

Einleitung

Im Zusammenhang mit dem Coronavirus (COVID-19) wurde Lüften für die Luftqualität vermehrt zum Thema. So wird auch empfohlen in Schulzimmern die Luftqualität zu messen, um den optimal Zeitpunkt und die Dauer des Lüftens herauszufinden. Zum optimalen Lüften gehört auch die Berücksichtigung der Lufttemperatur. Wird im Winter zu lange gelüftet, so wird zu viel Energie für die Heizung verschwendet, wird zu kurz gelüftet bleibt der CO₂-Gehalt zu hoch. Nicht nur das Lüften, sondern auch die Anzahl Personen im Raum sowie auch die Aktivitäten innerhalb des Raumes haben einen Einfluss auf die Temperatur und Luftqualität.

Um diese Fragen beantworten zu können wurden mit Python-basierten Mikrocontroller und Sensoren, physische Eigenschaften eines Raumes erfasst und an ein Datenbank-Backend übertragen. Anschliessend wurden diese Daten ausgewertet und analysiert.

In diesem Bericht wird unser Vorgehen und unsere Entscheidungen dokumentiert.

Sensoren

Um Daten erheben zu können, müssen als erstes die richtigen Sensoren zum Einsatz kommen.

Wir haben je nach Anwendungsbereich diverse Lösungsmöglichkeiten ausgearbeitet, getestet und uns für diejenige entschieden:

- A. die am einfachsten zu Handhaben sind,
- B. die, die geringste Fehleranfälligkeit aufweisen,
- C. die, die höchste Datenqualität gewährleisten.

Personenzähler

Anforderungen

Der Personenzähler muss mit einer möglichst hohen Präzision die Anzahl Personen im Raum quantifizieren können. Ausreisser und längere Ausfälle sollen verhindert werden. Zudem soll der Zähler bei fehlerhaften Zählungen einfach nachkorrigiert werden können.

Lösungsvorschläge



Ultra Sonic Ranger



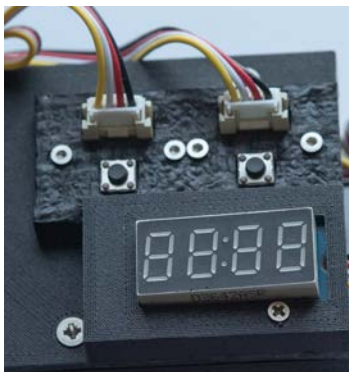
Mit zwei Ultraschall Sensoren wurden initiale Distanzen gemessen. Wenn die gemessene Distanz signifikant zu der Initial Distanz abweicht, wartet man auf den zweiten Sensor bis er das selbe Signal empfängt. Mit dieser Methode kann auch die Richtung der Bewegung bestimmen werden, was mit einem Sensor nicht möglich wäre. Das Problem dieser Methode ist, wenn mehrere Personen zur gleichen Zeit neben den Sensoren vorbeigehen, kann man die Richtung nicht mehr bestimmen und es kommt zu fehlerhaften Zählungen. Zudem sind die Sensoren nicht sehr genau und schwanken sehr stark zwischen den einzelnen Messungen. Daher ist diese Lösung nicht geeignet.

Webcam Motion Detection

Eine Webcam wird an der Decke des Eingangs platziert. Auf dieser Videoquelle läuft ein Motion-Detection-Modell das Bewegungen erkennt. Sobald eine Bewegung detektiert wird, setzt das Modell einen Tracking Punkt, d.h. in der Mitte des Bildes wird eine Horizontale Linie gezogen. Wenn also ein Tracking Punkt über der Linie gesetzt wird und anschliessend unterhalb der Linie verloren geht wird eine Person dazu gezählt. Das System funktioniert sehr gut in einem Korridor. Eignet sich jedoch in unseren Klassenzimmer nicht, da sich Personen auch von Rechts nach Links bewegen können. Zudem braucht das Modell einige Zeit um Bewegungen zu erkennen. Schnellere Personen würden daher zu spät erkannt werden.



Button Clicker



Bei diesem Ansatz werden zwei Taster und ein Display kombiniert. Das Display zeigt die aktuelle Anzahl Personen im Raum. Mit den Tastern kann die Anzahl Personen hoch- und runter gezählt werden. Nachteil an dieser Lösung ist, dass das System über keine Intelligenz verfügt und die Personen im Raum die Verantwortung über die Datenqualität haben.

Fazit

Wir haben uns für den "Button Clicker" entschieden, da er die geringste Fehleranfälligkeit aufweist und somit die höchste Datenqualität gewährleistet.

