	-9,9	1014,44	9,5	13:12:03	0,33	11,044837	53,1483735
22	19	13	403,39	167,58	70,57	-9,9	1014,44	9,52	13:12:32	6,8	11,04480117	53,14823783
22	19	13	403,39	166,26	70,53	-8,49	1014,32	9,61	13:12:48	6,8	11,04422633	53,148113
22	19	13	403,39	172,19	70,23	-7,07	1014,13	9,69	13:12:48	6,8	11,04422633	53,148113
21	18	13	403,39	168,41	70,05	-6,16	1014	9,75	13:13:15	14,37	11,04278683	53,14795017
22	19	13	403,39	167,41	69,85	-5,99	1013,96	9,8	13:13:36	17,02	11,04139133	53,14795133
22	19	13	403,39	168,75	69,52	-6,41	1014,01	9,83	13:13:49	13,63	11,04053517	53,1481645
21	18	13	403,39	168,58	69,65	-6,41	1014,02	9,84	13:14:08	15,22	11,03921517	53,14846583

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
22	19	13	403,39	168,92	69,7	-6,66	1014,03	9,86	13:14:26	15,87	11,03800867	53,14876
22	19	13	403,39	168,08	69,61	-6,24	1014	9,87	13:14:29	14,22	11,03784383	53,14880033
22	19	13	403,39	168,08	69,71	-4,74	1013,84	9,86	13:14:42	13,26	11,0373865	53,149058
22	19	13	403,39	168,58	69,6	-2,33	1013,58	9,85	13:15:06	13,74	11,03848817	53,14950367
22	19	13	403,39	168,41	69,55	0,25	1013,27	9,85	13:15:27	13,3	11,039491	53,14986
22	19	13	403,39	168,41	69,65	2,33	1013,01	9,86	13:15:27	13,3	11,039491	53,14986
23	20	14	403,39	167,58	69,67	2,41	1012,93	9,85	13:15:56	13,3	11,04040367	53,150448
22	19	13	403,39	168,25	69,98	2,33	1012,97	9,84	13:16:12	0,09	11,0401595	53,15039183
22	19	13	403,39	168,08	70,62	2,33	1012,97	9,8	13:16:12	0,09	11,0401595	53,15039183
22	19	13	403,39	167,24	70,63	2,25	1012,97	9,78	13:16:28	2,22	11,04020833	53,15039867
22	19	13	403,39	167,58	70,69	2,33	1012,97	9,75	13:16:28	2,22	11,04020833	53,15039867
22	19	13	403,39	166,26	70,75	2,33	1012,97	9,74	13:17:18	3,61	11,04023783	53,15038817
22	19	13	403,39	164,31	70,71	2,58	1012,94	9,77	13:17:18	3,61	11,04023783	53,15038817
21	18	13	403,39	151,34	70,72	2,75	1012,92	9,82	13:17:34	3,43	11,04022683	53,15033367
21	18	13	403,39	151,34	70,71	2,75	1012,92	10,18	13:17:34	3,43	11,04022683	53,15033367

Tabelle 13: Messdaten vom 17.11.2024

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
3	3	2	408,37	60,39	49,05	97,36	1001,61	15,65	13:04:14	0,07	11,04019233	53,15042183
3	3	2	408,37	64,22	50,1	97,62	1001,59	15,28	13:04:14	0,07	11,04019233	53,15042183
3	3	2	408,37	67,67	51,19	97,7	1001,58	14,64	13:04:29	0,07	11,04017867	53,15042283
4	4	3	408,37	71,27	53,63	97,62	1001,58	13,56	13:04:39	0,07	11,04017817	53,15043033
4	4	3	408,37	73,34	55,13	97,53	1001,59	12,9	13:05:14	0,13	11,04021683	53,15042717
4	4	3	408,37	75,68	56,99	97,53	1001,59	12,39	13:05:14	0,13	11,04021683	53,15042717
5	5	4	408,37	78,17	59,16	97,28	1001,61	11,67	13:05:14	0,13	11,04021683	53,15042717
6	6	4	408,37	80,29	60,92	97,28	1001,62	11,08	13:05:45	0,09	11,040218	53,15041867
6	6	4	408,37	83,34	61,57	97,53	1001,59	10,88	13:05:45	0,09	11,040218	53,15041867
6	6	4	408,37	85,49	62,56	97,36	1001,6	10,63	13:05:45	0,09	11,040218	53,15041867
6	6	4	408,37	88,3	63,27	97,2	1001,62	10,45	13:06:42	0,02	11,04021017	53,15041667
7	7	5	408,37	90,02	63,64	96,86	1001,65	10,39	13:06:42	0,02	11,04021017	53,15041667
7	7	5	408,37	91,81	64,16	96,86	1001,66	10,51	13:07:12	0,02	11,04021933	53,15042883
7	7	5	408,37	94,1	64,07	96,86	1001,66	10,59	13:07:15	0,06	11,04021733	53,15042967
7	7	5	408,37	95,4	63,94	96,86	1001,67	10,62	13:07:15	0,06	11,04021733	53,15042967
7	7	5	408,37	95,88	64,32	97,03	1001,65	10,66	13:07:15	0,06	11,04021733	53,15042967
7	7	5	408,37	96,71	64,14	96,95	1001,65	10,73	13:07:15	0,06	11,04021733	53,15042967
10	10	7	408,37	99,02	63,8	97,11	1001,64	10,78	13:08:21	0,02	11,0401845	53,1504445

