

ETE492

BACHELORARBEIT

Luftqualitätsmessung in Bussen

Elifnaz Koç

170504037

Hakan Onay

170504021

Betreuer: Dr. Murat Tümer

30. Juni 2022

KURZFASSUNG

In vielen Innen- oder Außenbereichen wird heute häufig die Luftqualität gemessen, um sowohl der Gesundheit des Menschen als auch Gefahrensituationen vorzubeugen.

Nach unseren Recherchen wurde kein Beispiel gefunden, bei dem die Luftqualität als Innenraumklima in von vielen Menschen genutzten öffentlichen Verkehrsmitteln gemessen wird. Zu diesem Zweck zielt unser Projekt darauf ab, ein Sensormodul herzustellen, das die in öffentlichen Verkehrsmitteln häufig anzutreffenden gesundheitsgefährdenden Gase CO₂, CO, NO₂ und Feinstaub PM2.5 erfasst und diese Werte an den Benutzer übermittelt.

Es ist zu erwarten, dass diese bei Realisierung des Projektes entwickelte Technologie in Bussen der Automobilindustrie Verbreitung findet und dass CO₂-, CO-, NO₂- Gase und PM2.5 Feinstaub, die die menschliche Gesundheit beeinträchtigen können, ständig beobachtet und Risiken vermieden werden.

ABSTRACT

In many indoor or outdoor areas, air quality is often measured to prevent both human health and hazardous situations.

According to my research, no example was found where air quality is measured as the indoor climate in public transport used by many people. To this end, my project aims to produce a sensor module that detects the noxious gases CO₂, CO, NO₂ and particulate matter PM2.5 commonly found in public transport and transmits these values to the user.

It is expected that this technology developed during the realization of the project will be used in buses of the automotive industry and that CO₂, CO, NO₂ gases and PM2.5 particulate matter, which can affect human health, will be constantly monitored and risks avoided.

ÖZET

Günümüzde hem insan sağılığını gözetmek hem de oluşabilecek tehlikeli durumları önleyebilmek için hava kalitesi ölçümleri yapılmaktadır.

Araştırmalarımıza göre pekçok kişinin kullandığı toplu taşıma araçlarında hava kalitesinin iç mekanlarda ölçüldüğü pekçok örnek bulunmamaktadır. Bu amaçla projem, toplu taşıma araçlarında yaygın olarak bulunan CO₂, CO, NO₂ gibi zararlı gazları ve PM2.5 gibi partikül maddeleri algılayan ve bu değerleri kullanıcıya ileten bir sensör modülü üretmeyi hedefliyor.

Projenin neticelendirilmesi sonucunda geliştirilen bu teknolojinin otomotiv endüstrisinin otobüslerinde kullanılması ve insan sağılığını etkileyebilecek CO₂, CO, NO₂ gazlarının ve PM2.5 partikül maddesinin sürekli izlenmesi, risklerden kaçınılması ve önlemler alınması bekleniyor.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichern wir, dass wir die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Zuhilfenahme der ausgewiesenen Hilfsmittel angefertigt haben. Sämtliche Stellen der Arbeit, die im Wortlaut oder dem Sinn nach anderen gedruckten oder im Internet verfügbaren Werken entnommen sind, haben wir durch genaue Quellenangaben kenntlich gemacht. Der Durchführung einer elektronischen Plagiatsprüfung stimmen wir hiermit zu. Die eingereichte elektronische Fassung der Arbeit entspricht der eingereichten schriftlichen Fassung exakt. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht. Wir sind euch bewusst, dass eine wahrheitswidrige Erklärung rechtliche Folgen haben können.

Istanbul, 06.06.2022

Elifnaz Koç

Hakan Onay

Inhaltverzeichnis

| | |
|---|----|
| 1. Einleitung..... | 10 |
| 1.1. Was ist Luftqualität? | 10 |
| 1.2. Veränderung der Luftqualität..... | 10 |
| 1.3. Einfluss des Menschen auf die Luftqualität..... | 10 |
| 1.4. Einfluss des Windes auf die Luftqualität | 11 |
| 1.5. Einfluss der Temperatur auf die Luftqualität | 11 |
| 1.6. Sechs Arten von menschengemachten Luftschadstoffen | 11 |
| 1.7. Feinstaub (PM)..... | 11 |
| 1.8. Stickstoffdioxid | 12 |
| 1.9. Kohlenmonoxid (CO)..... | 12 |
| 1.10. Die Treibhausgase | 12 |
| 1.11. Schadstoffe in Innenräumen..... | 13 |
| 2. Stand der Technik..... | 13 |
| 2.1. Wie wird die Luftqualität gemessen? | 13 |
| 2.2. Luftqualitätsindex (AQI) | 13 |
| 2.3. Innenraumluftrichtlinie | 15 |
| 2.4. Wichtige Punkte für Messung | 17 |
| 2.5. Luftqualitätsmessung in Istanbul | 17 |
| 2.6. Luftqualitätssensoren | 18 |
| 2.7. Wie funktionieren Low-Cost Sensoren? | 19 |
| 2.8. Funktionsprinzipien von Sensoren | 20 |
| 2.9. Luftqualität in Fahrzeugen..... | 22 |
| 3. Methoden..... | 23 |
| 3.1. Komponente | 23 |
| 3.1.1 Raspberry Pi Pico | 23 |
| 3.1.2 Nova PM Sensor | 24 |

| | |
|---|----|
| 3.1.3 MH-Z14A | 24 |
| 3.1.4 MICS-4514 | 26 |
| 3.1.5 Spannungsquelle | 26 |
| 3.1.6 DS1302 | 27 |
| 3.2. Software-Entwicklung..... | 27 |
| 3.2.1 Main Funktion Workflow | 27 |
| 3.3. Hardware-Entwicklung | 28 |
| 3.3.1 PCB in 3D und Integration | 28 |
| 4. Test und Ergebnisse | 30 |
| 4.1. Messungszenerio | 30 |
| 4.2.1 PM2.5 und PM10 Messung | 32 |
| 4.2.2 CO ₂ Messung | 33 |
| 4.2.3 NO ₂ und CO Messung | 35 |
| 5. Ausblick | 37 |
| 6. Zusammenfassung..... | 37 |
| 7. LITERATURVERZEICHNIS | 38 |
| 8. ANHANG | 40 |
| 8.1. Kalibration von NO ₂ und CO Sensor..... | 40 |
| 8.2. Einstellung Real-Time-Clock | 41 |
| 8.3. PM2.5 und PM10 Sensor Funktion | 42 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Unterschied zwischen PM10 und PM2.5 | 12 |
| Abbildung 2: Luftmessstationen in Istanbul..... | 18 |
| Abbildung 3: Luftqualitätssensoren [10]..... | 19 |
| Abbildung 4: Ein low-cost-Sensor saugt Luft an [10] | 19 |
| Abbildung 5: Laserstreusensor [12] | 20 |
| Abbildung 6: Infrarotsensor [12]..... | 21 |
| Abbildung 7: Metaloxidsensor [12]..... | 21 |
| Abbildung 8: Raspberry Pi Pico Pin Diagramm und verfügbare Peripherals | 23 |
| Abbildung 9: Nova PM Sensor | 24 |
| Abbildung 10 Aufbau der MHZ14-A CO ₂ Sensor | 25 |
| Abbildung 11: MICS-4514..... | 26 |
| Abbildung 12: DS1302 | 27 |
| Abbildung 13: Main.py funktion workflow | 28 |
| Abbildung 14: Unserer Entwurf fürs System..... | 29 |
| Abbildung 15: komplettes System nach der Integration | 30 |
| Abbildung 16: Das Gerät im Test..... | 30 |
| Abbildung 17: PM2.5 und PM10 Werte für Metrobus A | 32 |
| Abbildung 18: PM2.5 und PM10 Werte für Metrobus B | 32 |
| Abbildung 19: CO ₂ Werte für Metrobus A | 33 |
| Abbildung 20: CO ₂ Werte für Metrobus B | 34 |
| Abbildung 21: NO ₂ Werte für Metrobus A | 35 |
| Abbildung 22: NO ₂ Werte für Metrobus B | 35 |
| Abbildung 23: CO Werte für Metrobus A..... | 36 |
| Abbildung 24: CO Werte für Metrobus B..... | 36 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Breakpoint und AQI-Index der EPA..... | 15 |
| Tabelle 2: Innenraumluftschadstoffe in verschiedenen Ländern | 16 |
| Tabelle 3: wichtigsten technischen parameter für MH-Z14A | 25 |
| Tabelle 4: wichtigsten technischen parameter für MICS-4514..... | 26 |
| Tabelle 5: wichtigste Parameter für Metrobus A..... | 31 |
| Tabelle 6: wichtigste Parameter für Metrobus B | 31 |
| Tabelle 7:CO Werte für Metrobus A | 35 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------|---|
| AQI | Air Quality Index |
| VOC | Volatile Organic Compound |
| PM | Particulate Matter |
| IR | Infrarot |
| UART | Universal Asynchronous Receiver-Transmitter |
| ADC | Analog Digital Converter |
| EPA | Environmental Protection Agency |

1. Einleitung

1.1. Was ist Luftqualität?

Gute Luftqualität wird im Allgemeinen für Frischluft verwendet. Das bedeutet sehr wenige Feststoffpartikel und weniger Schadstoffe wie Rauch, Staub und Nebel. Eine gute Luftqualität ist für alle Lebewesen und natürlichen Ressourcen sehr wichtig. Die Luft mit vielen festen Partikeln und chemischen Schadstoffen ist meist trüb und gefährlich für alle Lebewesen. Menschen auf der ganzen Welt beschreiben die Luftqualität mit dem Air Quality Index (AQI), der von der Konzentration dieser Schadstoffe abhängig ist. [1]

1.2. Veränderung der Luftqualität

Die Luftqualität ändert sich ständig in Abhängigkeit von der Luftbewegung. Die Luftqualität an einem bestimmten Ort ist das direkte Ergebnis sowohl der Luftbewegung als auch des menschlichen Einflusses auf die Luft.

1.3. Einfluss des Menschen auf die Luftqualität

Geografische Faktoren (z. B. Gebirgszüge, Küsten, Landnutzung) können dazu führen, dass sich Luftschadstoffe in einigen Gebieten ansammeln und von dort an andere Orte gelangen. Die Art und Menge der Schadstoffe, die die Luft verschmutzen, haben jedoch einen größeren Einfluss auf die Luftqualität als geografische Faktoren. Obwohl die meisten Schadstoffe menschlichen Ursprungs sind, gibt es auch Schadstoffe natürlichen Ursprungs. Vulkanische Aktivität und Staubwolken sind beispielsweise natürliche Quellen, die die Luft verschmutzen. Beheizung¹ von Menschen, Transport² (mit Benzin betrieben) und Abgase von Dieselfahrzeugen (Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO_x), Kohlenwasserstoffe (HC) und Blei (Pb) verschmutzen die Luft ernsthaft.) und freigesetzte Schadstoffe aus industriellen Tätigkeiten wirken sich negativer auf die Luft aus. [2]

¹ Holz, Kohle, Heizöl und Erdgas werden als Brennstoff in Öfen und Heizungen verwendet. Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO₂), Stickoxide (NO_x) und Feinstaub entstehen bei der Verbrennung dieser Brennstoffe die Luft verschmutzen.

² (Die Abgase von Benzin- und Dieselfahrzeugen, Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO_x), Kohlenwasserstoffe (HC) und Blei (Pb), verschmutzen die Luft ernsthaft.)

1.4.Einfluss des Windes auf die Luftqualität

Winde beeinflussen die Luftqualität sowohl positiv als auch negativ. Sie sind direkt wirksam bei der Entfernung von verschmutzter Luft aus der Umgebung oder beim Transport von verschmutzter Luft in saubere Umgebungen. Damit sich die auf einer Fläche angesammelten Schadstoffe verteilen können, müssen Windgeschwindigkeiten von mindestens 5 m/s und mehr vorhanden sein³. [3] Schadstoffe, die sich in Bereichen ansammeln, in denen Windsysteme wie Berg-Tal- und Land-See-Brise wirksam sind, können aufgrund dieses Kreislaufs nicht von ihren Schadstoffquellen wegkommen. [2]

1.5.Einfluss der Temperatur auf die Luftqualität

Die Temperatur hat einen Einfluss auf die Luftqualität. In den Wintermonaten ist die Luftqualität in Städten schlechter, vor allem wegen des Heizbedarfs. Außerdem haften bei kaltem Wetter Schadstoffe dicht an der Oberfläche. Bei heißem Wetter steigt die erwärmte Luft auf und setzt Schadstoffe frei, wodurch mehr schädliches Ozon entsteht. [2]

1.6.Sechs Arten von menschengemachten Luftschadstoffen

Der Luftqualitätsindex (AQI) liefert Daten für 6 Schadstoffarten. Diese sind: Feinstaub (PM), Stickstoffdioxid (NO₂), Ozon (O₃), Schwefeldioxid (SO₂), Blei (Pb), und Kohlenmonoxid (CO). [2]

1.7.Feinstaub (PM)

Feinstaub wird auch als Aerosol- oder Feinstaubbelastung bezeichnet. Dies sind primäre Schadstoffe, die direkt von Bränden, Fabrikschornsteinen oder Vulkanen stammen, und sekundäre Schadstoffe, die aus chemischen Reaktionen in der Atmosphäre resultieren, die durch Dinge verursacht werden, die aus Fahrzeugabgasen und Baustellen stammen.