Fenster-Sensor

Anforderungen

Der Fenstersensor muss mit einer möglichst hoher Präzision erkennen, ob ein Fenster geöffnet oder geschlossen ist. Wechselhafte Signale sollten verhindert werden, z.B wenn Fenster halb geöffnet sind. Wenn ein Fenster gleichzeitig eine Türe ist, sollte er auch keine Probleme mit vorbeigehenden Personen haben.

Lösungsvorschläge

Ultra Sonic Ranger



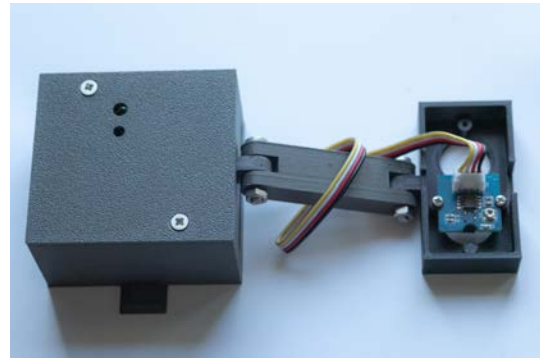
Am Fenster wird ein Ultra Sonic Ranger angebracht. Dieser misst die Distanz zum Fenster. Sobald das Fenster geöffnet wird, vergrößert sich die Distanz zum Fenster. Dies wird erkannt und ein Statuswechsel wird ausgelöst. Problem dieser Methode ist, dass dieser Sensor zu ungenau ist und zu starke Schwankungen aufweist, d.h. während ein Fenster offen ist, würden vorbeigehende Personen erkannt werden und so fehlerhafte Statuswechsel ausgelöst werden. Daher eignet sich dieses System aus Datenqualitäts Gründen eher weniger.

Infrared Reflective Sensor

Die Methode ist exakt dieselbe wie die oben beschriebene. Einziger Unterschied ist der Sensor. Dieser schwankt viel weniger und hat nur einen Detektionsradius von 8-14mm. So werden vorbeigehende Personen nicht erkannt und keine falschen Signale gesendet.

Fazit

Wir haben uns für den Infrared Reflective Sensor entschieden, da dieser viel genauer beim Detektieren der Distanz ist und somit die Datenqualität gewährleistet ist. Dies ist gerade beim Fenster wichtig, da diese Daten später bei der Analyse eine grosse Rolle spielen werden.



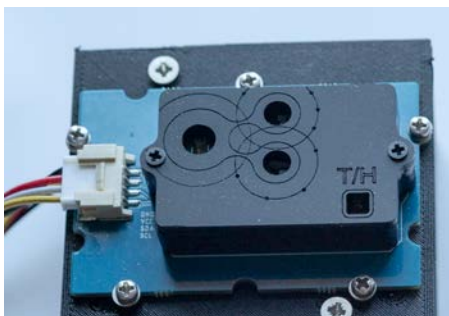
Luftqualitätssensor

Anforderungen

Der Luftqualitätssensor soll möglichst präzise Daten für die Luftqualität liefern. Von grossem Vorteil wäre ein Sensor der gleichzeitig mehrere Metriken über die Luftqualität messen kann.

Lösungsvorschlag

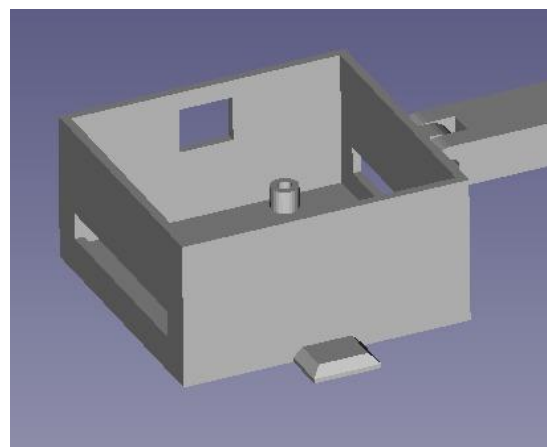
SCD30 Sensor



Der SCD30 Sensor eignet sich für unseren Anwendungsfall besonders gut. Er kann Luftfeuchtigkeit, Temperatur und CO2 Gehalt messen. Daher haben wir uns für diesen Sensor entschieden.