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
21	18	13	408,37	100,45	63,75	97,2	1001,63	10,81	13:08:46	0,02	11,04019733	53,15043183
23	20	14	408,37	101,19	63,61	97,2	1001,62	10,89	13:08:59	0,02	11,040181	53,15043133
23	20	14	408,37	101,56	63,2	97,03	1001,64	11,14	13:09:14	0,24	11,04017483	53,15042733
20	17	12	408,37	105,62	63,1	97,2	1001,63	11,2	13:09:31	0,09	11,04016117	53,150428
19	17	12	408,37	106,43	63,34	97,2	1001,63	11,03	13:09:31	0,09	11,04016117	53,150428
13	13	9	408,37	109,66	63,77	97,11	1001,64	11,01	13:09:44	0,06	11,04016917	53,1504245
11	11	8	408,37	113,25	63,4	97,2	1001,62	10,97	13:10:11	0,02	11,04021083	53,15041983
10	10	7	408,37	115,13	63,05	97,28	1001,62	10,96	13:10:26	0,04	11,0401925	53,15042133
8	8	6	408,37	118,24	63,3	97,28	1001,62	10,92	13:10:26	0,04	11,0401925	53,15042133
10	10	7	408,37	119,78	63,71	96,52	1001,69	10,67	13:10:56	0,15	11,040165	53,15042817
10	10	7	408,37	121,53	63,88	96,69	1001,7	10,55	13:11:06	1,15	11,040179	53,15043967
8	8	6	408,37	123,33	64,35	97,03	1001,66	10,43	13:11:25	0,09	11,0402185	53,15045267
7	7	5	408,37	123,51	64,5	97,2	1001,63	10,4	13:11:38	0,13	11,040218	53,1504665
6	6	4	408,37	124,62	64,34	97,28	1001,62	10,53	13:11:38	0,13	11,040218	53,1504665
7	7	5	408,37	124,72	64,16	97,03	1001,64	10,56	13:11:38	0,13	11,040218	53,1504665
10	10	7	408,37	125,66	64,25	96,86	1001,66	10,56	13:11:38	0,13	11,040218	53,1504665
10	10	7	408,37	126,71	63,91	96,95	1001,67	10,67	13:12:48	0,04	11,040198	53,15045467
7	7	5	408,37	130,7	63,63	96,95	1001,66	10,86	13:12:50	0,02	11,040197	53,15045617
7	7	5	408,37	131,94	63,67	97,03	1001,65	10,81	13:13:10	0,02	11,0401915	53,15045667
7	7	5	408,37	133,11	63,25	96,95	1001,66	10,86	13:13:25	0,04	11,0401885	53,15044383
7	7	5	408,37	135,05	63,52	96,95	1001,66	10,83	13:13:40	0,02	11,04019083	53,1504445
7	7	5	408,37	134,29	64	97,11	1001,64	10,69	13:13:56	0	11,040201	53,15044517

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
8	8	6	408,37	132,57	64,07	97,03	1001,64	10,68	13:13:56	0	11,040201	53,1504452
8	8	6	408,37	132,26	63,94	97,28	1001,63	10,82	13:14:29	0,04	11,0402105	53,1504347
7	7	5	408,37	133	63,36	97,2	1001,63	11	13:14:44	0,04	11,0402002	53,150438
7	7	5	408,37	134,07	62,92	97,03	1001,66	11,24	13:14:59	0,04	11,0401963	53,1504437
9	9	6	408,37	135,38	62,63	97,28	1001,63	11,32	13:15:19	0,02	11,0402043	53,1504455
10	10	7	408,37	133,43	62,54	97,36	1001,61	11,31	13:15:21	0,02	11,0402062	53,1504457
10	10	7	408,37	134,51	62,64	96,95	1001,65	11,29	13:15:21	0,02	11,0402062	53,1504457
10	10	7	408,37	133,32	62,99	97,03	1001,65	11,13	13:15:21	0,02	11,0402062	53,1504457
8	8	6	408,37	137,74	62,74	97,28	1001,63	11,2	13:16:17	0,02	11,0402115	53,1504252
8	8	6	408,37	139,47	62,11	97,2	1001,62	11,3	13:16:31	0,04	11,0402098	53,1504228
9	9	6	408,37	143,81	62,27	97,45	1001,62	11,2	13:16:31	0,04	11,0402098	53,1504228
7	7	5	408,37	147,65	63,13	97,53	1001,58	10,74	13:16:59	0,09	11,0401947	53,1504187
6	6	4	408,37	148,97	64,11	97,2	1001,62	10,34	13:17:14	0	11,0401897	53,150416
5	5	4	408,37	149,5	64,57	97,11	1001,63	10,26	13:17:14	0	11,0401897	53,150416
5	5	4	408,37	148,97	65,23	97,11	1001,63	10,25	13:17:34	0,02	11,0401882	53,1504303
5	5	4	408,37	148,84	65,43	96,95	1001,65	10,26	13:18:01	0	11,0401897	53,1504378
5	5	4	408,37	148,57	65,51	96,95	1001,66	10,2	13:18:17	0	11,0401807	53,1504402
6	6	4	408,37	146,86	65,81	96,61	1001,69	10,24	13:18:17	0	11,0401807	53,1504402
7	7	5	408,37	146,6	65,57	96,27	1001,73	10,38	13:18:17	0	11,0401807	53,1504402
5	5	4	408,37	148,7	65,07	96,44	1001,72	10,54	13:19:03	0	11,0402012	53,1504572
6	6	4	408,37	151,41	64,66	96,44	1001,72	10,66	13:19:03	0	11,0402012	53,1504572
7	7	5	547,81	153,65	63,97	96,95	1001,67	10,64	13:19:03	0	11,0402012	53,1504572

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
5	5	4	478,09	158,03	63,45	96,78	1001,67	10,67	13:19:34	7,28	11,0403118	53,1504847
4	4	3	408,37	153,79	64,22	95,01	1001,84	10,74	13:20:07	21,08	11,0387257	53,1500705
3	3	2	408,37	157,88	63,28	93	1002,08	10,88	13:20:23	19,13	11,0374198	53,1499337
3	3	2	408,37	157,73	63,36	91,74	1002,24	10,75	13:20:28	16,11	11,0370625	53,149898
3	3	2	408,37	161,72	64,74	91,57	1002,29	10,53	13:20:44	19,28	11,0359967	53,1499683
3	3	2	408,37	161,09	65,23	90,73	1002,4	10,25	13:20:44	19,28	11,0359967	53,1499683
3	3	2	408,37	162,19	65,52	90,73	1002,41	10,13	13:20:44	19,28	11,0359967	53,1499683
3	3	2	408,37	162,51	66,17	90,39	1002,43	10,04	13:21:27	19,28	11,0325623	53,1504608
3	3	2	408,37	163,95	66,76	90,9	1002,4	10,09	13:21:50	18,76	11,0306597	53,150542
3	3	2	408,37	167,59	66	91,99	1002,25	10,15	13:22:07	18,76	11,0292238	53,150609
3	3	2	408,37	168,27	65,64	93,42	1002,14	10,14	13:22:23	15,41	11,0280017	53,150661
3	3	2	408,37	165,42	66,15	94,84	1001,94	10,16	13:22:23	15,41	11,0280017	53,150661
2	2	2	403,39	168,95	65,74	95,77	1001,81	10,21	13:22:57	15,41	11,025581	53,1507488
2	2	2	408,37	168,78	65,38	96,36	1001,73	10,23	13:23:15	12,11	11,0242692	53,1508372
2	2	2	408,37	172,82	65,39	95,85	1001,79	10,17	13:23:17	11,89	11,0241545	53,1508357
2	2	2	408,37	168,27	65,41	94,93	1001,86	10,1	13:23:37	11,89	11,025312	53,1506902
2	2	2	408,37	164,93	66,48	93,42	1002,03	10,29	13:23:58	14,63	11,0270325	53,1504468
2	2	2	408,37	164,93	66,26	91,32	1002,28	10,44	13:24:08	20,15	11,0280645	53,1503828
3	3	2	408,37	167,76	65,68	90,39	1002,42	10,56	13:24:28	19,46	11,0301343	53,1502787
4	4	3	408,37	165,92	65,62	90,56	1002,43	10,5	13:24:40	19,26	11,0312105	53,1502113
3	3	2	408,37	164,6	66,76	90,81	1002,4	10,37	13:24:56	19,26	11,0328795	53,1501545
3	3	2	408,37	167,09	66,67	91,06	1002,36	10,27	13:24:56	19,26	11,0328795	53,1501545