Feinstaub wird nach Größe klassifiziert (wie in der *Abbildung 1*):

PM₁₀ für Partikel kleiner als 10 µm Durchmesser, wie, Schmutz, Staub, Schimmel oder Pollen. [4]

PM_{2.5} wird für Partikel mit einem Durchmesser von weniger als 2,5 µm verwendet, wie, Rauch, Ruß, Metalle oder organische Verbindungen. [4]

³ Nach der Bofor-Skala werden Winde unter 3,3 m/s als Leichtwind und Brise bezeichnet. Windstärken ab 5,5 m/s können als mäßiger und starker Wind angegeben werden. [3]

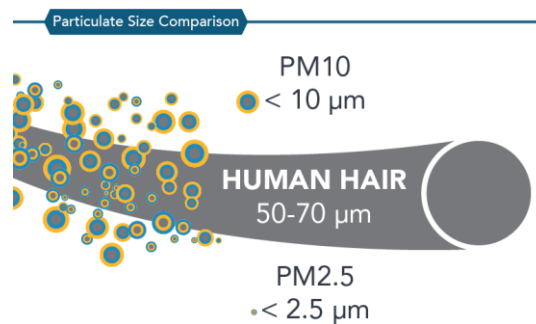


Abbildung 1: Unterschied zwischen PM10 und PM2.5

[5]

1.8. Stickstoffdioxid

Autoabgase sind die größte Quelle der Stickstoffdioxid-Belastung in der Atmosphäre, sie werden aber auch durch Fabriken und Kraftwerke sowie natürlich durch Blitzeinschläge, Vulkane und bei der Zersetzung organischer Stoffe gebildet. Alles, was brennt, erzeugt Stickoxide, da die Luft, die wir atmen, hauptsächlich aus 78 % Stickstoff und 21 % Sauerstoff besteht. Das häufigste davon, Stickstoffdioxid, hat eine rotbraune Farbe und einen charakteristischen Geruch. Wir können sagen, dass Stickstoffdioxid ein aufkommender Schadstoff ist, der hauptsächlich mit dem Verkehr zusammenhängt. Daher ist seine Konzentration in Städten höher. [2]

1.9. Kohlenmonoxid (CO)

Wenn etwas brennt, wird wahrscheinlich Kohlenmonoxid freigesetzt. Kohlenmonoxid ist ein giftiges Gas, das durch die Verbrennung von Kohlenstoff und niedrigem Sauerstoffgehalt entsteht. Als Quellen können Fahrzeuge, fossile Brennstoffe und die Verbrennung von Holz genannt werden. Auch Waldbrände haben einen großen Einfluss auf die Kohlenmonoxidkonzentration. Wenn Kohlenmonoxid mit genügend Sauerstoff versorgt wird, bildet es Kohlendioxid. [2]

1.10. Die Treibhausgase

Kohlendioxid (CO_2), Stickoxide (N_2O) und Methan (CH_4) sind Treibhausgase. Die bedarfsgerechte Verbrennung fossiler Brennstoffe erhöht die Menge dieser Gase. Diese Gase stellen keine große Gefahr für die Atemwege dar, wirken sich jedoch negativ auf das Weltklima aus.

In der Landwirtschaft führen Landnutzungsänderungen in der Landwirtschaft zu einer Erhöhung der Konzentration dieser Gase. Der Übergang von der Nutzung von Kohle zur Nutzung von Erdgas

und erneuerbaren Energieträgern gilt zwar allgemein als unbedenklich, weil er die Kohlendioxidkonzentration senkt, erhöht aber die Konzentration von Treibhausgasen. Je höher dieses Verhältnis ist, desto mehr steigt die globale Durchschnittstemperatur. [2]

1.11. Schadstoffe in Innenräumen

Radongas, Schimmel, Asbest und Formaldehyd sind die häufigsten Schadstoffe in Innenräumen. Die verwendeten Klebstoffe, Lufterfrischer, Dichtstoffe, Farben und Reinigungsmittel enthalten einen hohen Anteil an flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs). Durch das Rauchen in Innenräumen werden neben verschiedenen Chemikalien auch viele Schadstoffe in die Luft eingetragen. [2]

2. Stand der Technik

2.1. Wie wird die Luftqualität gemessen?

Der Air Quality Index (AQI) wird verwendet, um die Luftqualität an einem bestimmten Ort auszudrücken. Wir können den Arbeitstyp mit Thermometern vergleichen. Anstelle der Temperatur gibt AQI die Schadstoffmenge und Schadstoffkonzentration in der Luft an. [6]

2.2. Luftqualitätsindex (AQI)

Der Air Quality Index (AQI) ist eine Skala mit farbcodierten Intervallen. Es wurde hauptsächlich für die Verschmutzungsgrade in Außenumgebungen verwendet, um es den Ländern zu ermöglichen, eine gemeinsame Sprache über die Luftqualität zu verwenden. Die Informationen von AQI geben nicht nur Auskunft über das Ausmaß der Verschmutzung, sondern auch über das potenzielle Gesundheitsrisiko für den Menschen. Informationen in diesem Bereich sind sehr wichtig für ältere Menschen, Kinder und Menschen mit Atemwegs- oder Herzerkrankungen. Dieses Indexsystem wird jedoch nur in der Außenumgebung statt in der Innenumgebung implementiert, obwohl Innenumgebungen wie Arbeitsplätze, Hotels, Schlafzimmer und Theatersäle größere gesundheitliche Auswirkungen auf den Menschen haben als die Außenumgebung. [6] [7]

In der Forschung wird darauf abgezielt, die Verwendung von Index mit IAQ zu verbessern. Es wurde auf der Grundlage einer von der US EPA berechneten Rate zur Berechnung des IAQ Air Quality Index (AQI) entwickelt. [8] Die US-EPA definiert die nationalen Außenluftqualitätsstandards basierend auf den sechs gängigen Luftschadstoffen und der Index wurde mit der folgenden linearen Interpolationsformel berechnet:

$$I_p = (C_p - BP_{Lo}) * \frac{I(Hi) - I(Lo)}{BP(Hi) - BP(Lo)} + I(Lo)$$

(1)

Wo:

I_p = Indexwert für Schadstoff p

C_p = gerundete Schadstoffkonzentration p

BP_{Hi} = Höherer Breakpoint-Wert von C_p

BP_{Lo} = Unterer Breakpoint-Wert von C_p

I_{Hi} = Index-Breakpoint-Wert von BP_{Hi}

I_{Lo} = Index-Breakpoint-Wert von BP_{Lo}

Diese Gleichung (1) wurde auf der Grundlage der Konzentrationsdaten von Luftschadstoffen und der in *Tabelle 1* unten gezeigten Grenzwerte berechnet. In der Tabelle sehen Sie, dass der Index in sechs Kategorien mit einigen Farbcodierungen und Abständen unterteilt ist.

Die von der EPA bereitgestellten Informationen sind jedoch nur in einem aggregierten Index enthalten, der auf den schädlichen Zustand aufmerksam macht und auf den Standort im Freien beschränkt ist.

Es sollte gesagt werden, dass die Informationen hier statisch sind, da es sich um einen Durchschnittswert handelt, da die Luftqualität variabel ist. Außerdem fehlen einige Parameter der Raumluftqualität in der Grenzwerttabelle, wie im Fall von Kohlendioxid (CO₂) und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC).

Tabelle 1: Breakpoint und AQI-Index der EPA

| O₃ (ppm) | PM₁₀ (ug/m³) | PM_{2.5} (ug/m³) | CO (ppm) | SO₂ (ppm) | NO₂ (ppm) | AQI Werte | Niveau von Die Gesundheit Anliegen |
|--------------------------------------|---|--|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------|---|
| 0.000 – 0.059 | 0 – 54 | 0.0 – 15.4 | 0.0 – 4.4 | 0.000 – 0.034 | – | 0 – 50 | Gut |
| 0.060 – 0.075 | 55 – 154 | 15.5 – 40.4 | 4.5 – 9.4 | 0.035 – 0.144 | – | 51 – 100 | Mäßig |
| 0.076 – 0.095 | 155 – 254 | 40.5 – 65.4 | 9.5 – 12.4 | 0.145 – 0.224 | – | 101 – 150 | Ungesund für Empfindlich Gruppen |
| 0.096 – 0.115 | 255 – 354 | 65.5 – 150.4 | 12.5 – 15.4 | 0.225 – 0.304 | – | 151 – 200 | Ungesund |
| 0.116 – 0.374 | 355 – 424 | 150.5 – 250.4 | 15.5 – 30.4 | 0.305 – 0.604 | 0.65 – 1.24 | 201 – 300 | Sehr Ungesund |
| – | 425 – 504 | 250.5 – 350.4 | 30.5 – 40.4 | 0.605 – 0.804 | 1.25 – 1.64 | 301 – 400 | Gefährlich |
| – | 505 – 604 | 350.5 – 500.4 | 40.5 – 50.4 | 0.805 – 1.004 | 1.65 – 2.04 | 401 – 500 | Gefährlich |

2.3. Innenraumluftrichtlinie

Während es für die Außenluftqualität nur sechs Parameter gibt, sollten für die Raumluftqualität zusätzliche Parameter wie Kohlendioxid (CO₂), flüchtige organische Verbindungen (VOC), Radon und Formaldehyd untersucht werden. [8] Die in Tabelle 2 aufgeführten Parameter sind die Parameter, die für die Raumluftqualität wichtig sind. Diese Parameter können aufgrund unterschiedlicher Umgebungen von Land zu Land variieren. Die folgende Tabelle enthält ein Beispiel der für Malaysia verwendeten Parameter. [6]

Tabelle 2: Innenraumluftschadstoffe in verschiedenen Ländern

| Parameter | EPA | HKEPD | SIAQG | DOSH |
|---|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Carbon Monoxide (CO) | 50 ppm | 8.7 ppm | 9 ppm | 10 ppm |
| Ozone (O₃) | 0.06 ppm | 0.06 ppm | 0.05 ppm | 0.05 ppm |
| Particulate Matter (PM₁₀) | 0.6 mg/m ³ | 0.18 mg/m ³ | 0.15 mg/m ³ | 0.15 mg/m ³ |
| Nitrogen Dioxide (NO₂) | 1 ppm | 0.080 ppm | N/A | N/A |
| Formaldehyde (H₂CO) | 2.4 ppm | 0.081 ppm | 0.1 ppm | 0.1 ppm |
| Carbon Dioxide (CO₂) | N/A | 1000 ppm | 1000 ppm | 1000 ppm |
| Volatile Organic Compound (VOC) | N/A | 0.261 ppm | 3 ppm | 3 ppm |
| Temperature (°C) | N/A | 20 – 25.5°C | 23 – 26°C | 23 – 26°C |
| Feuchtigkeit (%) | N/A | 40 – 70% | 40 – 70% | 40 – 70% |

Die Konzentrationen werden mit dem von der Regierung der Vereinigten Arabischen Emirate erstellten Outdoor-AQI berechnet. Die Berechnung ist wie folgt:

$$AQI = \left(\frac{Pollution\ Level}{Pollution\ Standard} \right) * 100 \quad (2)$$

Neben der Raumluft wird auch die thermische Behaglichkeit berücksichtigt. Temperatur und Luftfeuchtigkeit sind die häufigsten physikalischen Faktoren, die die Luftqualität beeinflussen. Obwohl ihre Wirkungen gemeinsam sind, haben sie im Allgemeinen keinen Einfluss aufeinander.