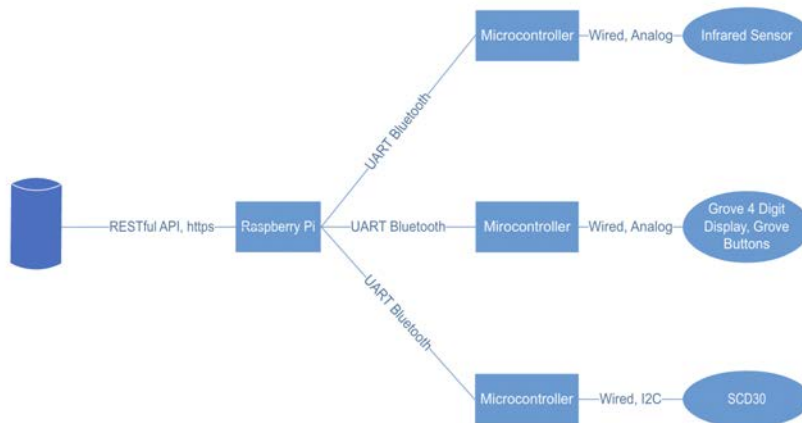
Montage

Die Montage soll möglichst einfach und schnell durchzuführen sein. Zudem sollte nach der Entfernung der Sensoren keine Gebrauchsspuren mehr zu sehen sein. Wir haben uns für ein einheitliches Gehäuse, welches mit Klebeband an den Füßen befestigt werden kann, entschieden. Es spielt daher keine Rolle, ob der Sensor horizontal oder vertikal befestigt wird.



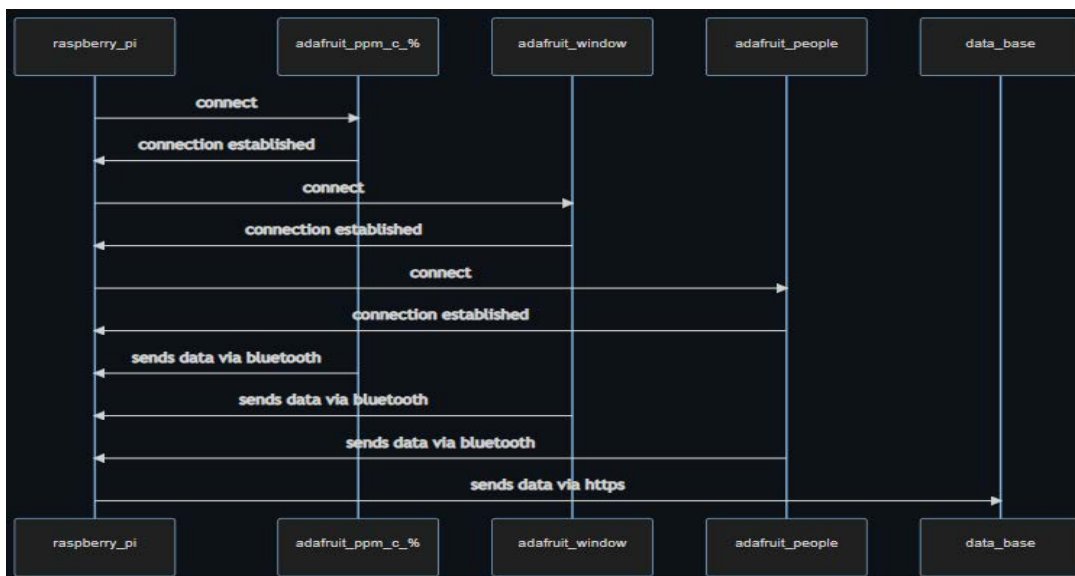
Systemarchitektur

Die Sensoren sind alle mit Drähten an verschiedenen Pins des Mikrocontrollers angeschlossen. Pro Mikrocontroller ist immer nur ein Sensor angeschlossen. Dabei verwenden wir analoge Kommunikation zwischen dem Infrarotsensor sowie der 7 Segment Anzeige und den dazugehörigen Feathers. Der SCD30 Sensor verwendet als Protokoll die I2C Schnittstelle. Die Feathers sind mit dem Raspberry Pi alle über UART Bluetooth verbunden. Die Feathers senden Informationen wie Sensor ID und Messwerte mithilfe eines Strings. Zuletzt haben wir noch den Raspberry Pi, welcher die Daten der Feather wie erwähnt über Bluetooth empfängt, verarbeitet und mit Hilfe einer Restful API an die Datenbank sendet.



Software Module/Sequenzdiagramm

Jeder Mikrocontroller ist mit dem Raspberry Pi via Bluetooth verbunden und versendet die Messdaten an den Raspberry Pi wie folgt:



Das Programm "mainUnit.py", welches nach jedem Neustart vom Raspberry Pi automatisch ausgeführt wird, versucht sich mit den einzelnen Mikrocontrollern zu verbinden. Das Timeout für ein Verbindungsaufbau beträgt 10 Sekunden. Falls nach 10 Sekunden die Verbindung mit dem Microcontroller nicht steht, wird eine Pause von t Sekunden eingelegt und die Verbindung zum nächsten Microcontroller versucht. Verbundene Microcontroller senden die Messdaten an den Raspberry Pi und dieser wiederum an die Datenbank.