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
3	3	2	408,37	167,93	66,81	90,48	1002,43	10,2	13:25:26	23,69	11,0358087	53,1497322
3	3	2	408,37	172,64	66,11	88,88	1002,57	10,2	13:25:26	23,69	11,0358087	53,1497322
3	3	2	408,37	175,18	65,92	88,38	1002,66	10,34	13:26:01	24,15	11,03869	53,1484787
3	3	2	408,37	175,18	65,55	88,8	1002,65	10,41	13:26:03	24,15	11,0388783	53,1484318
2	2	2	408,37	177,24	64,64	89,38	1002,58	10,41	13:26:03	24,15	11,0388783	53,1484318
2	2	2	408,37	175,37	64,63	88,88	1002,6	10,3	13:26:40	24,15	11,0422445	53,1478142
3	3	2	408,37	178	64,57	89,13	1002,63	10,27	13:27:01	23,58	11,0438798	53,1484345
3	3	2	408,37	177,62	64,9	87,7	1002,7	10,2	13:27:11	23,58	11,0443107	53,1489818
3	3	2	408,37	178,96	65,08	86,45	1002,9	10,23	13:27:26	20,93	11,045066	53,1497098
4	4	3	408,37	178	65,2	85,77	1002,98	10,18	13:27:42	21,09	11,0460275	53,150421
4	4	3	0	179,15	65,26	85,61	1003,01	10,15	13:27:57	20,58	11,046567	53,1511852
3	3	2	502,99	179,15	65,14	85,61	1003,02	10,17	13:28:13	16,09	11,0469182	53,1517342
4	4	3	502,99	180,31	65,13	85,35	1003,03	10,12	13:28:13	16,09	11,0469182	53,1517342
4	4	3	502,99	180,31	65,03	84,77	1003,09	10,15	13:28:52	19,15	11,048454	53,1528328
4	4	3	502,99	178,76	64,71	84,26	1003,16	10,24	13:28:52	19,15	11,048454	53,1528328
4	4	3	408,37	175,37	65,45	84,43	1003,16	10,46	13:28:52	19,15	11,048454	53,1528328
3	3	2	408,37	178,38	65,03	84,77	1003,11	10,51	13:28:52	19,15	11,048454	53,1528328
3	3	2	408,37	180,12	65,3	84,85	1003,11	10,4	13:29:48	15,83	11,0491823	53,1509692
3	3	2	408,37	186,17	65,04	85,1	1003,09	10,33	13:30:04	21,78	11,0500115	53,1503433
3	3	2	408,37	185,55	64,97	86,45	1002,94	10,24	13:30:04	21,78	11,0500115	53,1503433
3	3	2	408,37	184,72	65,83	87,2	1002,84	10,27	13:30:40	20,43	11,0514608	53,1490462
3	3	2	408,37	184,72	65,54	87,62	1002,75	10,25	13:30:53	20,41	11,0504533	53,1487257

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
2	2	2	408,37	185,96	65,85	86,19	1002,98	10,21	13:30:58	21,04	11,050065	53,1486002
3	3	2	403,39	184,61	65,33	85,77	1003,08	10,23	13:31:25	20,85	11,047929	53,1480598
3	3	2	408,37	184,11	65,33	86,61	1002,88	10,09	13:31:25	20,85	11,047929	53,1480598
3	3	2	408,37	185,03	65,49	87,03	1002,83	9,98	13:31:44	20,63	11,0463612	53,1479545
3	3	2	408,37	185,13	65,53	87,96	1002,74	9,91	13:32:13	15	11,0440233	53,1481742
3	3	2	408,37	185,13	65,85	87,54	1002,75	9,86	13:32:26	15	11,0435465	53,1477052
3	3	2	408,37	182,29	67,44	87,29	1002,81	9,75	13:32:47	19,78	11,0429077	53,1466887
3	3	2	408,37	184,31	67,36	87,37	1002,83	9,63	13:32:47	19,78	11,0429077	53,1466887
3	3	2	408,37	185,75	67,09	87,54	1002,8	9,62	13:33:01	21,08	11,042476	53,1459888
3	3	2	408,37	185,03	66,88	87,37	1002,79	9,63	13:33:39	23,85	11,0422863	53,1438887
3	3	2	408,37	184,71	66,83	87,2	1002,84	9,66	13:33:39	23,85	11,0422863	53,1438887
3	3	2	408,37	184,92	66,96	86,95	1002,84	9,7	13:34:03	22,15	11,042155	53,1425737
3	3	2	403,39	186,08	66,27	86,87	1002,85	9,78	13:34:11	22,09	11,0425828	53,1421885
3	3	2	408,37	187,9	66,29	86,78	1002,88	9,76	13:34:11	22,09	11,0425828	53,1421885
3	3	2	408,37	186,61	66,35	87,45	1002,79	9,72	13:34:11	22,09	11,0425828	53,1421885
3	3	2	408,37	186,17	67,34	88,54	1002,67	9,66	13:34:58	22,09	11,0445842	53,1398157
3	3	2	403,39	186,5	66,87	89,05	1002,61	9,62	13:35:28	21,5	11,045739	53,1382985
3	3	2	408,37	186,4	66,67	88,96	1002,6	9,69	13:35:41	19,59	11,045915	53,137604
3	3	2	408,37	185,13	67,29	89,64	1002,55	9,69	13:35:41	19,59	11,045915	53,137604
3	3	2	403,39	183,5	68,26	90,22	1002,47	9,58	13:35:41	19,59	11,045915	53,137604
3	3	2	403,39	177,81	68,99	90,22	1002,45	9,54	13:36:11	19,45	11,045783	53,136019
3	3	2	408,37	177,43	69,77	89,8	1002,49	9,55	13:36:40	18,22	11,046347	53,1345335