2.4. Wichtige Punkte für Messung

Bei der Standortbestimmung der Messstationen soll nicht nur das Gebiet, in dem sie sich befinden, repräsentiert werden, sondern auch andere Standorte mit ähnlichen Bedingungen in großen Gebieten. Die Stationen sollten sich in einer Höhe von 3,5 - 4 Metern befinden. Der Abstand zu Hindernissen wie Bäumen und Gebäuden sollte angegeben werden. Darüber hinaus ist auch der Abstand zu möglichen Emissionsquellen wichtig. Bei Messungen auf Straßen muss der Abstand von der Mitte der nächsten Fahrspur zur Station selbst mindestens vier Meter betragen. Auf diese Weise wird verhindert, dass Fahrzeuge direkt auf die Station treffen. Bei stark befahrenen Standorten sollte der Abstand zum Straßenrand höchstens zehn Meter betragen. [6]

2.5. Luftqualitätsmessung in Istanbul

Die Messungen wurden von der Direktion für Umweltschutz 1995 mit 2 mobilen Luftmessstationen begonnen. Heute gibt es an 26 Punkten in Istanbul feste Messstationen und 2 mobile Messstationen. Die Messungen wurden von der Direktion für Umweltschutz 1995 mit 2 mobilen Luftmessstationen begonnen. Heute gibt es an 26 Punkten in Istanbul feste Messstationen und 2 mobile Messstationen.

Das Labor für Luftqualität, das zuvor Messungen von SO₂, PM₁₀, NO_x, CO, O₃ durchführte, führt seit 2017 auch Messungen von PM_{2.5}, VOCs und Schwermetallanalysen durch. Neben Parametern wie SO₂, PM₁₀, NO₂, CO und O₃ werden auch meteorologische Parameter wie Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Luftfeuchtigkeit, Druck, Temperatur, Niederschlag gemessen, um Luftqualitätsdaten bei der Messung gesünder bewerten zu können Stationen.

Die Gemeinde ist die einzige Institution, die bis 2013 Messungen durchführte. Im Jahr 2013 begannen 12 weitere Luftqualitätsstationen in Istanbul von der Marmara-Direktion für saubere Luft unter dem Ministerium für Umwelt und Urbanisierung zu messen. Infolgedessen wird die Luft in Istanbul mit 38 Luftqualitätsmessstationen in Istanbul kontinuierlich überwacht. Sie können eine der Stationen in *Abbildung 2* sehen.

Die mit vollautomatischen Geräten gesammelten Daten werden im Stundendurchschnitt an das zentrale Computersystem im Luftlabor der IBB-Umweltschutzdirektion gesendet und der Menschen von Istanbul im Internet zur Verfügung gestellt. [9]



Abbildung 2: Luftmessstationen in Istanbul

2.6. Luftqualitätssensoren

Sensoren für die Luftqualität überwachen Schadstoffe. Lokale Behörden verwalten oft gemeinsam Netze von Monitoren, über die sie die Luftqualität überwachen. Diese Monitore sind recht teuer und benötigen eine sehr gute Infrastruktur. Die daraus gewonnenen Daten werden verwendet, um zu entscheiden, wie auf Luftverschmutzung reagiert werden soll, und um Warnungen für Tage mit schlechter Luftqualität zu erstellen, aber diese Netzwerke können die Verschmutzung in einigen Bereichen übersehen oder kleine Metriken nicht richtig erkennen. Sie messen im Allgemeinen keine Luftgifte Schadstoffe, die eher lokalisiert sind und Krebs und chronische Gesundheitsschäden verursachen können wie Ethylenoxid und giftige Metalle. Dank zweier sich entwickelnder Technologien in Sensoren können diese Mängel behoben werden. [10]

Erstens können Low-Cost Sensoren mit minimalem Design an vielen Orten wie Wearables, Drohnen, Türen und Autos eingesetzt werden. (wie auf dem *Abbildung 3*)

Zweitens haben Bundesbehörden seit vielen Jahren Satelliten mit Luftqualitätssensoren ausgerichtet, um die Forschung auf diesem Gebiet zu unterstützen.

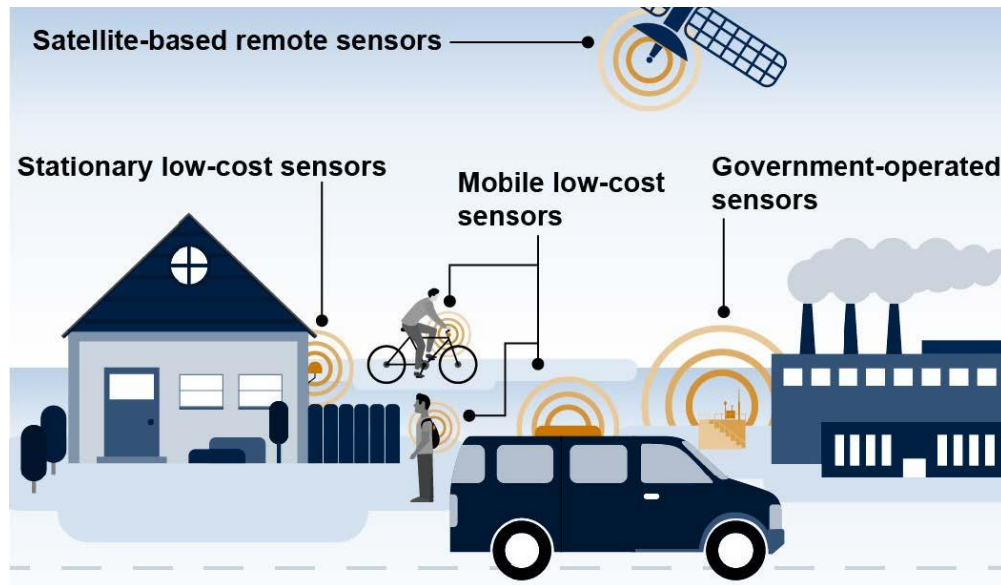


Abbildung 3: Luftqualitätssensoren [10]

2.7. Wie funktionieren Low-Cost Sensoren?

Low-Cost Sensoren verwenden viele Methoden wie Laser und Zähler, um die Anzahl und Größe von Partikeln in einer Umgebung zu verstehen. Sensoren verwenden verschiedene Algorithmen, um die ersten Daten, die sie erhalten, in gewünschte Daten umzuwandeln (wie auf dem Abbildung 4). [10]

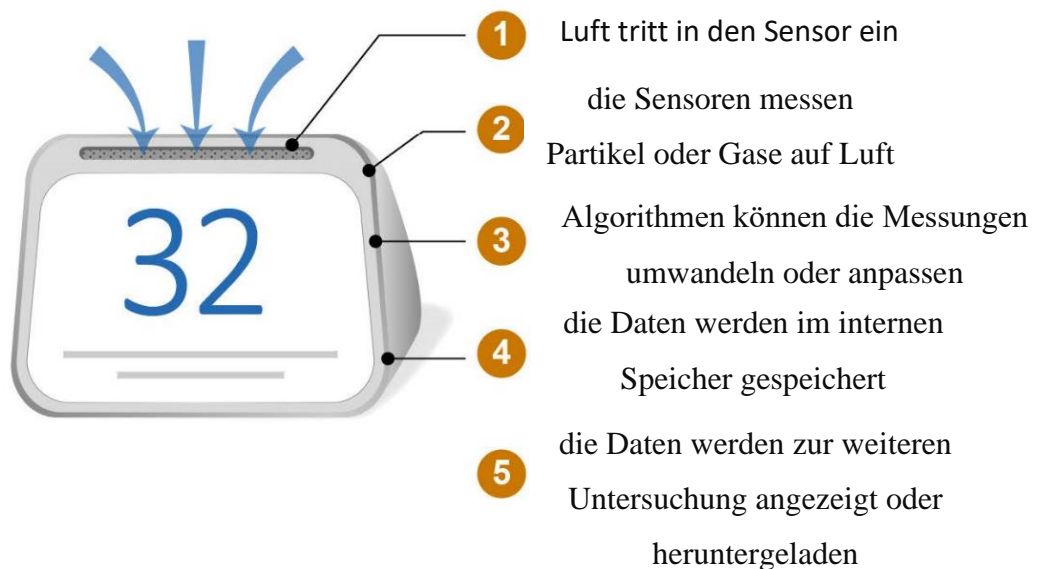


Abbildung 4: Ein low-cost-Sensor saugt Luft an [10]

Sensoren können je nach Einsatz unterschiedliche Aspekte der Luftqualität messen. Stationäre Sensoren messen beispielsweise die Verschmutzung an einem Ort, während mobile Sensoren, wie beispielsweise tragbare Sensoren, die von einer Person getragen werden, die Exposition an mehreren Orten reflektieren.

Da satellitengestützte Sensoren von physikalischen Faktoren beeinflusst werden, kann es zu Interpretationsschwierigkeiten kommen. Heutzutage verwendete satellitengestützte Sensoren können eine begrenzte Anzahl von Schadstoffen messen.

Zusätzlich zu all diesen können Luftschadstoff-Proxys in Low-Cost-Sensortypen enthalten sein. In der Tat können Low-Cost-Sensoren manchmal nicht kalibriert werden, da die Drifts und Fehler der Sensoren zu fehlenden Daten oder einer schlechten Messleistung führen. Obwohl das Kalibrierungsverfahren normalerweise eine gute Lösung ist, ist es in diesem Fall möglicherweise keine gute Lösung. [10]

Eine alternative Lösung ist die Entwicklung virtueller Sensoren. Virtuelle Sensoren können als Luftschadstoff-Proxys definiert werden, die in Low Cost Sensor integriert werden können, indem nach der Kalibrierung Eingaben von Low Cost Sensor-Messungen verwendet werden. Tatsächlich können virtuelle Sensoren parallel zum Einsatz von Low Cost Sensor entwickelt werden. [10]

2.8.Funktionsprinzipien von Sensoren

Einige Sensoren arbeiten nach dem Prinzip der Laserstreuung. Der Sensor verfügt über einen Lüfter, der einen kontrollierten Luftstrom erzeugt, damit die Partikel aus der Umgebung durch einen fokussierten Laserstrahl gelangen. Als Beispiel können wir einen PM-Sensor anführen. [11]

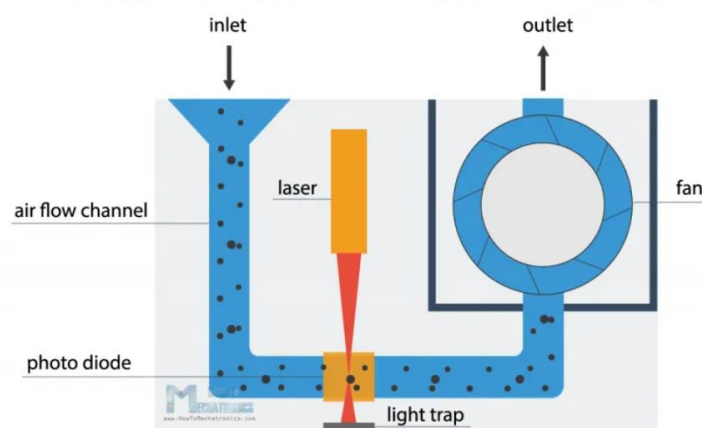


Abbildung 5: Laserstreusensor [12]

Die Partikel verursachen Lichtstreuung (wie auf der Abbildung 5), die von einer Fotodiode detektiert und dann mit Hilfe ihres Mikroprozessors in die PM-Konzentration umgewandelt wird.

Einige Arten von Sensoren verwenden das Infrarotprinzip zur Messung. Eine Infrarotquelle leitet Licht durch eine Röhre, die mit der Luft gefüllt ist, die wir messen. Auf der anderen Seite der Infrarotquelle befinden sich ein optischer Filter und ein IR-Detektor, der die Menge des durchgelassenen IR-Lichts misst (wie auf der Abbildung 6). [13] Als Beispiel können wir den Sensor MH-Z19 nennen, der CO₂ misst.