Datenbank

Die Daten, die wir mit Hilfe der Sensoren sammeln, müssen in einer Datenbank gespeichert werden. Wir nutzen eine Oracle Cloud DB die über API via http-Request angeschrieben und gelesen werden kann.

Anforderungen

Folgende Informationen werden in der Datenbank abgespeichert:

- Datum und Uhrzeit
- Sensor ID
- Messwert
- Physikalische Grössen (z.B. ppm, co2 etc.)

Um die Daten später wieder auszulesen und damit Analysen durchzuführen, braucht es einen Zeitstempel. Der Sensor selbst sendet keinen Zeitstempel sondern wir nutzen den von der Datenbank. Dies hat den Grund, da es einfacher zu Handhaben ist und die Messung nicht verfälschen kann. Indem der Sensor ständig misst, die Resultate jedoch nur in einem definierten Zeitabstand an die Datenbank gesendet werden, gewährleisten wir somit keine verfälschten Resultate. Weiter sollen neben den Daten der Sensoren noch Informationen über den genauen Standort der Sensoren gespeichert werden können. Diese Informationen sind wichtig, falls wir an mehreren Standorten Messungen durchführen möchten. Aus diesen Anforderungen haben wir das konzeptionelle Modell erstellt (s. Abb. rechts).



Datenbankmodelle im Vergleich

Für uns kommen zwei verschiedene Datenbankmodelle in Frage. Wir haben auf der einen Seite ein relationales Datenbankmodell welches den Vorteil bringt, dass es die Relationen abbilden kann, jedoch nicht so effektiv ist im abspeichern bzw. beim Auswerten der Zeitreihendaten. Und auf der anderen Seite ein Zeitreihen basiertes Datenbankmodell. Dieses hat wie der Name schon sagt, den grossen Vorteil, dass es extra konzipiert wurde um Zeitreihendaten zu speichern und auszuwerten.

Entscheidung Datenbank

Wir haben uns für das relationale Modell, welches von Oracle via A. Kennel zur Verfügung gestellt wurde, entschieden. Denn bei InfluxDB sind die Daten nur für 30 Tage gespeichert. Des Weiteren sind Abbildungen von Relationen nicht möglich.

Umsetzung konzeptionelles Modell

Mit Hilfe des konzeptionellen Modells war es ohne grösseren Aufwand möglich ein logisches Modell zu entwickeln, welche dann später in der Datenbank umgesetzt werden konnte. Wir haben uns dafür entschieden, jeden Messwert in eine eigene Zeile geschrieben wird. Dies ermöglicht es uns den Zeitstempel der Datenbank zu verwenden, da die Sensordaten unabhängig voneinander in die Datenbank geschrieben werden. Dies ist wichtig, da wir bei gewissen Sensoren nur den Messwert senden, falls dieser seinen Wert verändert und bei anderen Sensoren senden wir in regelmäßigen Zeitabständen die Messwerte. Zudem werden bei Ausfällen von Sensoren nur die Daten geschrieben, welche auch zur Verfügung stehen.

Analyse

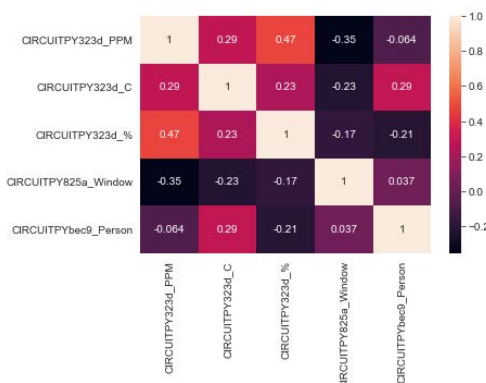
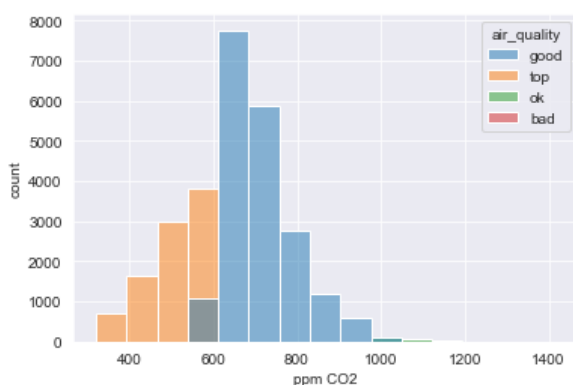
Nach einem Gespräch mit dem Facility Manager der FHNW Brugg und mehreren Messversuchen, kamen wir zum Entschluss, dass die Messungen in den Räumlichkeiten der FHNW uninteressant sind. Denn die Fachhochschule hat die Vorschrift aufgrund COVID-19 die Lüftungen durchgehend laufen zu lassen. Dies führt zu einem konstanten CO2 Gehalt von etwa 600 ppm. Aus diesem Grund haben wir uns für einen anderen Raum entschieden. Die Küche in der WG von Harris eignet sich dafür gut. Denn in diesem Raum befinden sich öfters mehrere Personen. Zudem verfügt die Küche über ein grosses Fenster sowie ein Eingang um die Personen zu zählen. Durch das Kochen hoffen wir auf einen stärkeren Einfluss bei der Luftfeuchtigkeit.