PM10 [µg/m³]	PM2.5 [µg/m³]	PM1.0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
3	3	2	403,39	181,89	68,73	89,3	1002,55	9,67	13:36:56	21,71	11,0465452	53,1337103
4	4	3	403,39	186,38	68,03	88,71	1002,62	9,73	13:36:56	21,71	11,0465452	53,1337103
3	3	2	408,37	184,52	67,46	89,13	1002,6	9,87	13:36:56	21,71	11,0465452	53,1337103
3	3	2	408,37	185,87	67,06	89,8	1002,52	10,03	13:37:30	23,22	11,0471648	53,1316678
3	3	2	408,37	186,61	66,73	89,8	1002,51	9,99	13:37:30	23,22	11,0471648	53,1316678
3	3	2	408,37	188,01	66,35	89,97	1002,49	9,95	13:38:17	12,74	11,047932	53,1293978
2	2	2	403,39	185,55	66,92	89,97	1002,49	9,91	13:38:30	12,74	11,0477353	53,1299712
3	3	2	408,37	185,45	67,73	89,05	1002,57	9,89	13:38:49	23,61	11,0474578	53,1310608
3	3	2	408,37	186,59	67,96	89,05	1002,6	9,88	13:38:49	23,61	11,0474578	53,1310608
3	3	2	408,37	186,82	67,41	89,22	1002,58	9,8	13:39:23	21,19	11,0465347	53,1328727
3	3	2	408,37	185,13	68,21	89,38	1002,56	9,77	13:39:36	21,19	11,0466822	53,1335452
3	3	2	403,39	181,69	69,13	89,55	1002,53	9,74	13:39:36	21,19	11,0466822	53,1335452
3	3	2	408,37	181,89	69,44	90,06	1002,51	9,65	13:39:57	21,19	11,0463275	53,1345578
3	3	2	408,37	186,59	68,95	89,97	1002,47	9,54	13:40:13	21,26	11,0459947	53,1353877
5	5	4	408,37	186,19	68,78	89,89	1002,51	9,51	13:40:13	21,26	11,0459947	53,1353877
4	4	3	403,39	190,19	67,37	89,38	1002,53	9,56	13:40:13	21,26	11,0459947	53,1353877
4	4	3	403,39	186,93	67,55	88,63	1002,62	9,6	13:41:14	23,74	11,0452843	53,1389352
4	4	3	408,37	189,97	67,57	88,63	1002,63	9,55	13:41:14	23,74	11,0452843	53,1389352
4	4	3	408,37	192,66	66,91	87,45	1002,76	9,51	13:41:41	22,02	11,0442155	53,1403307
3	3	2	403,39	194,15	66,6	86,78	1002,86	9,51	13:41:41	22,02	11,0442155	53,1403307
3	3	2	408,37	0	100	3650,	1002,88	9,55	13:42:02	21,37	11,0433837	53,1413983
3	3	2	408,37	0	100	3650,	645,04	33,69	13:42:23	20,3	11,0424312	53,1422987

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
4	4	3	408,37	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:42:47	21,45	11,0423148	53,1435587
4	4	3	408,37	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:42:52	21,98	11,042328	53,1438508
4	4	3	408,37	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:43:17	22,63	11,042246	53,1452633
4	4	3	0	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:43:17	22,63	11,042246	53,1452633
4	4	3	502,99	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:43:40	23,85	11,0428708	53,1465683
4	4	3	502,99	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:44:08	10,02	11,0437608	53,1479923
4	4	3	502,99	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:44:24	20,41	11,0428793	53,1479367
3	3	2	502,99	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:42:58	20,41	11,0427178	53,1479103
3	3	2	408,37	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:42:58	20,41	11,0427178	53,1479103
3	3	2	408,37	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:45:09	22,61	11,0389445	53,1485317
3	3	2	408,37	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:45:25	21,45	11,0375918	53,1488783
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:45:25	21,45	11,0375918	53,1488783
4	4	3	408,37	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:45:51	19,67	11,0366988	53,1497928
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:46:07	19,48	11,0379632	53,1499115
3	3	2	408,37	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:46:07	19,48	11,0379632	53,1499115
4	4	3	408,37	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:46:07	19,48	11,0379632	53,1499115
4	4	3	408,37	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:46:46	8,22	11,0403028	53,1504715
4	4	3	408,37	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:47:09	8,22	11,040382	53,1504118
4	4	3	408,37	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:47:31	0,5	11,040537	53,1505795
4	4	3	408,37	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:47:47	1,02	11,0405742	53,1506657
5	5	4	408,37	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:47:57	3,02	11,0405867	53,1506348
5	5	4	408,37	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:48:19	0,61	11,0404792	53,1505955

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
5	5	4	408,37	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:48:35	0,57	11,0405067	53,1505808
5	5	4	408,37	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:48:52	1,78	11,0405097	53,1506235
4	4	3	408,37	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:49:08	1,93	11,04048	53,1506425
5	5	4	408,37	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:49:08	1,93	11,04048	53,1506425
6	6	4	408,37	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:49:24	1,31	11,0404938	53,1506142
6	6	4	408,37	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:49:45	1,17	11,040346	53,1505377
6	6	4	413,35	0	100	3650,63	645,04	33,69	13:49:45	1,17	11,040346	53,1505377