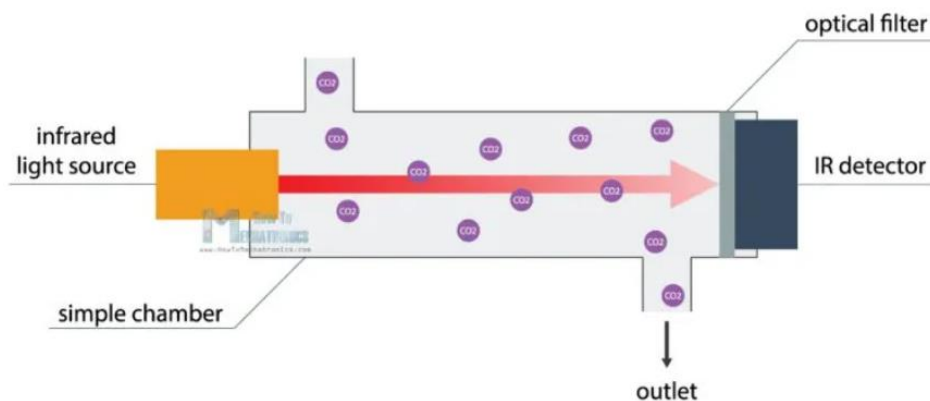


Abbildung 6: Infrarotsensor [12]

Die CO₂-Gasmoleküle, die in der von uns gemessenen Luft vorhanden sind, absorbieren ein bestimmtes Band des IR-Lichts, während sie einige Wellenlängen durchlassen. Der CO₂-Gehalt wird also aus der Differenz zwischen der emittierten Lichtmenge und der vom Detektor empfangenen IR-Lichtmenge berechnet. Die Ergebnisse dieses Sensors sind auch ziemlich genau.

Die bei VOC- und Ozongasmessungen verwendeten Sensoren sind normalerweise beheizte Metalloxidsensoren und ihr Funktionsprinzip basiert auf der Erkennung von Widerstandsänderungen bei Anwesenheit von Zielgasen. [14]

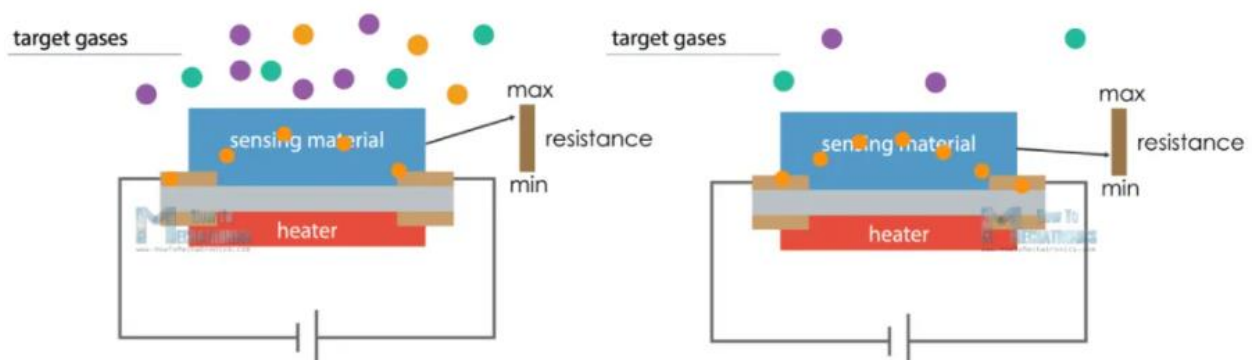


Abbildung 7: Metalloxidsensor [12]

Ein bestimmter elektrischer Strom fließt durch ein Metallsubstrat und der Widerstand ändert sich entsprechend der vorhandenen Gasmenge. *(wie auf der Abbildung 7)*

2.9. Luftqualität in Fahrzeugen

Die Luftqualität in Fahrzeugkabinen wird einerseits durch Emissionen von Innenausstattungscomponenten und andererseits durch äußere Einflüsse wie die Lüftungs und Klimaanlage der Fahrzeuge bestimmt. Der Regelungsbereich befasste sich bisher ausschließlich mit Emissionen aus Fahrzeuginnenausstattungssteilen. Der Fokus liegt hier auf der Untersuchung flüchtiger organischer Verbindungen. Im Gegensatz zum Innenbereich von Gebäuden, wo häufig genutzte Räume untersucht werden, ist dies bei Fahrzeugkabinen nicht normativ geregelt. Dort werden nur Verfahren zur Prüfung von Neufahrzeugen beschrieben, die nicht älter als 28 Tage sind. Die Tests werden somit von Herstellern als Kontrolle im Herstellungsprozess und als Marketinginstrument eingesetzt. VOC-Emissionen aus Fahrzeuginnenraumkomponenten können auf verschiedene Weise ermittelt werden. Baugruppenspezifische Messungen liefern Daten zur Gesamtemission, schnelle Screening-Verfahren können Aufschluss über einzelne Komponenten oder sogar Granulate geben. Laut Auto- und Bus-Expositionsstudien California Air Resources Board [15], PM_{2.5}, PM₁₀, CO₂, CO und NO₂ werden in Bus- und Fahrerschränken am häufigsten beobachtet und durch Studien als gefährlicher eingestuft. Aus diesem Grund wird in diesem Projekt das Sensormodul zur Messung dieses 3 Luftschadstoffs konzipiert und entsprechend analysiert.

3. Methoden

3.1. Komponente

Das gesamten System besteht aus 7 Komponenten, die mit einander verbinden und kommunizieren kann. Als Mikrokontroller-Einheit wurde Raspberry Pi Pico benutzt und in Micropython programmiert. 2 UART und 1 ADC Kanalen wurden benutzt, um Sensordata ins Pi Pico zu senden.

3.1.1 Raspberry Pi Pico

Raspberry Pi Pico (Abbildung 8) verfügt über einen Dual-Core-ARM-Cortex-M0+-Prozessor, der vom RP2040-Mikrokontroller angetrieben wird. Der preisgünstige Raspberry Pi Pico zeichnet sich durch geringen Stromverbrauch und hohe Leistung aus. Aufgrund dieser Eigenschaften wurde in unserem Projekt der mit MicroPython programmierbare Raspberry Pi Pico bevorzugt.

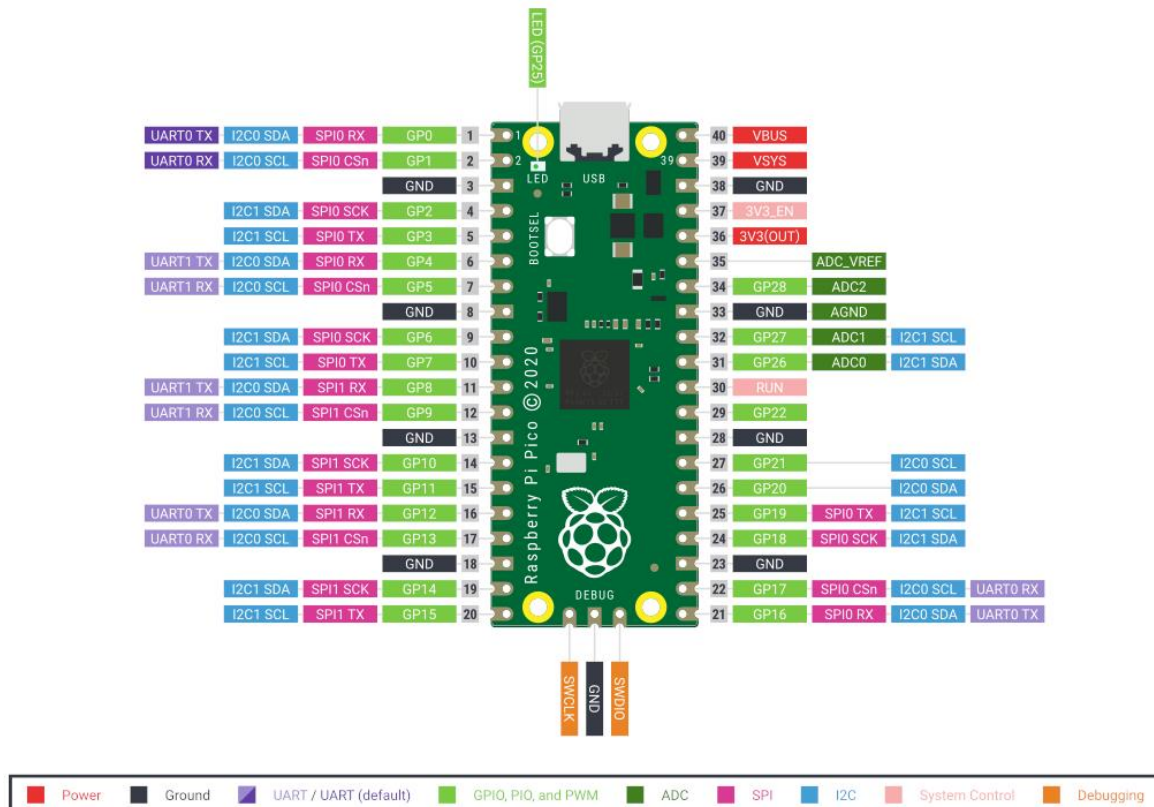


Abbildung 8: Raspberry Pi Pico Pin Diagramm und verfügbare Peripherals

Empfohlene Anwendungsgrenzwerte für Pi Pico sind :

- Betriebstemperatur max. 85 °C (einschließlich Eigenerwärmung)
- Betriebstemperatur Min. -20 °C
- VBUS 5V +/- 10%.
- VSYS Min. 1,8 V
- VSYS Max 5.5

3.1.2 Nova PM Sensor

Nova PM (siehe Abbildung 9) Sensor mißt die PM2.5 und PM10 luftverschmutzer Partikeln und überträgt die Ergebnis als $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Arbeitsprinzip der Sensor ist folgendes, Partikel im Scanbereich werden durch Laserstreuung detektiert. Reflektiertes Licht wird zurück zum Gerät in ein elektrisches Signal umgewandelt. Die analysierte Partikelmenge wird per serieller Kommunikation an den Mikrocontroller/Computer übermittelt.

- Messausgang: PM2.5, PM10
- Kommunikation : UART
- Messbereich: 0,0-999,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Versorgungsspannung: 5V
- max. Betriebsstrom: 100mA
- Reaktionszeit: 1s
- Abmessungen: 71 x 70 x 23 mm



Abbildung 9: Nova PM Sensor

3.1.3 MH-Z14A

Der MH-Z14A (siehe Abbildung 10) ist ein Gassensor, der die CO₂-Konzentration in der Luft nach dem Infrarotprinzip erfasst. Es wurde im Projekt bevorzugt, weil es sauerstoffunabhängig, langlebig und klein ist. Es hat drei Ausgänge, digital, analog und PWM.

Im Projekt wurde die Kommunikation über die UART-Pins des Sensors bereitgestellt.

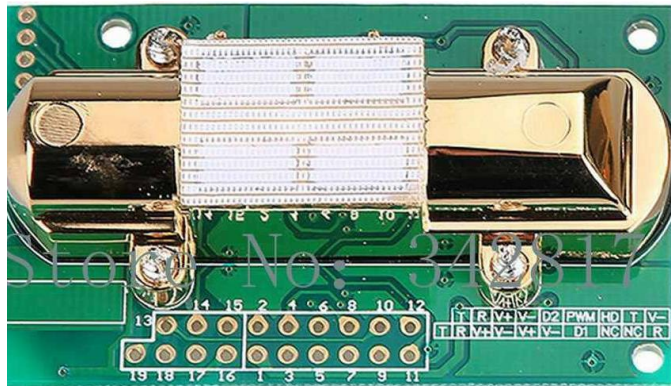


Abbildung 10 Aufbau der MHZ14-A CO₂ Sensor

Tabelle 3: wichtigsten technischen parameter für MH-Z14A

| | |
|---------------------|---|
| Working voltage | 4.5 V ~ 5.5V DC |
| Average current | < 60 mA (@5V supply) |
| Peak current | 150mA (@5V supply) |
| Interface level | 3.3 V (5V compatible) |
| Measuring range | 0~10000ppm optional |
| Output signal | Analog output (DAC) (default is 0.4~2V) |
| | Serial port(UART) (TTL) |
| | PWM |
| Preheat time | 3min |
| Working temperature | -10°C ~ 50°C |
| Working humidity) | 0~95%RH (no condensation) |
| Weight 15 g | Weight 15 g |

3.1.4 MICS-4514

MICS-4514 (siehe Abbildung 11) wurde für Messung von CO und NO₂ benutzt. Diese Sensor hat 2 Sensorelement darin. Nach der Intensität von CO und NO₂ verändert sich die Ausgangsspannung und daher berechnet man durch eine Reihe von Kalibrationsphasen Endergebnis als ppm.