Erster Überblick

Es zeigen sich über den gesamten Zeitraum der Aufnahme keine signifikant schlechten ppm Werte in der Küche (s. Abb. links). Das kann daran liegen, dass die Türe immer geöffnet war und durch das Lüften an anderen Stellen wie z.B. Wohnungstüre, Fenster Wohnzimmer, Fenster Keller etc. selten hohe ppm Werte entstehen konnten. Die ppm Werte haben wir folgendermassen kategorisiert:

- Top für alles unter 600
- Good für [600, 1000]
- Ok für [1000, 1400]
- Bad für alles über 1400

Quelle: <https://de.elv.com/gesunde-luft-co2-als-indikator-der-luftguete>



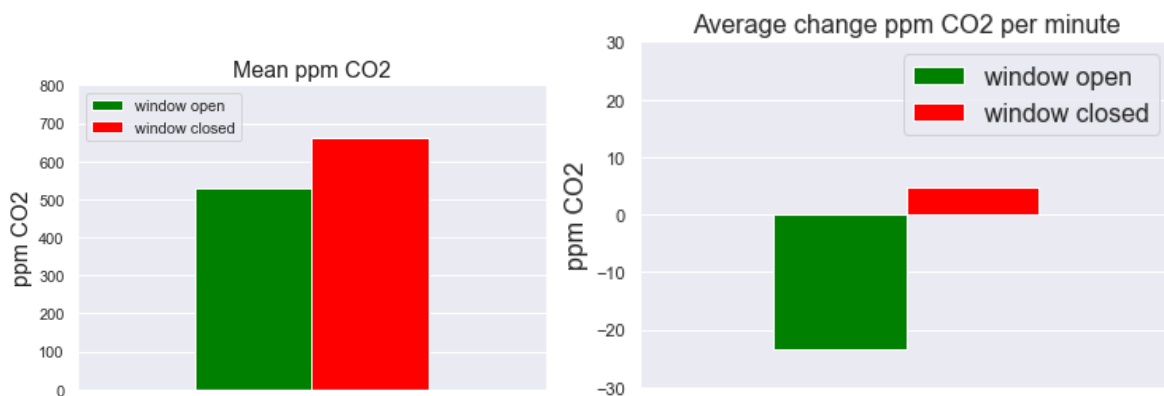
Auf den ersten Blick besteht auch wenig Korrelation zwischen den einzelnen Messwerten (s. Abb. rechts). Nur bei CO₂ ppm/Luftfeuchtigkeit konnte eine erhöhte Korrelationen (47%) festgestellt werden.