Tabelle 14: Messdaten vom 18.11.2024

PM10 [µg/m³]	PM2.5 [µg/m³]	PM1.0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
4	4	3	413,35	30,17	46,32	83,93	1003,21	20,56	15:04:16	6,39	11,0398635	53,1502013
5	5	4	413,35	32,35	46,31	84,01	1003,21	20,57	15:04:16	6,39	11,0398635	53,1502013
6	6	4	413,35	34,82	45,86	83,93	1003,2	20,59	15:04:30	6,39	11,0398635	53,1502013
7	7	5	413,35	41,65	43,35	83,84	1003,2	19,84	15:05:00	2,65	11,0400025	53,150338
8	8	6	413,35	47,25	42,98	83,84	1003,22	17,3	15:05:12	2,06	11,0400083	53,1503332
10	10	7	408,37	51,52	45,92	84,1	1003,19	14,77	15:05:12	2,06	11,0400083	53,1503332
8	8	6	408,37	54,75	48,69	84,1	1003,2	13,18	15:05:12	2,06	11,0400083	53,1503332
8	8	6	408,37	57,59	50,61	83,93	1003,2	12,49	15:05:49	2,06	11,0400083	53,1503332
8	8	6	408,37	60,79	52,73	83,84	1003,22	11,67	15:06:04	2,06	11,0400083	53,1503332
8	8	6	408,37	63,39	54,21	83,76	1003,24	11,21	15:06:32	0,8	11,0401053	53,1504727
7	7	5	408,37	66,91	55,19	83,59	1003,23	10,9	15:06:34	1,69	11,0400857	53,1504675
6	6	4	408,37	69,25	56,82	83,76	1003,23	10,25	15:06:34	1,69	11,0400857	53,1504675
5	5	4	408,37	72,32	58,42	83,59	1003,24	9,64	15:07:14	5	11,039955	53,1505813
5	5	4	403,39	74,86	59,71	83,59	1003,25	9,15	15:07:29	0,56	11,0399485	53,1505918
5	5	4	403,39	77,01	61,28	83,51	1003,26	8,72	15:07:29	0,56	11,0399485	53,1505918
4	4	3	408,37	79,52	62,36	81,83	1003,41	8,38	15:07:29	0,56	11,0399485	53,1505918
4	4	3	408,37	82,11	63,12	81,49	1003,54	8,31	15:08:15	0,39	11,0401465	53,1504592
4	4	3	408,37	84,62	62,41	83,17	1003,34	8,31	15:08:15	0,39	11,0401465	53,1504592

PM10 [µg/m³]	PM2.5 [µg/m³]	PM1.0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
4	4	3	408,37	86,65	62,3	83,84	1003,23	8,51	15:08:15	0,39	11,0401465	53,1504592
4	4	3	408,37	89,44	61,57	83,93	1003,21	8,83	15:09:02	0,07	11,0402202	53,1504363
4	4	3	408,37	92,02	61,5	84,1	1003,2	8,8	15:09:17	0,06	11,0401995	53,1504355
4	4	3	408,37	94,64	61,82	83,93	1003,2	8,58	15:09:33	0,2	11,0401978	53,1504338
4	4	3	408,37	94,25	61,63	83,84	1003,21	8,65	15:09:48	0,02	11,040201	53,1504412
4	4	3	408,37	95,65	61,66	83,68	1003,24	8,73	15:09:59	0	11,0401998	53,1504303
4	4	3	408,37	98,43	61,47	83,76	1003,24	8,75	15:10:14	0,02	11,0402072	53,1504297
3	3	2	408,37	101,31	61,66	84,01	1003,2	8,73	15:10:29	0	11,0402025	53,1504263
3	3	2	408,37	103,65	62,18	84,18	1003,18	8,53	15:10:36	0,02	11,0402002	53,1504292
5	5	4	408,37	104,82	62,92	84,18	1003,18	8,22	15:10:54	0	11,0402058	53,1504347
7	7	5	408,37	106,57	63,59	84,01	1003,2	8	15:10:54	0	11,0402058	53,1504347
7	7	5	408,37	108,02	64,22	84,01	1003,2	7,89	15:11:38	0,17	11,0402063	53,1504285
6	6	4	408,37	109,95	64,53	83,42	1003,25	7,89	15:11:38	0,17	11,0402063	53,1504285
7	7	5	408,37	111,88	64,82	83,93	1003,22	7,86	15:11:38	0,17	11,0402063	53,1504285
7	7	5	408,37	113,25	65,16	84,1	1003,18	7,82	15:12:10	0	11,0401905	53,1504257
6	6	4	408,37	114,81	64,94	83,76	1003,22	8,08	15:12:38	0,02	11,0402095	53,15043
5	5	4	408,37	116,83	64,62	83,93	1003,22	8,17	15:12:50	0,04	11,0402182	53,1504253
6	6	4	408,37	118,33	64,68	83,34	1003,26	8,06	15:12:50	0,04	11,0402182	53,1504253
7	7	5	408,37	120,73	64,65	83,76	1003,24	8,01	15:13:08	0,06	11,0402185	53,1504195
7	7	5	408,37	123,33	64,56	84,01	1003,2	8,04	15:13:30	10,32	11,0405377	53,150308
6	6	4	408,37	125,09	64,72	82,67	1003,29	7,96	15:13:43	16,91	11,039754	53,150146
4	4	3	403,39	128,48	65,89	80,4	1003,56	7,8	15:13:58	20,52	11,038543	53,1500013

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
4	4	3	403,39	130,6	65,89	76,8	1004	7,8	15:13:58	20,52	11,038543	53,1500013
3	3	2	403,39	129,68	64,89	76,21	1004,14	7,89	15:14:30	18,87	11,0363003	53,1497463
3	3	2	403,39	132,36	65,15	75,79	1004,16	7,96	15:14:48	22,17	11,0366452	53,1492987
3	3	2	403,39	135,27	64,77	75,12	1004,22	7,91	15:15:03	22	11,0377415	53,1487912
3	3	2	403,39	136,49	64,83	74,78	1004,3	7,78	15:15:03	22	11,0377415	53,1487912
3	3	2	403,39	136,38	65,33	75,29	1004,25	7,74	15:15:20	22,21	11,0391642	53,1484143
3	3	2	403,39	139	65,08	75,79	1004,18	7,76	15:15:37	22,21	11,0406337	53,1480717
2	2	2	403,39	140,65	64,9	75,62	1004,17	7,75	15:16:02	22,21	11,0429262	53,147936
2	2	2	403,39	141,61	64,89	74,03	1004,35	7,7	15:16:05	21	11,043185	53,1480075
2	2	2	403,39	140,06	65,46	72,94	1004,5	7,65	15:16:31	21,52	11,0429933	53,146937
3	3	2	403,39	142,7	66,05	73,36	1004,49	7,64	15:16:43	20,83	11,0426472	53,1463663
3	3	2	403,39	142,46	66,04	72,94	1004,52	7,59	15:16:43	20,83	11,0426472	53,1463663
3	3	2	403,39	142,83	66,1	72,52	1004,55	7,64	15:17:09	18,61	11,0421127	53,1450328
3	3	2	403,39	144,31	66,07	72,6	1004,55	7,65	15:17:09	18,61	11,0421127	53,1450328
3	3	2	403,39	146,47	66,11	72,1	1004,6	7,64	15:17:33	18,61	11,0422652	53,1437495
4	4	3	403,39	147,91	65,64	71,76	1004,64	7,67	15:17:33	18,61	11,0422652	53,1437495
4	4	3	403,39	148,7	65,43	72,18	1004,62	7,72	15:17:33	18,61	11,0422652	53,1437495
3	3	2	403,39	151,41	65,41	72,77	1004,56	7,73	15:18:34	22,15	11,0439253	53,1406788
3	3	2	403,39	151,55	65,5	73,53	1004,47	7,65	15:18:41	22,15	11,0442033	53,1403362
8	8	6	403,39	152,66	65,83	74,2	1004,38	7,59	15:18:41	22,15	11,0442033	53,1403362
6	6	4	403,39	155,52	65,85	75,29	1004,27	7,55	15:18:41	22,15	11,0442033	53,1403362
5	5	4	403,39	154,51	65,78	75,29	1004,26	7,45	15:18:41	22,15	11,0442033	53,1403362