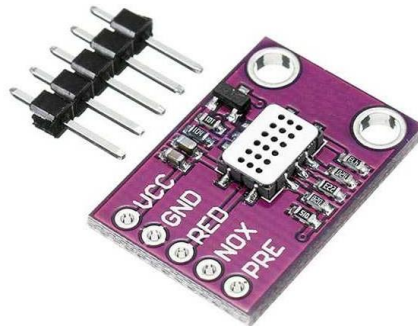


Abbildung 11: MICS-4514

Tabelle 4: wichtigsten technischen parameter für MICS-4514

| Rating | Symbol | Value / Range | Unit |
|---|----------------|--------------------------------|------|
| Maximum heater power dissipation | P _H | 88 (RED sensor)/50 (OX sensor) | mW |
| Maximum sensitive layer power dissipation | P _s | 8 | mW |
| Voltage supplyHeating current | Vsupply | 4.9 – 5.1 | V |
| Relative humidity range | RH | 5 – 95 | %RH |
| Ambient operating temperature | Tamb | -30 – 85 | °C |
| Storage temperature range | Tsto | -40 – 120 | °C |
| Storage humidity range | RHsto | 5 - 95 | %RH |

3.1.5 Spannungsquelle

In diesem Projekt haben wir eine 11.1-Volt-Lipo-Batterie verwendet, die aus 3 Reihenschaltungen von 3.7 Volt als Stromquelle besteht.

Alle Komponenten im Gerät verbrauchen insgesamt 0,282 A.

Die Stromaufnahme aus dem Netzteil wird den Berechnungen zufolge regelmäßig mit 1 Ampere angegeben.

Input Leistung: $(11.1 \text{ V}) * (1 \text{ A}) = 11.1 \text{ W}$ Consume Leistung: $(5 \text{ V}) * (0.282 \text{ A}) = 1.41 \text{ W}$

Bei der im Projekt eingesetzten Batterie wurde ein Batteriesatz mit geringer Kapazität zur Durchführung von Prototypentestprozessen und zur Wirtschaftlichkeit eingesetzt.

Dementsprechend kann diese Menge als 2000 mAh für 2 Stunden ausgedrückt werden. Insofern wurde ein 11,1 V Akku mit einer Kapazität von 2000 mAh vorbereitet.

3.1.6 DS1302

DS1302 (siehe Abbildung 12) wurde für Zeitverfolgung benutzt. Es ist immer besser, wenn man den Zeitstempel von Daten auch erhält. Deshalb wurde diese Komponente zu der System eingefügt.

- Echtzeituhr zählt Sekunden, Minuten,
- Stunden, Datum des Monats, Monat, Tag des
- Woche und Jahr mit Schaltjahrkompensation
- gültig bis 2100
- 31 x 8 RAM für Scratchpad-Datenspeicherung
- Serielle E/A für minimale Pinanzahl
- 2,0–5,5 Volt Vollbetrieb
- Verbraucht weniger als 300 nA bei 2,0 Volt



Abbildung 12: DS1302

3.2. Software-Entwicklung

3.2.1 Main Funktion Workflow

Sie können den Arbeitsablauf in Abbildung 13 sehen.

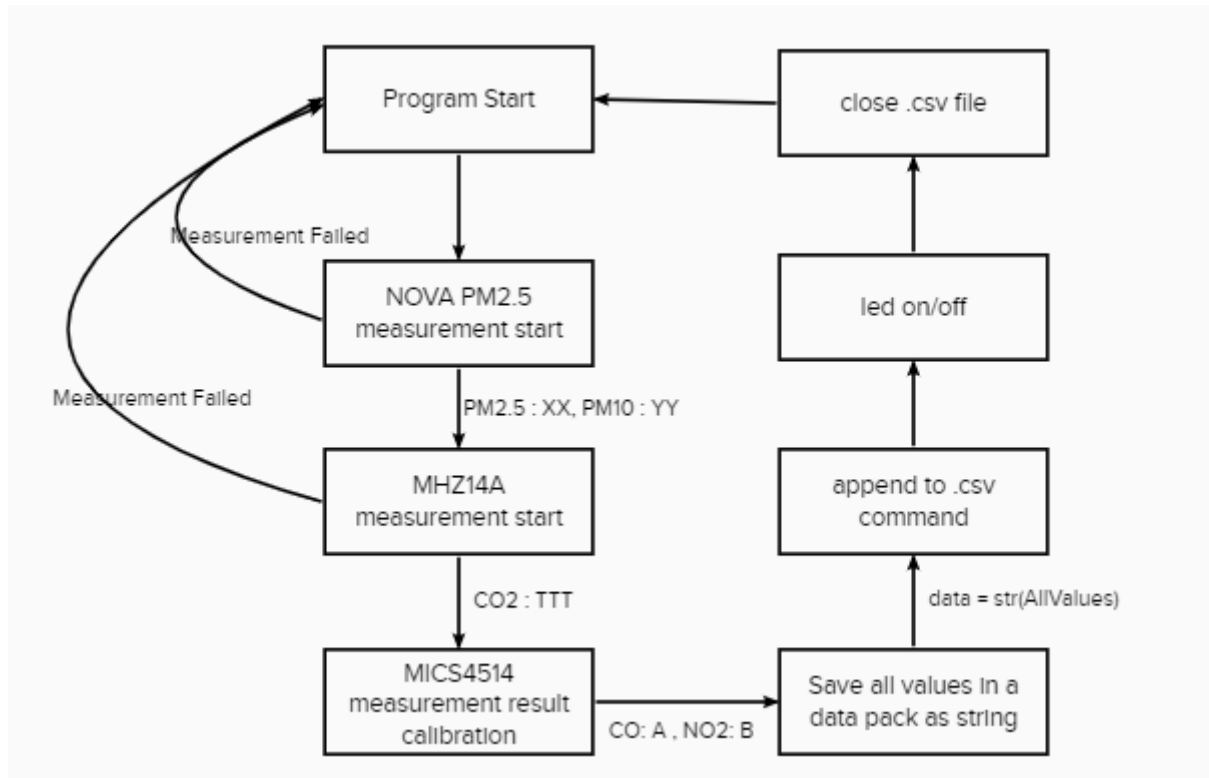


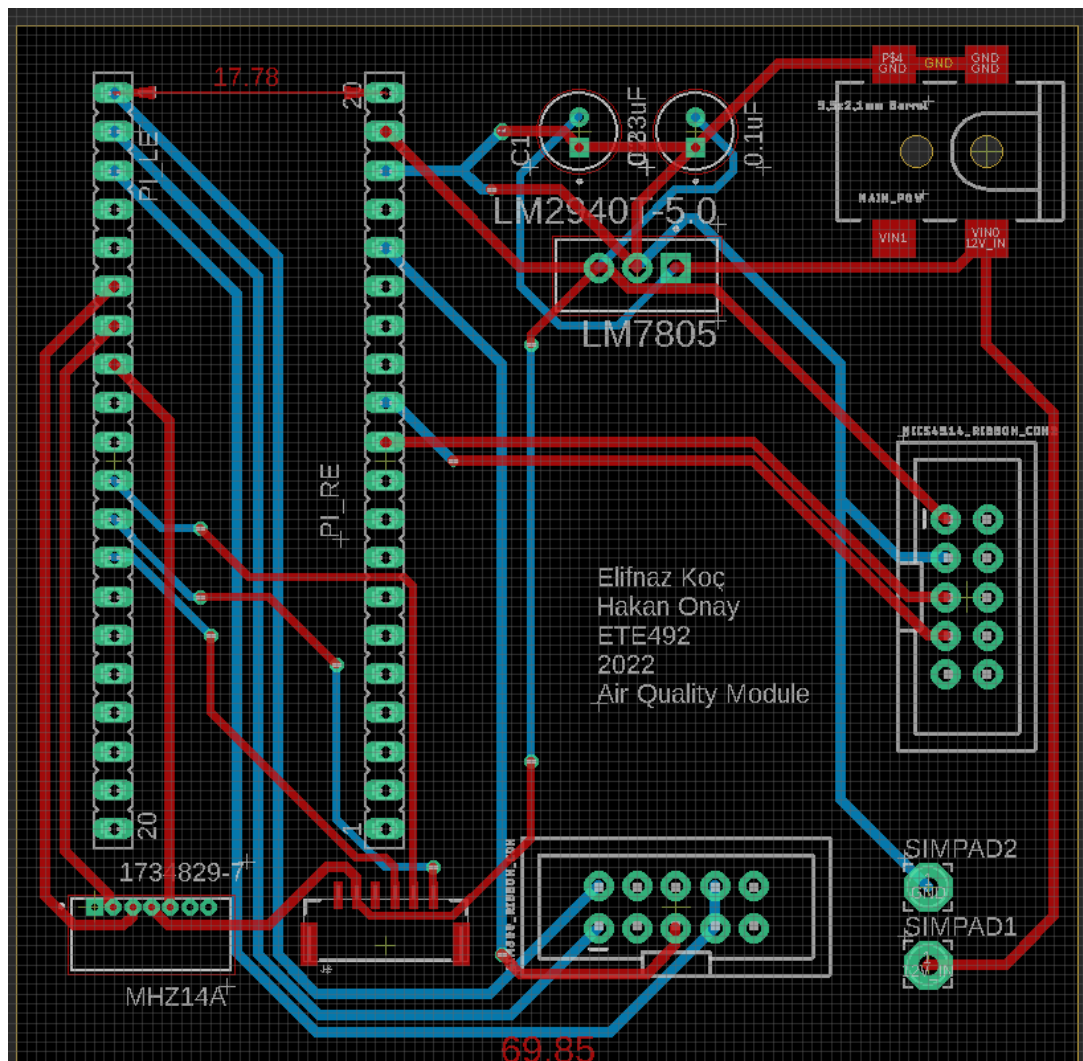
Abbildung 13: Main.py funktion workflow

3.3.Hardware-Entwicklung

Um Kabelvermischung zu verhindern und mehr Raum zur Verfügung zu haben, wurden eine Platin entworfen, damit man alle Verbindungen von einer Platz einstellen kann. Diese PCB ist auch eine Anschlussplatz für Pi Pico. PCB wurde auf EagleCAD entworfen.

3.3.1 PCB in 3D und Integration

Abbildung 14 hat ein PCB-Design, das über die EagleCAD entworfen wurde.



Die Anschlüsse zur PCB-Board wurde durch Ribbonkabeln und Inlineversteckern erfolgt. Dieses Entwurf ermöglicht also eine gemeinsamen Anwendung mit einer Kommunikationsmodul bzw. 3G/4G GPRS Modulen.

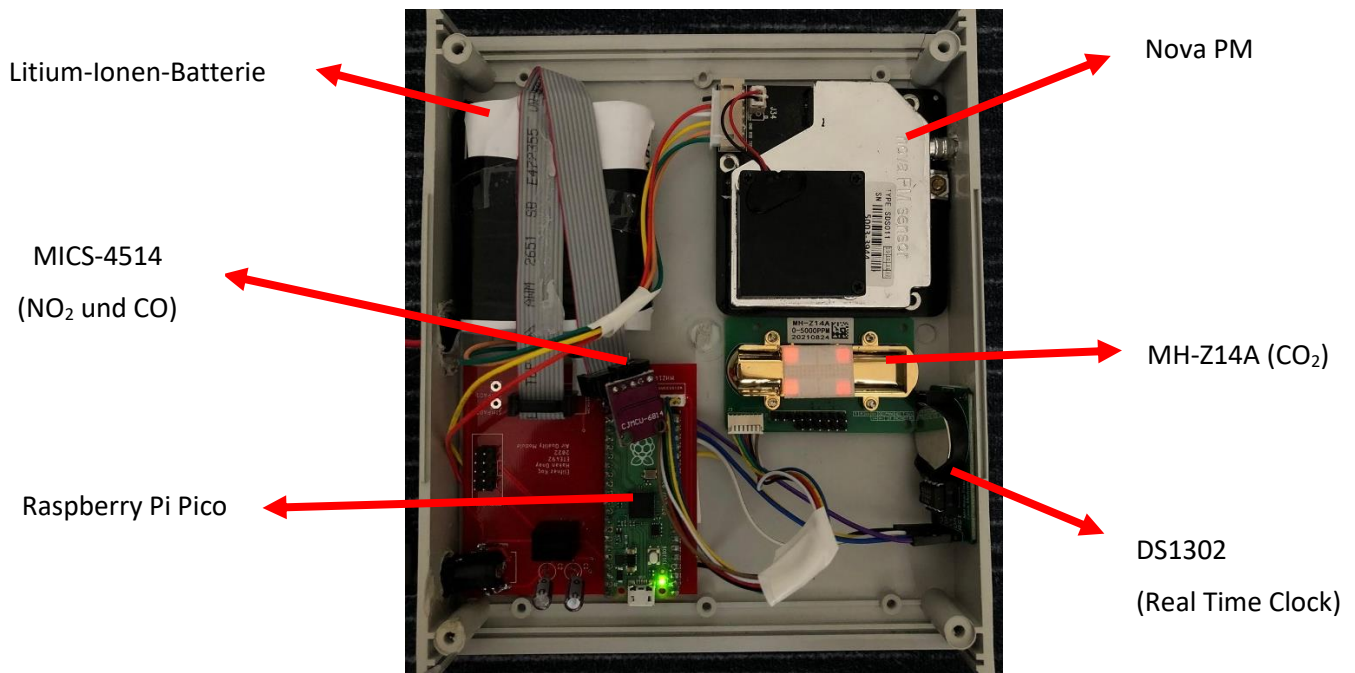


Abbildung 15:komplettes System nach der Integration

4. Test und Ergebnisse

4.1.Messungszenerio

Laut California Air Resources Board wurde festgestellt, dass die Gase PM2.5, PM10, CO, CO₂, NO₂ sind, die in Autos und Bussen in verschiedenen ungünstigen Szenarien (Leckage, Verbrennung, hitzeinduzierte Korrosion usw.) am häufigsten vorkommen. [15] Das entworfene Gerät wurde für die Detektion dieser Gase getestet.