Erkenntnisse aus Daten

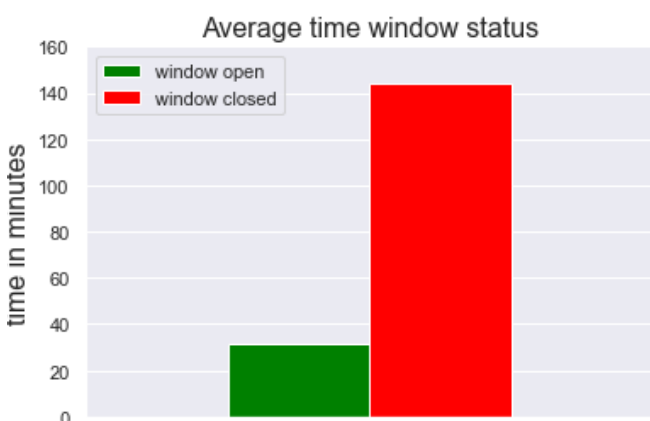
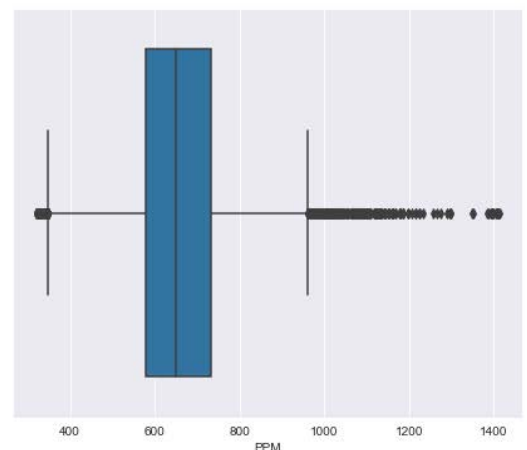
Im Schuljahr 2020/2021 befanden sich 976'105 (Quelle: [BFS obligatorische Schule](#)) Schüler in der obligatorischen Schule. Neben den Schülern der Volksschule gab es im selben Jahr 276'607 (Quelle: [BFS Tertiärstufe](#)) Personen in den tertiären Stufen (Universität, Fachhochschule und Pädagogische Hochschule). Das sind alleine knapp $\frac{1}{8}$ der Schweizer Bevölkerung, die sich täglich in Innenräumen aufhalten und dabei sind noch keine Personen die weiteren Tätigkeiten in Innenräumen nachgehen z.B. Büro etc, eingerechnet. Um sich auch entsprechend in Innenräumen konzentrieren zu können, ist eine hohe Luftqualität nötig. Um die Luftqualität zu bestimmen, wird der CO₂ gehalt in PPM (Parts per million) gemessen.

Zusammenhang zwischen Luftqualität und Lüften

In der Abbildung "Mean ppm CO₂" kann folgendes entnommen werden: Der durchschnittliche CO₂ Wert liegt tiefer wenn das Fenster geöffnet ist. Dies ist ein Indiz dafür, dass durch Lüften die Luftqualität gesteigert wird. Dies sind jedoch nicht die einzigen Beweise, die wir für diese Beantwortung dieser Frage gefunden haben. So haben wir auch berechnet, wie sich der CO₂ Wert pro Minute verändert, während das Fenster geschlossen oder geöffnet ist. Wir sehen auch hier, dass der CO₂ Wert sinkt, im Schnitt um etwa 23.8 ppm/min. Während er bei geschlossenem Fenster im Durchschnitt um 5.7 ppm/min steigt. Dies kann man in der Visualisierung "Average change ppm CO₂ per minute" sehen. Wir sehen also, dass durch das öffnen des Fensters der CO₂ Gehalt drastisch gesenkt werden kann.



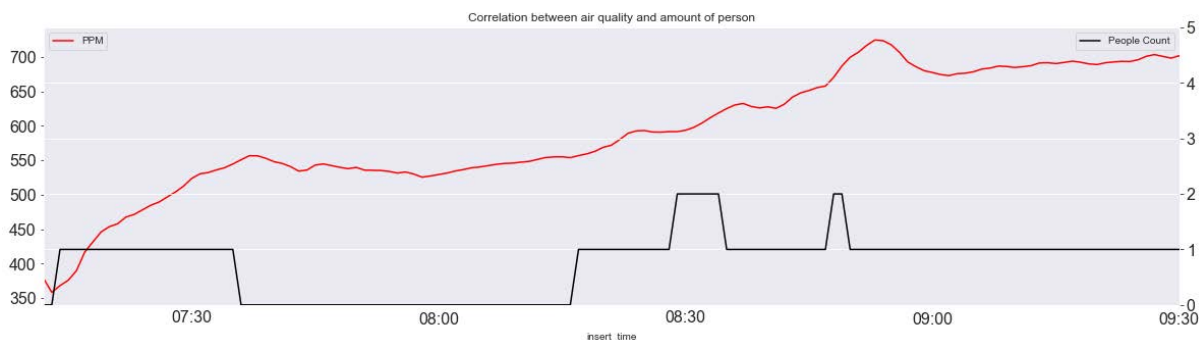
Im Boxplot sehen wir die Verteilung der gemessenen CO₂ Werte über einen Zeitraum von knapp 30 Tagen. Spannend dabei ist, dass der CO₂ Wert durchschnittlich bei 650 ppm liegt. Dieser Wert ist sehr tief und spricht für eine gute Luftqualität. Jedoch sei zu erwähnen, dass der Raum über die längste Zeit hinweg leer stand und somit auch kein erhöhter CO₂ Gehalt produziert werden konnte. Somit erreicht der CO₂ Wert nur selten 1400 ppm oder mehr. 1400 ppm ist die Grenze bei der man von schlechter Luft spricht und man lüften sollte.