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
4	4	3	403,39	155,23	66,12	75,45	1004,23	7,38	15:19:53	22,17	11,0457625	53,1366482
4	4	3	403,39	154,22	66,51	75,62	1004,21	7,36	15:19:55	22,17	11,0457403	53,1365643
3	3	2	403,39	154,22	67,46	75,45	1004,22	7,28	15:19:55	22,17	11,0457403	53,1365643
3	3	2	403,39	154,65	68,26	75,29	1004,24	7,2	15:19:55	22,17	11,0457403	53,1365643
3	3	2	403,39	158,63	67,89	74,7	1004,29	7,2	15:19:55	22,17	11,0457403	53,1365643
3	3	2	403,39	157,14	67,75	74,61	1004,32	7,24	15:21:12	22,78	11,046838	53,1325027
3	3	2	403,39	160,16	67,53	74,28	1004,36	7,23	15:21:29	22,96	11,0472672	53,1313228
2	2	2	403,39	160,78	67,59	75,29	1004,27	7,24	15:21:29	22,96	11,0472672	53,1313228
2	2	2	403,39	163,95	67,11	75,96	1004,18	7,25	15:21:49	22,96	11,0475958	53,1301435
2	2	2	403,39	167,42	66,68	76,12	1004,15	7,27	15:22:04	22,96	11,0478247	53,1292818
2	2	2	403,39	167,25	66,47	75,87	1004,16	7,25	15:22:20	22,26	11,0480968	53,1283287
3	3	2	403,39	169,82	66,68	75,29	1004,21	7,19	15:22:35	20,24	11,048314	53,1274733
2	2	2	403,39	171,75	66,82	74,61	1004,31	7,15	15:22:50	14,76	11,0484993	53,126723
2	2	2	403,39	173,54	66,77	74,45	1004,34	7,12	15:23:05	20,82	11,0486927	53,1258875
4	4	3	403,39	170,69	66,8	73,78	1004,42	7,11	15:23:12	20,82	11,0488008	53,125475
3	3	2	403,39	169,12	67,12	73,61	1004,44	7,17	15:23:12	20,82	11,0488008	53,125475
3	3	2	403,39	172,82	67,45	73,53	1004,42	7,15	15:23:52	20,56	11,04942	53,1231708
3	3	2	403,39	172,28	67,69	72,69	1004,52	7,06	15:23:52	20,56	11,04942	53,1231708
3	3	2	403,39	173,54	67,87	72,35	1004,59	6,99	15:24:15	20,56	11,0501763	53,1219588
3	3	2	403,39	176,3	67,86	71,76	1004,64	6,92	15:24:15	20,56	11,0501763	53,1219588
3	3	2	403,39	176,86	67,49	71,76	1004,64	6,96	15:24:40	23,43	11,0516458	53,1206185
4	4	3	403,39	177,62	67,5	71,93	1004,68	7,09	15:24:40	23,43	11,0516458	53,1206185

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
3	3	2	403,39	178	66,93	72,43	1004,6	7,22	15:25:07	23,02	11,0533073	53,1192125
3	3	2	403,39	178,38	66,72	71,93	1004,63	7,33	15:25:07	23,02	11,0533073	53,1192125
3	3	2	403,39	178,96	66,81	71,68	1004,67	7,32	15:25:54	20,3	11,0538282	53,1166135
3	3	2	403,39	183,9	66,38	71,85	1004,64	7,37	15:26:09	20,28	11,054515	53,1157785
3	3	2	403,39	181,89	66,18	71,76	1004,66	7,38	15:26:25	20,45	11,0552228	53,1149785
3	3	2	403,39	182,29	66,36	72,1	1004,65	7,33	15:26:42	20,24	11,0560268	53,1141427
3	3	2	403,39	183,7	66,44	71,93	1004,65	7,3	15:26:57	21,65	11,0567987	53,1132975
3	3	2	403,39	184,52	66,26	71,76	1004,65	7,32	15:26:57	21,65	11,0567987	53,1132975
4	4	3	403,39	183,7	66,22	72,02	1004,64	7,36	15:27:19	23,17	11,0577787	53,1122305
4	4	3	403,39	184,52	66,32	72,6	1004,57	7,37	15:27:40	19,52	11,0587933	53,1111475
3	3	2	403,39	182,69	66,61	72,77	1004,54	7,36	15:27:55	20,04	11,059454	53,110416
4	4	3	403,39	182,49	66,05	73,53	1004,46	7,43	15:27:55	20,04	11,059454	53,110416
4	4	3	403,39	184,72	65,78	73,94	1004,4	7,47	15:28:29	20,69	11,0592787	53,1085498
4	4	3	403,39	184,11	65,81	74,45	1004,32	7,44	15:28:45	19,28	11,0586822	53,1077417
4	4	3	403,39	185,55	65,95	73,94	1004,41	7,43	15:29:00	23,8	11,0580997	53,1069488
4	4	3	403,39	86,74	65,81	73,78	1004,42	7,45	15:29:03	21,87	11,0579838	53,1067843
4	4	3	403,39	145,58	66,34	74,87	1004,32	7,41	15:29:21	22,59	11,0572945	53,105851
4	4	3	403,39	167,25	66,65	75,37	1004,25	7,37	15:29:48	21,65	11,0560492	53,1045132
3	3	2	403,39	177,62	66,51	74,2	1004,34	7,36	15:30:01	21,65	11,0562167	53,103816
4	4	3	403,39	179,53	66,54	73,86	1004,41	7,38	15:30:17	23,46	11,0568705	53,1029425
3	3	2	403,39	174,27	66,4	73,53	1004,43	7,4	15:30:27	22,93	11,0572712	53,1024108
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:30:27	22,93	11,0572712	53,1024108

