

Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden
Fakultät Elektrotechnik, Medien und Informatik

Studiengang Medieninformatik



Ostbayerische Technische Hochschule
Amberg-Weiden

Bachelorarbeit

von

Helge Kohl

**Benachrichtigungssystem zur Steigerung der
Raumlufthqualität durch Lüftungsempfehlung**

Notification system to increase the indoor air quality
through ventilation recommendation

Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden
Fakultät Elektrotechnik, Medien und Informatik

Studiengang Medieninformatik

Bachelorarbeit

von

Helge Kohl

**Benachrichtigungssystem zur Steigerung der
Raumluftqualität durch Lüftungsempfehlung**

Notification system to increase the indoor air quality
through ventilation recommendation

Bearbeitungszeitraum: von 28. Mai 2021
bis 27. Oktober 2021

1. Prüfer: Prof. Dr. Dieter Meiller

2. Prüfer: Veit Stephan M. Eng.

Bestätigung gemäß § 12 APO

Name und Vorname
der Studentin/des Studenten: **Kohl, Helge**

Studiengang: **Medieninformatik**

Ich bestätige, dass ich die Bachelorarbeit mit dem Titel:

**Benachrichtigungssystem zur Steigerung der Raumluftqualität durch
Lüftungsempfehlung**

selbständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine
anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benützt sowie wörtliche und
sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Datum: 30. September 2021

Unterschrift:

Bachelorarbeit Zusammenfassung

Studentin/Student (Name, Vorname): **Kohl, Helge**
Studiengang: Medieninformatik
Aufgabensteller, Professor: Prof. Dr. Dieter Meiller
Ausgabedatum: 28. Mai 2021 Abgabedatum: 30. September 2021

Titel:

**Benachrichtigungssystem zur Steigerung der Raumluftqualität durch
Lüftungsempfehlung**

Zusammenfassung:

Durch die Entwicklung eines Benachrichtigungssystems soll dabei unterstützt werden eine anhaltend hohe Raumluftqualität zu gewährleisten. Dieses soll ermitteln wann ein Luftwechsel sinnvoll und ob dessen Durchführung ausreichend ist.

Im Rahmen dieser Arbeit soll untersucht werden, wie ein Benachrichtigungssystem, bei der Aufrechterhaltung einer hohen Luftqualität durch Lüften, unterstützen kann.

Schlüsselwörter: Benachrichtigungssystem, Sensoren, Raumluftqualität, Machine-Learning

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Begriffsverzeichnis	vii
Abbildungsverzeichnis	x
Tabellenverzeichnis	xi
Listings	xii
Formelverzeichnis	xii
1 Einleitung	1
1.1 Thematische Einführung	1
1.2 Ziel der Arbeit	1
1.3 Methodisches Vorgehen	2
2 Verbesserung der Raumluftqualität durch Lüften	3
2.1 Ermittlung der Raumluftqualität	3
2.1.1 Was versteht man unter Raumluftqualität?	3
2.1.2 Kohlenstoffdioxid	4
2.1.3 Temperatur	5
2.1.4 Luftfeuchtigkeit	5
2.1.5 Weitere Parameter	6
2.1.6 Resümee	9
2.2 Lüften als Maßnahme zur Steigerung der Raumluftqualität	9
2.2.1 Wovon ist Fensterlüftung abhängig?	10
2.2.2 Welche Methoden gibt es?	10
2.2.3 Wie werden die Parameter durch Lüften beeinflusst?	10
2.2.4 Was soll erreicht werden?	11
3 Analyse bestehender Systeme	13
3.1 Überwachung der Raumluftqualität	13
3.2 Vorhersage der Raumluftqualität	13
3.3 Fazit	14
4 Anforderungen an das System	15
4.1 Anforderungskatalog	15
4.1.1 Anforderung FA-1	15
4.1.2 Anforderung FA-2	16