Abbildung 16: Das Gerät im Test

Auf dem *Abbildung 16* sieht man das Gerät während des Tests. Die Löcher auf der Box im Bild sind für die Sensoren, um genug Luft zu bekommen. Im Projekt haben wir zunächst ohne Box gemessen. Im Nachhinein ist uns aufgefallen, dass bei der Verarbeitung einer geringen Anzahl von Loch des Kartons eine Ungenauigkeit in den Werten auftrat. Als wir die Anzahl der Löcher erreicht hatten, die der Messung ohne die Box entsprachen, verwendeten wir die Box.

Für den Test wurde die Metrobuslinie von Beylikdüzü nach Sogutluceme in Istanbul genutzt. Messungen wurden in 2 Metrobusse stattgefunden. Die Ergebnisse für die Metrobusse A und B vom 4. bis 8. Juni 2022 sind in den Tabellen aufgeführt. Erste Messung war am Morgen und nicht so überfüllte Atmosphäre. Zweite Messung war am Rush-Hour und sehr überfüllte Innenraum stattgefunden. Die Busse hatten unterschiedlich aufgebautes Klimasystem. Das Messungsgerät war in der exacten Position in beiden Messung.

Metrobus A wurde die Messung in folgende Zustände ausgeführt :

- Morgen stunden
- Geringe Anzahl von Fahrgäste
- Horizontales Klimaanlage

Metrobus B wurde die Messung in folgende Zustände ausgeführt :

- Rush-hours
- Höhe Anzahl von Fahrgäste
- Vertikales Klimaanlage

Die minimalen, maximalen und durchschnittlichen Werte, die für den Metrobus A in *Tabelle 5* und für den Metrobus B in *Tabelle 6* erhalten wurden, sind gezeigt.

Tabelle 5: wichtigste Parameter für Metrobus A

| | PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | CO₂ (ppm) | NO₂ (ppm) | CO (ppm) |
|--------------|--|---|---------------------------------|---------------------------------|---------------------|
| Maximum | 24.1 | 27.8 | 4982 | 1 | 1 |
| Minimum | 1.6 | 2.0 | 890 | 0 | 0 |
| Durchschnitt | 5.6 | 9.0 | 2386.2 | 0.16 | 0.1 |

Tabelle 6: wichtigste Parameter für Metrobus B

| | PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | CO ₂ (ppm) | NO ₂ (ppm) | CO (ppm) |
|--------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|
| Maximum | 5.5 | 8.9 | 4250 | 1 | 1 |
| Minimum | 2.0 | 2.3 | 523 | 0 | 0 |
| Durchschnitt | 3.6 | 5.4 | 1844.3 | 0.11 | 0.18 |

4.2.1 PM2.5 und PM10 Messung

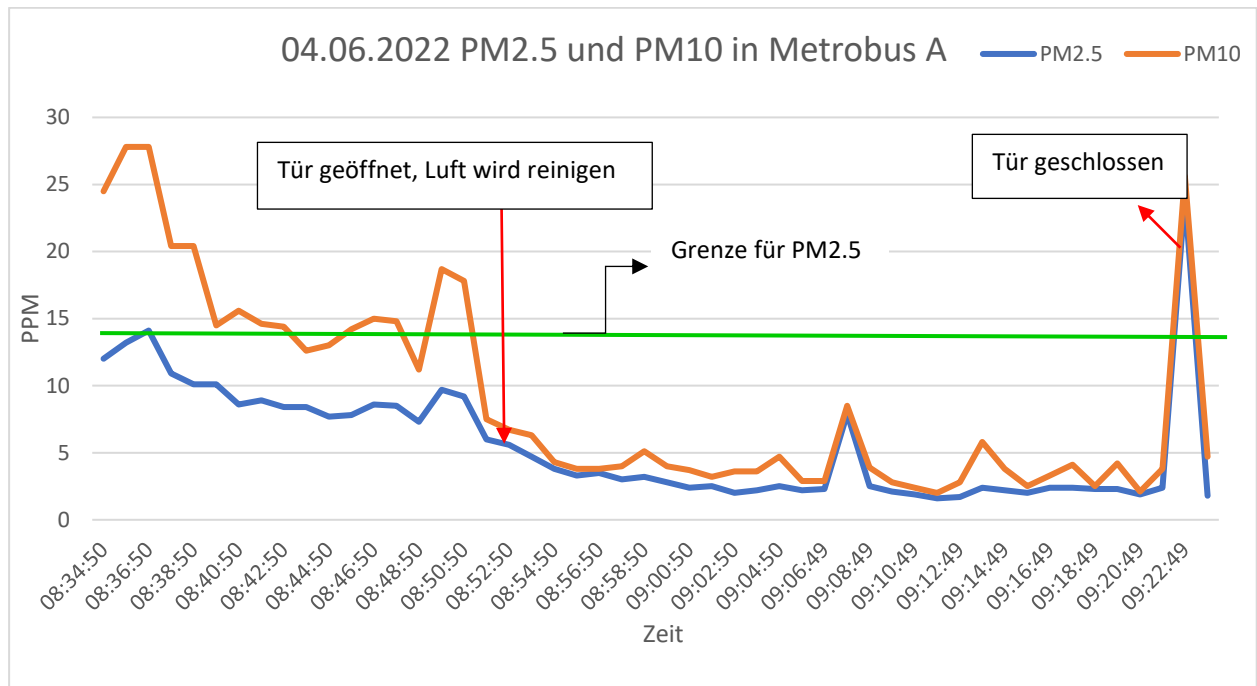


Abbildung 17: PM2.5 und PM10 Werte für Metrobus A

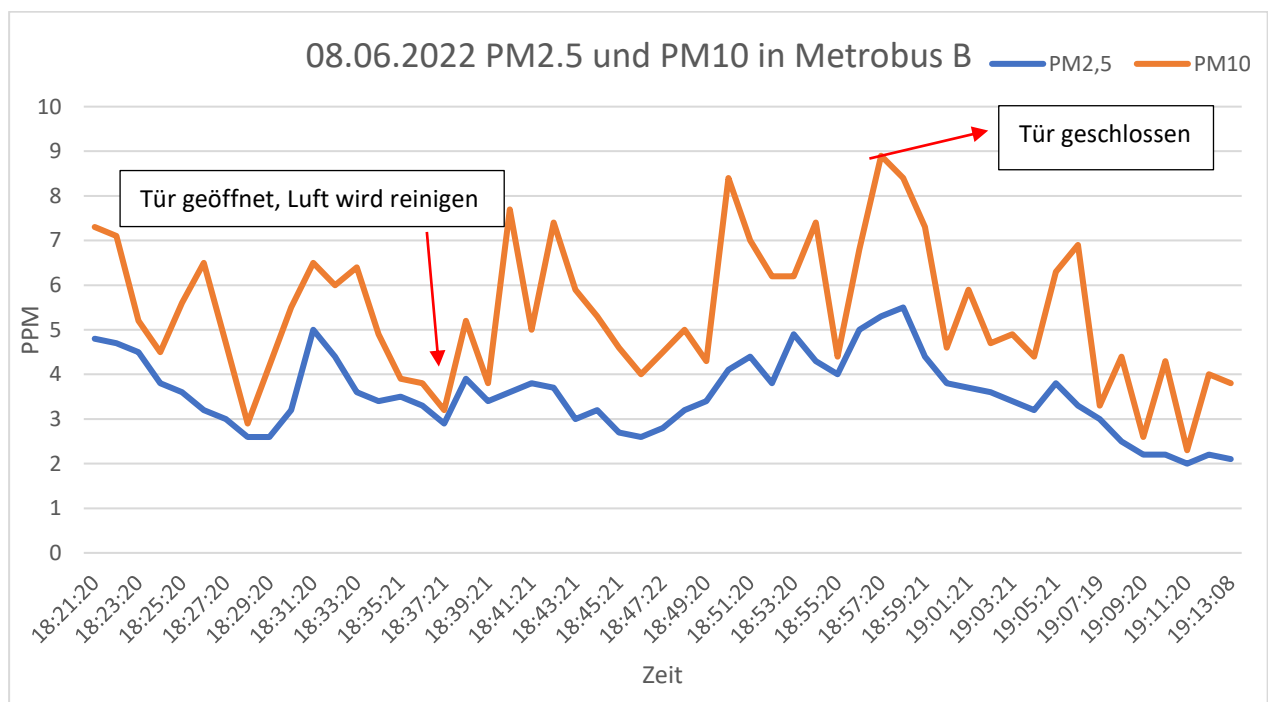


Abbildung 18: PM2.5 und PM10 Werte für Metrobus B

Die Verwendung von Klimaanlage und Lüftungen in Bussen beeinflusst die Konzentration von PM2.5 und PM10. Klimaanlage, die von Zeit zu Zeit vom Kühlmodus in den Lüftungsmodus geschaltet werden, können die Umwelt reinigen.

Da das Belüftungssystem bei A- und B-Fahrzeugen unterschiedlich ist, gibt es einen Unterschied zwischen den erhaltenen Werten. Eine sauberere Luft wurde bei Fahrzeug B beobachtet, dessen Klimaanlage erfolgreicher war.