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:31:07	22,93	11,0595478	53,1009177
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:31:25	24,22	11,0612335	53,1006007
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:31:25	24,22	11,0612335	53,1006007
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:31:43	23,87	11,0629535	53,1003107
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:32:12	23,89	11,0657357	53,0998458
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:32:12	23,89	11,0657357	53,0998458
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:32:39	23,87	11,0682532	53,0993812
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:32:55	23,71	11,0697567	53,0990027
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:33:11	23,74	11,071078	53,0984502
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:33:27	24,13	11,072323	53,0978593
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:33:43	22,45	11,073511	53,0972907
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:33:50	22,45	11,0740462	53,0970567
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:34:06	23,87	11,0752515	53,096476
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:34:33	21,43	11,0773943	53,0955955
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:34:36	21,11	11,0776353	53,0955233
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:34:36	21,11	11,0776353	53,0955233
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:35:21	23,8	11,081838	53,0949972
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:35:39	19,98	11,083294	53,0949962
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:35:39	19,98	11,083294	53,0949962
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:36:00	22,58	11,0850668	53,0954102
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:36:22	21,74	11,0869335	53,0959215
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:36:37	21,85	11,0881932	53,0962328

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:36:53	12,78	11,089396	53,0965895
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:37:08	10,93	11,0900342	53,0965233
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:37:10	13,8	11,0901178	53,0965733
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:37:31	19,35	11,0908487	53,0974837
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:37:31	19,35	11,0908487	53,0974837
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:38:35	13,45	11,0927613	53,0985798
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:38:37	16,2	11,0928207	53,098643
2	2	2	0	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:38:37	16,2	11,0928207	53,098643
2	2	2	498,01	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:39:09	19,91	11,094221	53,100011
2	2	2	502,99	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:39:23	17,54	11,0947798	53,1006125
2	2	2	498,01	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:39:23	17,54	11,0947798	53,1006125
2	2	2	0	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:39:55	21,3	11,0972355	53,1015532
4	4	3	502,99	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:39:55	21,3	11,0972355	53,1015532
4	4	3	502,99	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:39:55	21,3	11,0972355	53,1015532
3	3	2	498,01	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:40:53	22,08	11,1017807	53,1029823
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:41:14	17,63	11,1034905	53,1033372
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:41:19	12,22	11,103833	53,1033327
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:41:30	17,37	11,1043098	53,1035463
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:42:04	18,33	11,1023403	53,1043417
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:42:04	18,33	11,1023403	53,1043417
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:42:20	21,85	11,1010815	53,1047247

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:42:52	22,06	11,098422	53,105517
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:43:00	21,21	11,0977968	53,1057088
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:43:21	19,04	11,0961642	53,1061425
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:43:36	20,32	11,0949598	53,1064382
1	1	1	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:43:53	19,37	11,0935258	53,1068193
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:44:06	21,52	11,0924378	53,1070588
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:44:22	22,32	11,0909122	53,10727
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:44:38	20,58	11,089504	53,1075135
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:44:38	20,58	11,089504	53,1075135
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:45:15	20,89	11,0867917	53,1085963
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:45:15	20,89	11,0867917	53,1085963
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:45:44	21,54	11,0852805	53,1097997
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:46:00	21,45	11,0841245	53,1103562
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:46:00	21,45	11,0841245	53,1103562
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:46:21	22,06	11,0825573	53,1109187
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:46:54	19,33	11,0796937	53,11135
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:46:54	19,33	11,0796937	53,11135
100	83	55	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:46:54	19,33	11,0796937	53,11135
10	10	7	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:47:26	16,96	11,0772492	53,1117627
8	8	6	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:47:26	16,96	11,0772492	53,1117627
6	6	4	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:48:02	16,96	11,0751997	53,1127125
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:48:18	19,78	11,0754628	53,1134397

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:48:28	19,78	11,0757515	53,113767
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:48:50	22,58	11,07538	53,1148007
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:48:50	22,58	11,07538	53,1148007
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:48:50	22,58	11,07538	53,1148007
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:49:38	22,67	11,0728105	53,1170362
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:49:38	22,67	11,0728105	53,1170362
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:49:38	22,67	11,0728105	53,1170362
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:50:17	22,15	11,070721	53,118839
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:50:41	22,15	11,0694475	53,11994
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:51:02	21,76	11,068333	53,1209048
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:51:07	20,74	11,0680778	53,1211208
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:51:07	20,74	11,0680778	53,1211208
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:51:47	22,98	11,0659427	53,1229587
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:52:08	20,8	11,0648785	53,1238598
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:52:08	20,8	11,0648785	53,1238598
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:52:08	20,8	11,0648785	53,1238598
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:52:08	20,8	11,0648785	53,1238598
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:52:08	20,8	11,0648785	53,1238598
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:53:28	22,22	11,0633293	53,1281867
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:53:30	22,56	11,0634143	53,1282878
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:53:52	23,11	11,0644015	53,1295158
2	2	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:53:52	23,11	11,0644015	53,1295158

PM10 [µg/m³]	PM2.5 [µg/m³]	PM1.0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:54:31	24,78	11,066714	53,1315013
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:54:31	24,78	11,066714	53,1315013
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:54:31	24,78	11,066714	53,1315013
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:54:31	24,78	11,066714	53,1315013
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:55:18	21,78	11,0681135	53,1339858
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:55:18	21,78	11,0681135	53,1339858
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:55:53	24,04	11,0686268	53,1358822
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:56:09	24,15	11,0695352	53,1367197
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:56:25	23,91	11,070404	53,137547
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:56:53	6,19	11,0716745	53,138745
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:57:09	6,19	11,0710665	53,1390828
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:57:09	6,19	11,0710665	53,1390828
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:57:23	21,65	11,0700532	53,1395412
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:57:23	21,65	11,0700532	53,1395412
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:57:23	21,65	11,0700532	53,1395412
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:57:23	21,65	11,0700532	53,1395412
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:58:37	23,89	11,0653412	53,1427728
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:58:37	23,89	11,0653412	53,1427728
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:59:09	23,52	11,0638708	53,1444372
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:59:27	23,52	11,0629497	53,145356
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:59:30	23,91	11,0627747	53,1455012
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:59:30	23,91	11,0627747	53,1455012