4.1.3	Anforderung FA-3	16
4.1.4	Anforderung FA-4	17
5	Konzept	18
5.1	Gesamtsystem	18
5.2	Datenermittlung	20
5.3	Kommunikation zwischen Sensoren und dem Server	20
5.3.1	Variante 1	20
5.3.2	Variante 2	20
5.4	Datenverarbeitung am Server	21
5.5	Datenverwaltung der Datenbank	22
5.5.1	users	22
5.5.2	sensors	22
5.5.3	logs	23
5.5.4	weather_datas	23
5.5.5	locations	23
5.6	Vorhersagen des Machine Learning Servers	23
5.7	Nutzerschnittstelle Client	23
6	Entwicklung des Benachrichtigungssystems	25
6.1	Übersicht Gesamtsystem	25
6.2	Ermittlung der Daten	25
6.2.1	Raumluft	26
6.2.2	Außenluft	28
6.3	Datenverarbeitung	28
6.3.1	Zeitpunkt von einer Grenzwertüberschreitung ermitteln	28
6.3.2	Prognose der benötigten Luftwechseldauer	33
6.4	Unterstützung der Nutzer	38
6.4.1	Visualisierung	38
6.4.2	Benachrichtigung	39
7	Evaluierung	41
7.1	Auswertung der implementierten Anforderungen	41
7.1.1	Anforderung FA-1	41
7.1.2	Anforderung FA-2	46
7.1.3	Anforderung FA-3	46
7.1.4	Anforderung FA-4	46
7.2	Fazit	47
8	Zusammenfassung und Ausblick	48
	Literaturverzeichnis	49

Abkürzungs- und Begriffsverzeichnis

Symbole der chemischen Elemente

<i>As</i>	Arsen
<i>BaP</i>	Benzo[a]pyren
<i>Cd</i>	Cadmium
<i>CO</i>	Kohlenmonoxid
<i>CO₂</i>	Kohlenstoffdioxid
<i>NO₂</i>	Stickstoffoxid
<i>Ni</i>	Nickel
<i>O</i>	Sauerstoff
<i>O₃</i>	Ozon
<i>PM</i>	Particulate Matter, deutsch: Schwebstoff
<i>SO₂</i>	Schwefeldioxid

Einheiten

<i>ppm</i>	Parts per Million, wörtlich übersetzt „Anteile pro Millionen“
<i>µg</i>	Mikrogramm
<i>mg</i>	Milligramm
<i>ng</i>	Nanogramm
<i>m³</i>	Kubikmeter
Vol.-%	Volumenprozent bezeichnet das Maß für den Anteil eines Stoffes an einem Gemisch bezogen auf das Volumen

Abkürzungen

IDE	Integrierte Entwicklungsumgebung
MAE	mittlerer absoluter Fehler
PM₁₀	Partikel mit einer Größe kleiner als 10 µm
PM_{2,5}	Partikel mit einer Größe kleiner als 2,5 µm
WHO	World Health Organization, deutsch: Weltgesundheitsorganisation

Begriffe

Aerosol	feinste Verteilung schwebender fester oder flüssiger Stoffe in Gasen, besonders in der Luft z.B. Rauch, Nebel
Arduino	Mikrocontroller mit analogen und digitalen Ein- und Ausgängen
Bioeffluenzen	Von Menschen verursachte Belastungen der Raumluft wie Kohlendioxid oder Gerüche
Web-Framework	Software, die für die Entwicklung von dynamischen Webseiten, Webanwendungen oder Webservices ausgelegt ist
Indikator	Hilfsmittel, das gewisse Informationen anzeigen soll
Isotop	Atomarten, deren Atomkerne gleich viele Protonen, aber unterschiedlich viele Neutronen enthalten
JavaScript	Skriptsprache zur Interaktion und Manipulation von Webseiten
kanzerogen	auch karzinogen, deutsch krebserzeugend
Machine-Learning	deutsch: maschinelles Lernen, ist eine Anwendung der künstlichen Intelligenz. IT-Systeme lernen automatisch Muster und Zusammenhänge aus Daten und verbessern sich
Prediction	deutsch: Vorhersage, die Ausgabe eines Machine-Learning-Algorithmus wird häufig als „prediction“ bezeichnet
Python	Objektorientierte interpretierte Programmiersprache, die mit dem Ziel einer einfachen Übersichtlichkeit entworfen wurde
respiratorisch	die Atmung (Respiration) betreffend

- SARS-CoV-2** Virus der Virusfamilie der Coronaviren. SARS steht hierbei für „Schweres Akutes Atemwegssyndrom“
- Smart-Building-Systeme** Systeme zur Digitalisierung von Gebäuden, nicht auf Wohngebäude begrenzt