In der Visualisierung "Average time window status" sehen wir, dass nach 140 Minuten durchschnittlich für 31 Minuten gelüftet wurde. Der Lüftungszyklus sowie der Leerstand sind somit der Grund für die oben erwähnte gute Luftqualität.

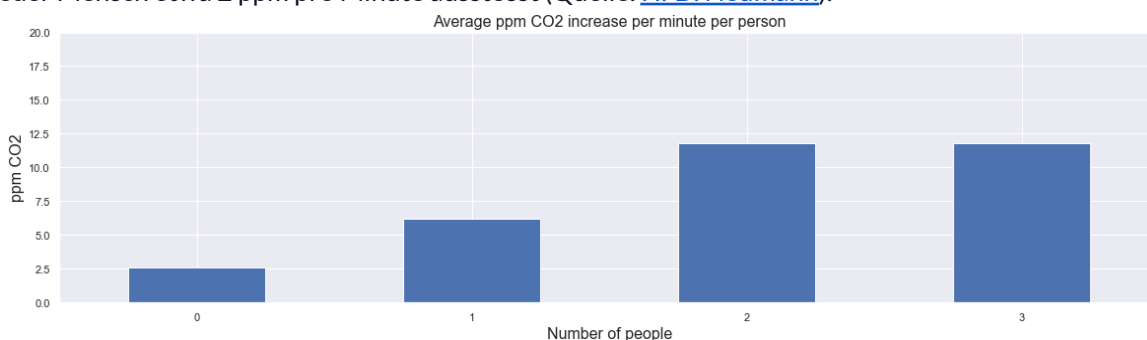
Zusammenhang zwischen Luftqualität und Anzahl Personen im Raum

Die Luftqualität wird wie bereits in der Einführung erwähnt in PPM (CO₂) gemessen. Hat man einen einzelnen CO₂ Wert ohne weitere Informationen wie zum Beispiel die Veränderung über einen gewissen Zeitraum, so ist es nicht möglich die Anzahl der Personen zu bestimmen. Dies aus dem einfachen Grund, dass der CO₂ Wert nicht alleine von der Anzahl Personen abhängt sondern auch vom Lüften des Raumes. Man kann jedoch annehmen, dass ein Zusammenhang zwischen dem Anstieg des CO₂ Wertes und der Anzahl Personen im Raum existiert. Es ist jedoch sehr schwierig vorherzusagen wie viele Personen sich tatsächlich im Raum befunden haben, da nicht nur die Anzahl an Personen im Raum den CO₂ Gehalt beeinflussen sondern auch zum Beispiel was die Personen gerade tun.



Linearer Zusammenhang zwischen CO₂ Wert und Anzahl Personen

Im Diagramm "ppm increase per minute per person" sieht man auf den ersten Blick, dass ein Zusammenhang zwischen Anzahl Personen im Raum und der Luftqualität existiert. Von 0 bis 2 Personen zeigt sich ein linearer Anstieg, eine Verdopplung des CO₂ Wertes. Bei 3 Personen wiederum stagniert dieser Anstieg, in unserem Fall ist dies leicht zu erklären, da sich selten 3 Personen im Raum aufgehalten haben und die Verteilung der Daten vorwiegend bei 1 bis 2 Personen lag. Leider kann somit keine endgültige Aussage getroffen werden, da wir nicht wissen wie sich der Trend fortsetzen würde, wir vermuten aber der lineare Trend würde sich fortsetzen, da jeder Mensch etwa 2 ppm pro Minute ausstösst (Quelle: [H.-D. Neumann](#)).