4.2.2 CO₂ Messung

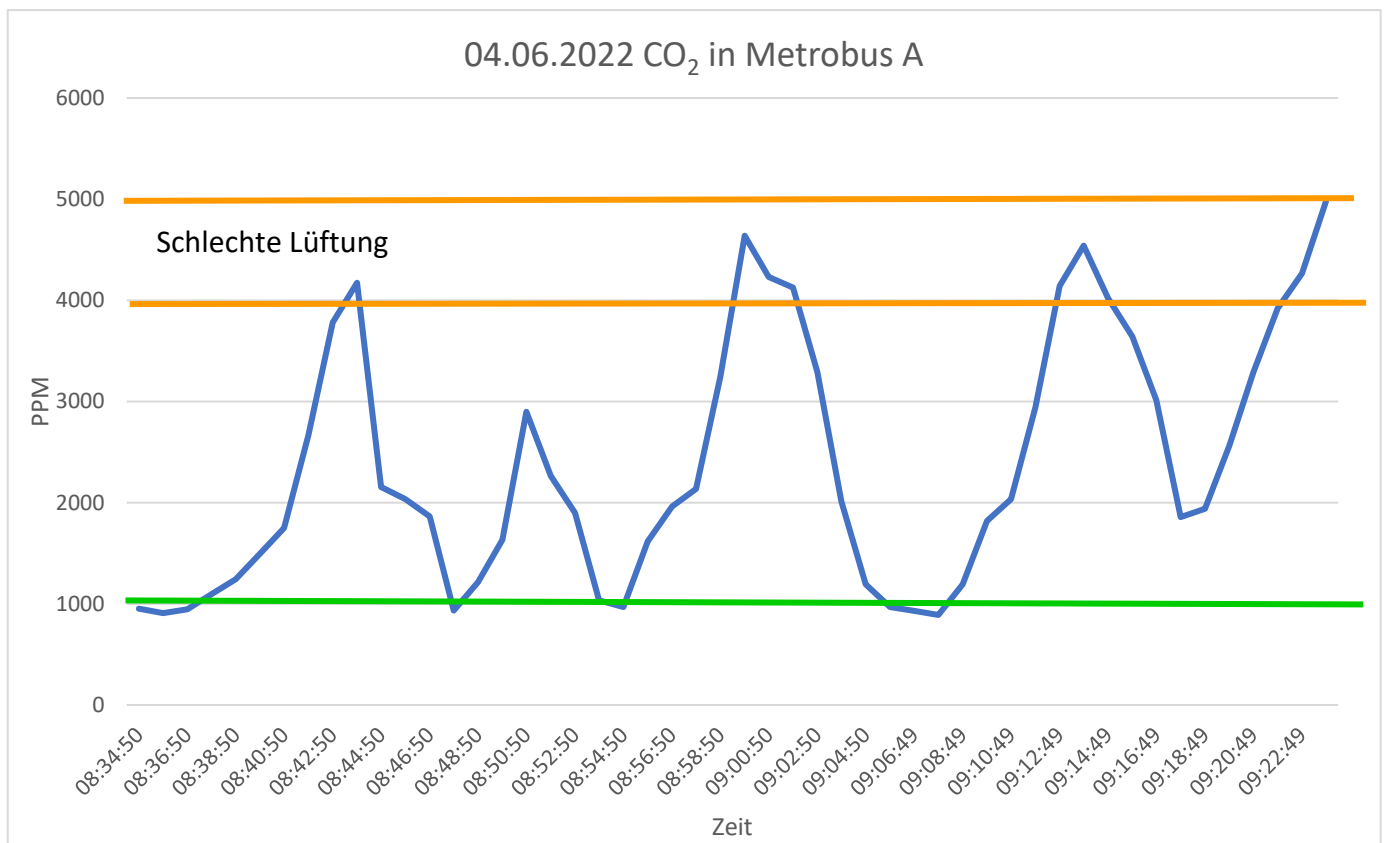


Abbildung 19: CO₂ Werte für Metrobus A

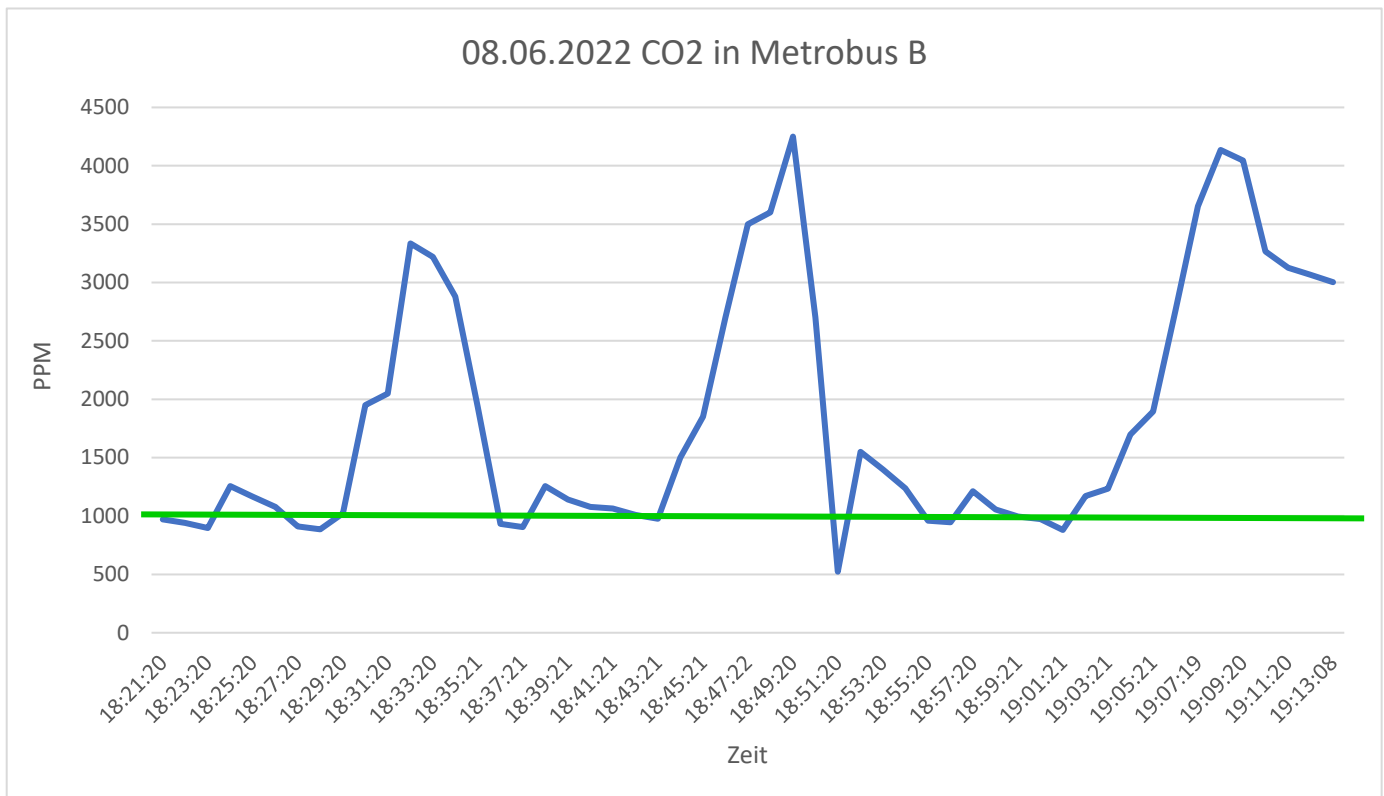


Abbildung 20: CO₂ Werte für Metrobus B

Wenn der Abstand zwischen den Haltestellen kurz ist, öffnet sich die Tür des Busses in kürzerer Zeit und dies sorgt für Frischluftzufuhr in den Bus. Während der CO₂-ppm-Wert sofort sinkt, steigt dieser Wert schnell entsprechend der Anzahl der Fahrgäste, die von der neuen Haltestelle

Wenn der Abstand zwischen den Haltestellen kurz ist, öffnet sich die Tür des Busses in kürzerer Zeit und dies sorgt für Frischluftzufuhr in den Bus. Während der CO₂-ppm-Wert sofort sinkt, steigt dieser Wert schnell entsprechend der Anzahl der Fahrgäste, die von der neuen Haltestelle genommen werden. Da die Luft im Bus an den weit voneinander entfernten Haltestellen nicht erneuert wurde, wurde eine sehr ungesunde Luft beobachtet.