Abbildungsverzeichnis

2.1	Gegenüberstellung von relativer Luftfeuchtigkeit und Temperatur bei einer Messung in einem Raum mit einer Person	11
5.1	Grafische Darstellung der Systemkomponenten und deren Zusammenspiel	19
5.2	Grafische Darstellung des Datenbankentwurfs	22
5.3	Grafische Darstellung des Systemkonzepts	24
6.1	DHT22-Sensor	26
6.2	MH-Z19B-Sensor	26
6.3	Vereinfachte Darstellung des Ablaufs der Sensormessung	27
6.4	Vereinfachte Darstellung des Ablaufs der Datenübertragung mittels Pythonscript	27
6.5	Vereinfachte Darstellung des Ablaufs der API-Abfrage	28
6.6	CO ₂ -Konzentration im Raum bei regelmäßigem Lüften	29
6.7	Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit im Raum bei regelmäßigem Lüften	30
6.8	Exemplarische Visualisierung der Start- und Endzeitpunkte von Luftwechselintervallen	36
6.9	Visualisierung der Werte in der Benutzeroberfläche	39
6.10	Push-Nachricht vor dem Erreichen des Grenzwerts mit dem Browser GoogleChrome	39
7.1	Visualisierung des mittleren absoluten Fehlers in Abhängigkeit zur reellen Dauer bis zum Erreichen des Grenzwerts	42
7.2	Visualisierung des mittleren absoluten Fehlers in Abhängigkeit zur Menge der Eingabewerte	44

Tabellenverzeichnis

2.1	Luftfeuchten, die zur Vermeidung elektrostatischer Aufladungen für diverse Fußbodenbeläge erforderlich sind.	6
2.2	Gegenüberstellung der in Europa geltenden Grenz-/Zielwerte und der Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO) zum Schutz der menschlichen Gesundheit (Zusammenstellung UBA, Stand 08.01.2019) Teil 1	6
2.3	Gegenüberstellung der in Europa geltenden Grenz-/Zielwerte und der Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO) zum Schutz der menschlichen Gesundheit (Zusammenstellung UBA, Stand 08.01.2019) Teil 2	7
2.4	Gegenüberstellung der in Europa geltenden Grenz-/Zielwerte und der Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO) zum Schutz der menschlichen Gesundheit (Zusammenstellung UBA, Stand 08.01.2019) Teil 3	7
4.1	Detaillierte Spezifikation der Anforderung FA-1	15
4.2	Detaillierte Spezifikation der Anforderung FA-2	16
4.3	Detaillierte Spezifikation der Anforderung FA-3	16
4.4	Detaillierte Spezifikation der Anforderung FA-4	17
7.1	Mittlerer absoluter Fehler bei einer Dauer t bis zum Erreichen des Grenzwertes	43
7.2	Mittlerer absoluter Fehler bei einer Eingabe mit der Dauer t	45
7.3	Bewertung der Modelle anhand von R^2 und MAE	46

Listings

6.1	Ermitteln des letzten minimalen CO_2 -Werts	31
6.2	Berechnung des nächsten CO_2 -Werts	32
6.3	Berechnung der nächsten CO_2 -Werte bis der Grenzwert erreicht wurde	33
6.4	Ermittlung der Indizes der Daten vor und nach dem Lüften	34
6.5	Zusammensetzen der Datensätze	35

Formelverzeichnis

6.1	Berechnung des mittleren CO_2 -Anstiegs	31
-----	---	----

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Thematische Einführung

Durch die weiter anhaltende SARS-CoV-2-Pandemie werden momentan viele Wege untersucht, die Verbreitung des Virus zu verhindern. Da das Virus über Aerosole in der Luft übertragbar ist, wird vom Umweltbundesamt (2020) neben Atemschutzmasken ein regelmäßiger Luftwechsel empfohlen.

Allerdings ist ein Luftwechsel nicht nur sinnvoll, um das Infektionsrisiko zu verringern, denn eine schlechte Raumluftqualität verringert auch das Wohlbefinden und die Produktivität der im Raum befindlichen Personen und kann im schlimmsten Fall sogar zu gesundheitlichen Schäden führen (Seppänen und Fisk, 2008, S. 730).