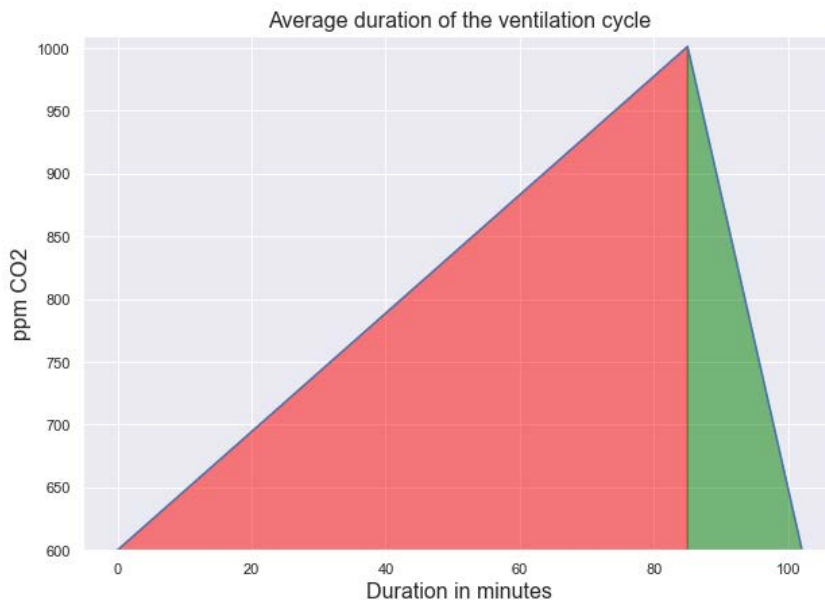


Optimaler Zeitpunkt zum Lüften

Wie lange sollte man laut wissenschaftlichen Erkenntnissen lüften? Dabei empfiehlt zum Beispiel das Bundesamt für Gesundheit (BAG), dass man 5-10 Minuten lang stosslüften (Quelle: [BAG korrektes lueften](#)) sollte, doch reicht das überhaupt aus? Ein weiteres Zitat das wir gefunden haben:

“Ziel sollte sein, einen CO₂-Wert von 1.000 ppm nicht zu überschreiten. 1.400 ppm ist die obere Grenze für akzeptable Raumluft. Um dies zu erreichen, muss im Normalfall alle 1 bis 2 Stunden aktiv gelüftet werden.”

(Quelle: [optimales lüften](#)) Diese Grenze von 1000 ppm haben wir genommen um den perfekten Intervall zu definieren um zu Lüften. Mithilfe der durchschnittlichen Zunahme des CO₂ Gehaltes haben wir folgendes Diagramm erstellt.



Dieses zeigt, das der perfekte Zeitraum um zu Lüften nach etwa 85 Minuten liegt. Das heisst, etwa jede Stunde sollte man für etwa 15 Minuten lang lüften. Nach diesen 15 Minuten ist man wieder auf einem CO₂ Wert von etwa 600 ppm. Dies haben unsere Daten ergeben und diese decken Erkenntnisse decken sich mit der Aussage das man in nach jeder Stunde etwa 5-10 Minuten lüften sollte.

Lessons Learned

Umgebung

Die zu analysierende Umgebung muss im Vorfeld hinterfragt werden, d.h. hätten wir uns folgende Fragen gestellt:

- Gibt es Lüftungsanlagen, da wir uns in einer modernen Einrichtung befinden?
- Falls ja, wie lange läuft die Lüftungsanlage?
- Da wir das nicht wissen können, wer kann uns diese Frage beantworten?

So hätte man sich früher mit dem Hausdienst in Kontakt gesetzt. Der Hausdienst hätte uns dann, ohne das wir jemals Daten gesammelt haben, darauf aufmerksam gemacht, dass die Lüftungsanlagen wegen der Pandemie 24 Stunden am Tag in Betrieb sind. Somit wären wir schnell auf eine andere Umgebung umgestiegen. Da alle Sensoren in Abhängigkeit von der Umgebung eingerichtet und dementsprechend abgestimmt werden müssen, hätten wir uns Zeit so einsparen können.

Technischer Fokus

Um herauszufinden welche Hardware für einen spezifischen Fall am geeignetsten ist, sollte man schnellstmöglich die Kommunikation zwischen Raspberry Pi, Mikrocontroller und Sensor zum Laufen bringen. Wir haben uns zu Beginn der Challenge darauf fokussiert, dieses Ziel zu erreichen. Was sich später als gute Entscheidung herausstellte. Sobald ein erster Prototyp steht, kann man mit dem Testen beginnen. Während dem Testen zeigt sich dann welche Sensoren für welches Szenario wirklich funktionieren und welche nicht. Falls kein Sensor in Frage kommt, konnten wir den Experten bitten einen alternativen Sensoren zu bestellen.

Kurz- und langfristige Tests

Kurzfristige Tests sind nützlich, um zu entscheiden welche Sensoren Sinn machen, so hat sich auch gezeigt, dass die einfacheren Lösungen zu der besten Datenqualität führen. Beim Ultraschall Sensor, den wir am Anfang genutzt haben um die Personenanzahl im Raum zu ermitteln, hat sich gezeigt, dass dieser zu fehleranfällig ist. Darum haben wir uns für eine einfachere "manuelle" Variante entschieden, mit zwei Drucktasten und einem Display. Längerfristige Tests zeigen was während der Messung alles schief laufen kann. So kann entsprechend adjustiert werden. In unserem Fall haben wir frühzeitig mit der Messung begonnen und währenddessen festgestellt, dass die genutzte Zeitreihen DB (kostenlose Version) alle x Stunden die Verbindung unterbricht und wir diese nicht mehr nutzen möchten.