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	15:59:30	23,91	11,0627747	53,1455012
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	16:00:20	24,04	11,0591025	53,1474745
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	16:00:38	23,39	11,0577638	53,14818
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	16:01:00	23,39	11,0561213	53,1490138
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	16:01:16	23,39	11,0546307	53,1492568
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	16:01:32	23,04	11,053085	53,1492745
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	16:01:32	23,04	11,053085	53,1492745
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	16:01:32	23,04	11,053085	53,1492745
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	16:02:11	23,04	11,0496095	53,148426
3	3	2	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	16:02:11	23,04	11,0496095	53,148426
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	16:02:11	23,04	11,0496095	53,148426
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	16:02:11	23,04	11,0496095	53,148426
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	16:03:15	18,85	11,0440327	53,1483053
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	16:03:15	18,85	11,0440327	53,1483053
5	5	4	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	16:04:00	10,72	11,044708	53,1499045
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	16:04:16	18	11,0435687	53,1501743
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	16:04:16	18	11,0435687	53,1501743
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	16:04:42	13,11	11,0418918	53,1503218
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	16:04:42	13,11	11,0418918	53,1503218
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	16:04:42	13,11	11,0418918	53,1503218
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	16:04:42	13,11	11,0418918	53,1503218
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	16:04:42	13,11	11,0418918	53,1503218
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	16:04:42	13,11	11,0418918	53,1503218

Tabelle 15: Messdaten vom 20.11.2024

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
5	5	4	408,37	0	100	3650,63	645,04	33,69	17:55:44	0	10,408245	53,2471242
5	5	4	408,37	0	100	3650,63	645,04	33,69	17:55:59	1,33	10,4082283	53,2472373
5	5	4	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	17:55:59	1,33	10,4082283	53,2472373
5	5	4	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	17:56:29	1,33	10,4082283	53,2472373
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	17:56:29	1,33	10,4082283	53,2472373
5	5	4	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	17:57:10	12,5	10,4108483	53,2474942
4	4	3	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	17:57:13	12,5	10,4108483	53,2474942
5	5	4	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	17:57:37	12,5	10,4108483	53,2474942
5	5	4	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	17:57:44	16,13	10,4127582	53,24741
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	17:58:09	23,08	10,4142773	53,2471033
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	17:58:26	14,41	10,415082	53,247555
6	6	4	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	17:58:26	14,41	10,415082	53,247555
5	5	4	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	17:58:26	14,41	10,415082	53,247555
6	6	4	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	17:58:26	14,41	10,415082	53,247555
5	5	4	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	17:59:18	14,17	10,4162158	53,2465188
6	6	4	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	17:59:18	14,17	10,4162158	53,2465188
6	6	4	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	17:59:18	14,17	10,4162158	53,2465188
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	17:59:18	14,17	10,4162158	53,2465188

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:00:25	11,96	10,415152	53,2445787
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:00:42	4,22	10,414897	53,2441387
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:00:42	4,22	10,414897	53,2441387
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:00:57	0,48	10,414723	53,2438155
6	6	4	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:01:29	0,48	10,4147902	53,2436988
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04		18:01:34	0,48	10,4147812	53,2437077
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:01:45	0,41	10,4147588	53,243713
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:02:13	14,96	10,4143088	53,2429993
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:02:23	12,04	10,4140735	53,242624
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:02:23	12,04	10,4140735	53,242624
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:02:54	7,8	10,4132107	53,2427738
6	6	4	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:03:15	17,19	10,411945	53,2425945
6	6	4	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:03:15	17,19	10,411945	53,2425945
6	6	4	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:03:49	2,74	10,4103882	53,2425718
6	6	4	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:03:56	12,89	10,4101672	53,24269
5	5	4	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:04:06	12,89	10,410001	53,243064
6	6	4	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:04:22	4,83	10,4099063	53,2435877
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:04:43	9,02	10,409961	53,244198
8	8	6	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:04:43	9,02	10,409961	53,244198
8	8	6	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:05:15	9,02	10,4116455	53,2442615
8	8	6	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:05:28	17,26	10,4125035	53,2444213
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:05:28	17,26	10,4125035	53,2444213

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:06:09	0,07	10,414504	53,2434867
8	8	6	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:06:24	12,39	10,4147258	53,2436402
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:06:41	16	10,4152308	53,2442028
8	8	6	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:06:46	15,93	10,4153932	53,2444035
8	8	6	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:06:46	15,93	10,4153932	53,2444035
8	8	6	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:06:46	15,93	10,4153932	53,2444035
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:07:28	15,93	10,4163453	53,2460463
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:07:42	14,45	10,4163197	53,2465978
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:07:42	14,45	10,4163197	53,2465978
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:08:25	0,13	10,4159615	53,2477202
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:08:32	0,19	10,415951	53,2477412
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:08:43	0,07	10,4159322	53,2477495
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:09:12	15,17	10,4171983	53,2478613
8	8	6	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:09:12	15,17	10,4171983	53,2478613
8	8	6	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:09:44	0,65	10,4183968	53,247993
8	8	6	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:09:46	0,65	10,4184507	53,248011
8	8	6	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:10:12	6,07	10,4187883	53,2486443
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:10:17	4,57	10,4188337	53,2487218
8	8	6	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:10:32	4,32	10,4188697	53,2489165
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:10:47	6,24	10,418919	53,2491797
7	7	5	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:10:47	6,24	10,418919	53,2491797
8	8	6	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:10:47	6,24	10,418919	53,2491797

PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	PM1,0 [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	Gas [%]	rel. Lf. [%]	Höhe [m]	Druck [hPa]	T [°C]	Uhrzeit	v [km/h]	Longitude	Latitude
11	11	8	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:11:30	4,44	10,4185338	53,2499802
10	10	7	403,39	0	100	3650,63	645,04	33,69	18:11:41	2,19	10,4184573	53,249942