1.2 Ziel der Arbeit

Raumlufttechnische Anlagen sind sehr kostspielig und zusätzlich nur in den seltensten Fällen vorhanden. Hinzu kommt, dass eine anhaltend gute Raumluftqualität erfordert, dass die Personen im Raum regelmäßiges Lüften weder vergessen noch vernachlässigen. Daher gilt zu untersuchen, wie Menschen in Innenräumen dabei unterstützt werden können, eine hohe Raumluftqualität durch Lüften aufrecht zu erhalten.

Derzeit werden viele Systeme, die auf unterschiedlichste Weise ermitteln, ob ein Luftwechsel erforderlich ist, angeboten. Im Handel erhältliche Systeme beschränken sich jedoch auf eine Benachrichtigung zum Zeitpunkt einer Grenzwertüberschreitung. Daher soll in dieser Arbeit ein System entwickelt werden, das dessen Nutzer besser dabei unterstützt, indem es ihm schon vor einer Grenzwertüberschreitung informiert und Informationen über die Dauer des Luftwechsels bietet. Zusätzlich soll untersucht werden welche Daten für die Ermittlung des Luftwechselbedarfs relevant sind und wie diese zu verwenden sind.

Zusammenfassend lassen sich daraus folgende Fragestellungen ableiten:

- Wie lässt der Zeitpunkt vorhersagen, zu dem die Raumluft gewechselt werden muss?
- Wie lässt sich die Dauer des Luftwechsels optimieren?
- Wie muss ein System konzipiert sein, um dessen Nutzer optimal zu unterstützen?

1.3 Methodisches Vorgehen

Um die oben genannten Ziele zu erreichen, sollen in der Arbeit zuerst einige Grundlagen zum Thema Raumluft und Lüften geklärt werden. Danach soll der bereits existierende Systeme analysiert und Lücken aufgedeckt werden. Im Anschluss sollen funktionale Anforderungen an das System definiert werden. Mit Hilfe der Anforderungen wird ein Konzept ausgearbeitet, welches dann prototypisch entwickelt werden soll. Abschließen soll das Konzept und der Prototyp mithilfe der Anforderungen evaluiert werden. Abschließen wird ein Fazit gezogen und ein Ausblick auf weitere Verbesserungen gegeben.

Kapitel 2

Verbesserung der Raumluftqualität durch Lüften

In diesem Kapitel sollen zunächst einige Begriffe der Raumluftqualität geklärt werden. Was ist Raumluftqualität und welchen Einfluss haben die Inhaltsstoffe der Luft? Das Ziel dieser Arbeit ist es eine verbesserte Raumluftqualität über den Tag hinweg durch Lüften zu erreichen, daher soll auf den Begriff *Lüften* näher eingegangen werden.

2.1 Ermittlung der Raumluftqualität

Um die Raumluftqualität zu verbessern muss zuerst verstanden werden, um was es sich dabei handelt. Deshalb soll in *Unterabschnitt 2.1.1* der Begriff *Raumluftqualität* geklärt werden. In den darauf folgenden Unterabschnitten werden dann die einzelnen Bestandteile der Luft behandelt.

2.1.1 Was versteht man unter Raumluftqualität?

Die Luft, sowohl Innen als auch Außen, besteht aus weit mehr als nur Sauerstoff (O) und Kohlenstoffdioxid (CO₂). Mit dem Begriff Raumluftqualität sollen alle Aspekte der Raumluft betrachtet werden, welche Einfluss auf im Raum befindliche Personen, Tiere oder sogar Geräte und Maschinen haben (Kubba, 2017, S. 353). Die Arbeit beschränkt sich allerdings auf den Aspekt Mensch.

Nach Fanger (1994), welcher zwar vor etwa 30 Jahren veröffentlicht hat dennoch aber in aktuellen Veröffentlichungen immer wieder als Quelle verwendet wird, wird beim Einatmen die menschliche Lunge, auf einer Fläche von ca. einhundert Quadratmetern, allen in der Atemluft enthaltenen Komponenten ausgesetzt. Dabei wird schnell klar in welchem Ausmaß die Atemluft die Gesundheit der Menschen beeinflusst. Des Weiteren wird laut Fanger (1994) von Raumnutzern gefordert, dass die Raumluft als frisch und angenehm empfunden wird sowie gesundheitlich unbedenklich ist. Daher wird die Raumluftqualität als hoch bezeichnet, wenn die Betroffenen zufrieden sind und niedrig, wenn viele Personen unzufrieden sind oder ein Gesundheitsrisiko besteht.