4.2.3 NO₂ und CO Messung

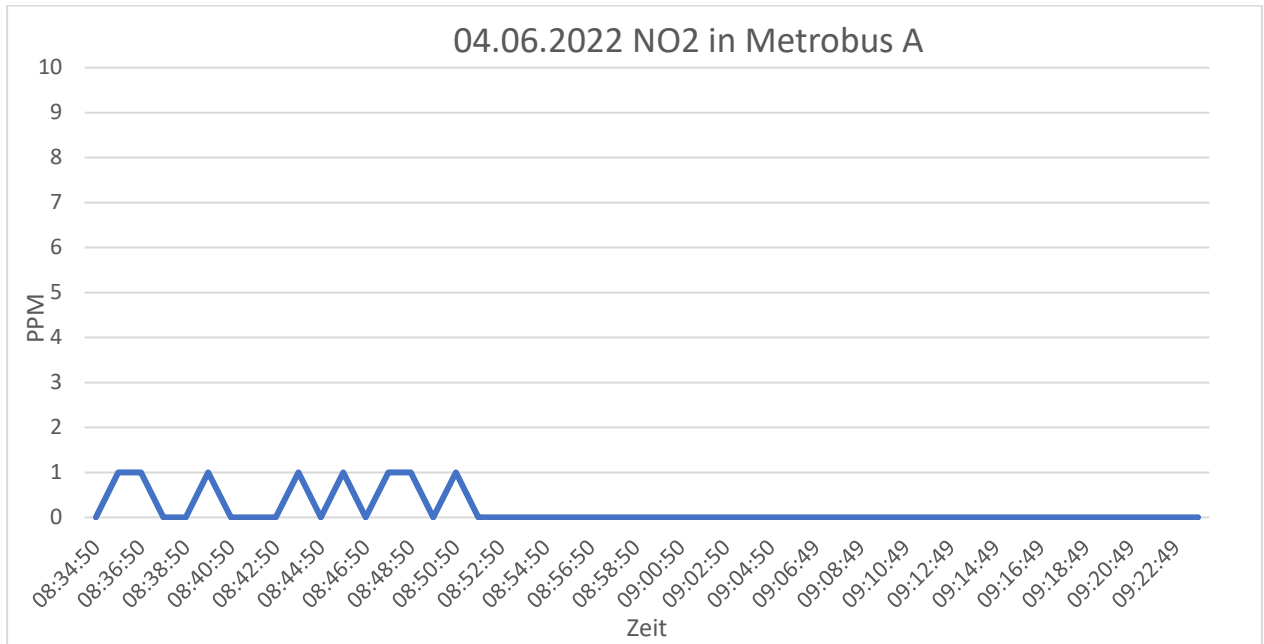


Abbildung 21: NO₂ Werte für Metrobus A

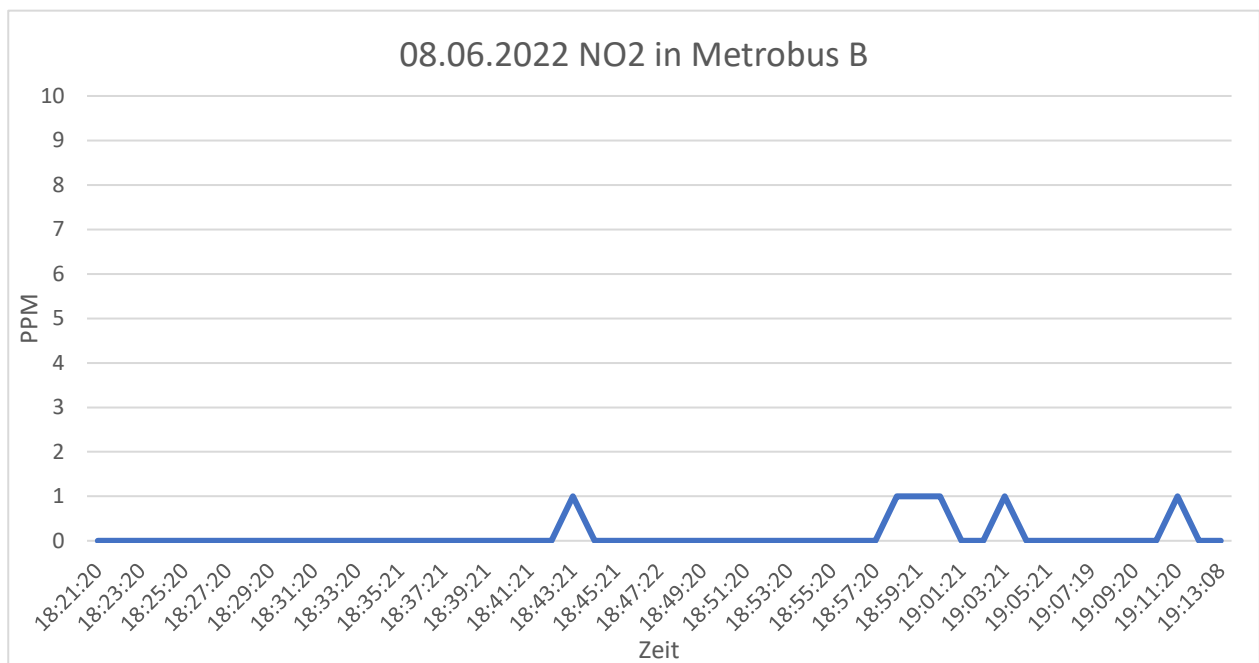


Abbildung 22: NO₂ Werte für Metrobus B

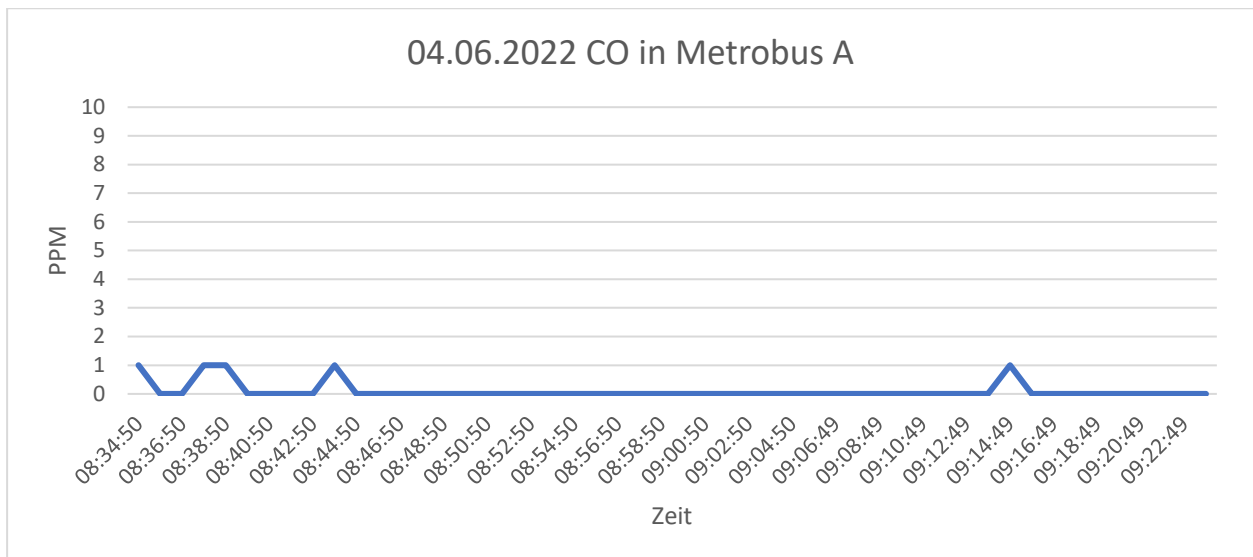


Abbildung 23: CO Werte für Metrobus A

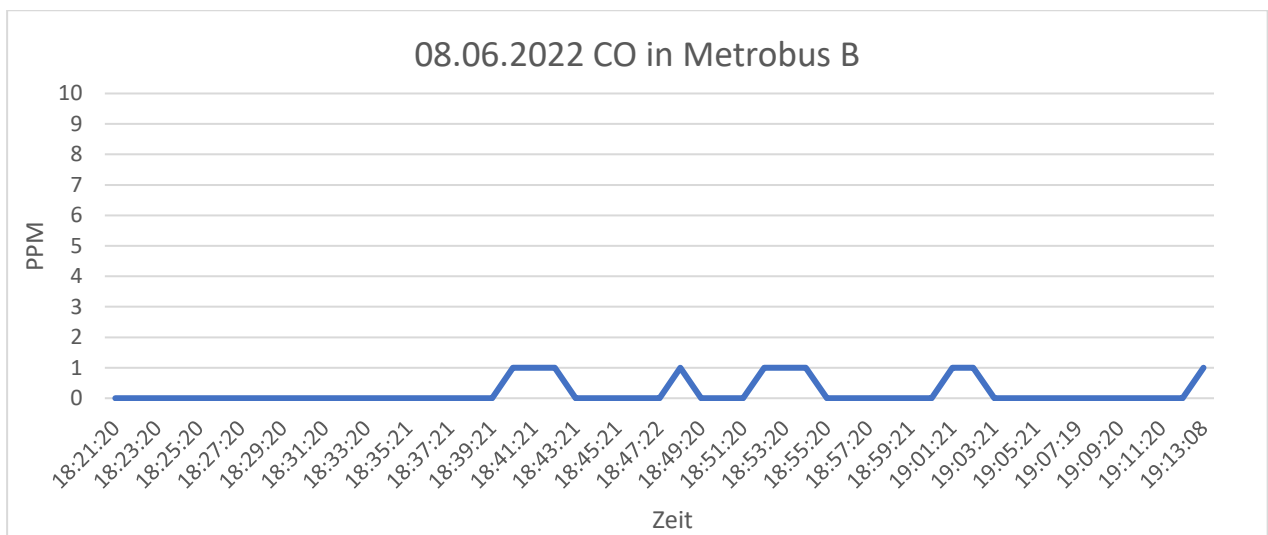


Abbildung 24: CO Werte für Metrobus B

NO₂- und CO-Gase sind Gase, die bei der Verbrennung bei hohen Temperaturen entstehen. Diese Gase wurden nicht angetroffen, da es bei keiner der beiden für den Test unternommenen Fahrten zu einem Verbrennungsereignis kam. Durch die Verwendung von ADC und leichten Abweichungen bei den Sensoren kommt es zu gelegentlichen Änderungen in den Graphen.

5. Ausblick

Neue Studien mit unterschiedlichen Gasarten und unterschiedlichen Sensoren in Fahrzeugen werden genauere Ergebnisse liefern.

Studien an verschiedenen Bustypen werden sicherstellen, dass das genaueste Belüftungssystem für Fahrzeuge bestimmt und Verbesserungen in diesem Bereich vorgenommen werden. Auf diese Weise wird die Luft, die wir in den öffentlichen Verkehrsmitteln atmen, die wir in unserem täglichen Leben benutzen, qualitativ hochwertiger, gesünder und zuverlässiger sein.

6. Zusammenfassung

In dieser Studie haben wir ein Modul entwickelt, das PM2.5-, PM10- Feinsatub, NO₂-, CO₂- und CO-Gase erkennen kann, die die menschliche Gesundheit in öffentlichen Verkehrsmitteln gefährden können. Wir haben Nova PM, Mics-4514, MH-Z14A Sensoren für diese Gase verwendet. In den späteren Phasen des Moduls haben wir versucht, ein professionelleres Gerät zu entwerfen, indem wir die Leiterplatte entworfen haben. Mit diesem Design haben wir das Gerät verpackt und Tests an verschiedenen Tagen und Stunden in Metrobussen durchgeführt.

Als Ergebnis der Tests haben wir festgestellt, dass die Luftqualität in verschiedenen Fahrzeugen mit unterschiedlichen Lüftungssystemen variiert und dass die Luftqualität durch das Schließen und Öffnen der Türen der Fahrzeuge positiv beeinflusst wird. Wir haben festgestellt, dass die CO₂-Menge je nach Anzahl der an jeder Haltestelle beförderten Passagiere und der Häufigkeit der Haltestellen variiert und dass das Belüftungssystem für PM2.5- und PM10-Gase recht effektiv ist. Da bei der Verbrennung bei hohen Temperaturen NO₂- und CO-Gase entstehen, traten diese Gase während des Tests nicht auf, abgesehen von geringfügigen Abweichungen von den Sensoren.

7. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] „airnov.gov,” [Online]. Available: <https://www.airnow.gov/aqi/aqi-basics/>. [Zugriff am 21 10 2021].
- [2] „scied.ucar.edu,” [Online]. Available: <https://scied.ucar.edu/learning-zone/air-quality/what-is-air-quality>. [Zugriff am 16 10 2021].
- [3] D. B. G. Prof. Dr. Korkut A. SUNGUR, „ÇEŞİTLİ İKLİM ELEMANLARININ HAVA KİRLİLİĞİ ÜZERİNE ETKİLERİ“.
- [4] C. Alves, T. Nunes, J. Silva und M. Duarte, „Comfort Parameters and Particulate Matter (PM10 and PM2.5) in School,” *Aerosol and Air Quality Research*, Aveiro, 2012.
- [5] „arb.ca.gov,” 25 11 2021. [Online]. Available: <https://ww2.arb.ca.gov/resources/inhalable-particulate-matter-and-health>.
- [6] S. M. Saad, A. Y. M. Shakaff, A. M. Andrew, A. Adom und A. Zakaria, „Development of indoor environmental index: Air quality index and thermal comfort index,” 2017.
- [7] J. Orosa, *Indoor and Outdoor Air Pollution*, Rijeka, Croatia, 2011.
- [8] „health.state.mn.us,” [Online]. Available: <https://www.health.state.mn.us/communities/environment/air/toxins/voc.htm>. [Zugriff am 17 01 2022].
- [9] „havakalitesi.ibb.gov,” [Online]. Available: <https://havakalitesi.ibb.gov.tr/Icerik/hakkimizda/hava-kalitesi-olcumleri>. [Zugriff am 23 10 2021].
- [10] „gao.gov,” [Online]. Available: <https://www.gao.gov/products/gao-21-189sp>. [Zugriff am 23 10 2021].
- [11] K. Karakostas, S. Gkagkanis, K. Katsaliak, P. Köllensperger, A. Hatzopoulos und M. E. Kizioglou, „Portable optical blood scattering sensor,” *Published in Microelectronic Engineering*, pp. 1-4, 2019.

- [12] „howtomechatronics.com,“ [Online]. Available:
<https://howtomechatronics.com/projects/diy-air-quality-monitor-pm2-5-co2-voc-ozone-temp-hum-arduino-meter/>. [Zugriff am 10 01 2022].
- [13] „fierceelectronics.com,“ [Online]. Available:
<https://www.fierceelectronics.com/sensors/what-ir-sensor>. [Zugriff am 10 01 2022].
- [14] N. Barsan und U. Weimar, „Understanding the fundamental principles of metal oxide based gas sensors; the example of CO sensing with SnO₂ sensors in the presence of humidity,“ *JOURNAL OF PHYSICS*, 2003.
- [15] California Air Resources Board, „Car & Bus Exposure Studies,“ [Online]. Available:
<https://ww2.arb.ca.gov/resources/documents/car-bus-exposure-studies>. [Zugriff am 01 05 2022].

8. ANHANG

8.1. Kalibration von NO₂ und CO Sensor

Folgendes ist die grundsätzliche Gedanken zur Kalibration von MICS-4514. Es wurde im Code getestet und in Projekt vollständig benutzt.

```
#Rload: 22k

R0_no2 = 18000; NO2 ppm = 10^0,9682 * (log (Rs/R0) / ln10) - 0.8108)
#Rload: 47k

R0_co = 110346;
CO ppm = 10^-1.1859 * (log (Rs/R0) / ln10) + 0.6201)
RsR0_no2 = Rs_no2 / R0_no2;
RsR0_co = Rs_co / R0_co;

# Sensorspannung RS = boardspannung-R0_Spannung
#Rs_no2= Us / I
# = (Ug - UR0) / R0 * UR0
# = Sensorspannung / (R_Spannung * 22000)
# = (5 - (ADCCHA2 * 0,00061 mV) / (ADCCHA2*0,00061mV * 22k)
# Rs_co=Us / I
# = Sensorspannung / (R0_Spannung * 47000)
# = (5 - (ADCCHA1 * 0,00061 mV)) / (ADCCHA1*0,00061mV * 47k)

Rs_no2 = 22000 / ((ADCCHA2 * 0.00061)) * (5 - (ADCCHA2* 0.00061));
Rs_co = 47000 / ((ADCCHA1 * 0.00061)) * (5 - (ADCCHA1 * 0.00061));
noxppm = (pow (10, 0.993634072700759 * (log10(RsR0_no2)) - 0.800900894085055));
coppm = (pow (10, -1.17462679264927 * (log10(RsR0_co)) + 0.657906357391024));
```

8.2.Einstellung Real-Time-Clock

Der folgende Code wird für das Echtzeitmessmodul verwendet:

```
from machine import Pin
from ds1302 import DS1302
import time

ds = DS1302(Pin(18),Pin(17),Pin(16))
ds.date_time([2022,6,8,0,12,45,0])          #Senden richtigen Datum-Info

while True:
    (Y,M,D,day,hr,m,s)=ds.date_time()      #Formattierung der Daten
    if s < 10:
        s = "0" + str(s)
    if m < 10:
        m = "0" + str(m)
    if hr < 10:
        hr = "0" + str(hr)
    if D<10:
        D = "0" + str(D)
    if M<10:
        M = "0" + str(M)
    date_log =str(D) + "/" + str(M) + "/" + str(Y) + "," + "\n"
    time_log =str(hr) + ":" + str(m) + ":" +str(s) + "," + "\n"
    print(date_log + time_log)              #bsp: "09/06/2022 , 12:13:00,"
    time.sleep(2)
```

8.3.PM2.5 und PM10 Sensor Funktion

Der folgende Code wurde zur Einstellung der Nova PM Sensor dargestellt:

```
def read(self):

    #Neue Messung abfragen, Antwort abwarten und verarbeiten. Wartet 512 Zeichen lang
    #auf eine Antwort (0,4 s bei 9600 Baud). Gibt True zurück, wenn eine Antwort
    #empfangen wurde, andernfalls False.

    self.query()
    for i in range(512):
        try:
            header = self._uart.read(1)
            if header == b'\xaa':
                command = self._uart.read(1)
                if command == b'\x0':
                    packet = self._uart.read(8)
                    if packet != None:
                        self.process_measurement(packet)
                        return True
        except Exception as e:
            print('Problem attempting to read:', e)
            sys.print_exception(e)

    return False
```