Bei der empfundenen Raumluftqualität handelt es sich um die Luftqualität die von Personen im Raum empfunden wird. Neben dem Geruchssinn empfindet der Mensch über freie Nervenendungen, welche sich in den Schleimhäuten befinden, mit dem sogenannten chemischen Sinn. Weiter sagt Fanger (1994), dass eine Messung der empfundenen Raumluftqualität derzeit nicht möglich ist und die empfundene Raumluftqualität durch ein Verfahren bestimmt werden soll. Dafür kann eine Gruppe untrainierter Personen die Akzeptanz der Raumluft bestimmen aus welcher dann die empfundene Raumluftqualität abgeleitet wird.

2.1.2 Kohlenstoffdioxid

Viele Menschen denken, dass durch die Atmung ein Sauerstoffdefizit in der Atemluft in Innenräumen entsteht, jedoch ist dies nach Fanger (1994) ein weitverbreiteter Irrglaube. Der Mensch ist eher unempfindlich was Schwankungen der Sauerstoffkonzentration angeht. Wichtiger dagegen ist das Stoffwechselprodukt CO_2 welches beim Atmen produziert wird. Bereits 1858 hat der Chemiker Max von Pettenkofer festgestellt, dass die CO_2 -Konzentration als Indikator für menschliche Bioeffluenzen in der Raumluft anzusehen ist. Sofern nun keine Einrichtungsgegenstände, wie ein alter Teppich, im Raum vorhanden sind, welche die Luftqualität in starkem Maße negativ beeinflussen, reicht eine Beurteilung mittels CO_2 aus.

Lahrz et al. (2008) nach wird im Wesentlichen die CO_2 -Konzentration in Innenräumen durch folgende Faktoren bestimmt:

- die Anzahl der im Raum befindlichen Personen
- deren Aktivität und Verweildauer
- das Raumvolumen
- Verbrennvorgänge im Innenraum
- Luftwechsel bzw. Außenluftvolumenstrom

Der Empfehlung nach von Pettenkofer (1858) ist ein CO_2 -Gehalt von 0,1 Vol.-% nicht zu überschreiten. Jedoch sehen Lahrz et al. (2008) diese Ansicht als veraltet an und empfehlen Lüftungsmaßnahmen ab einer CO_2 -Konzentration von über 1000 ppm, gegenüber der Außenluft. Konzentrationen über 2000 ppm werden als hygienisch inakzeptabel eingestuft.

Weiter sollte erwähnt werden das mit einer Senkung der CO_2 -Konzentration in Innenräumen und vor allem Arbeitsräumen eine Steigerung der Leistungsfähigkeit einhergeht. Tiesler et al. (2009) zeigten dies in Ihrem Projekt, bei dem an drei Schulen Messungen, vor und nach Einführung einer neuen Lüftungsroutine, durchgeführt und ausgewertet wurden.

2.1.3 Temperatur

Vorneweg gilt zu erwähnen, dass die Temperatur der Luft eigentlich nicht Teil der Raumluftqualität darstellt, sondern des Raumklimas. Dennoch sollte die Temperatur in dieser Arbeit nicht unbeachtet bleiben. Zum einen hat die Raumlufttemperatur Auswirkungen auf den Menschen und gleichzeitig beeinflusst sie die Effektivität eines Lüftungsvorgangs.

Nach Fanger (1994) sind wichtige, zentral gelegene Organe des Körpers nur bei ca. 37°C funktionsfähig. Durch das effektive Temperaturregelsystem des Menschen kann dieser die innere Temperatur konstant halten. Das dafür verantwortliche Temperaturzentrum liegt am Boden des Mittelhirns und erhält von zentralen und peripheren Rezeptoren Signale. Diese Signale sollen auf der einen Seite zu anderem Verhalten anregen, dazu gehören Bekleidungs- oder Ortswechsel, um einer Überhitzung/Unterkühlung zu entgehen. Auf der anderen Seite steuern diese Signale die körpereigenen Thermoregulation. Angenommen der Mensch ist einer erhöhten Umgebungstemperatur ausgesetzt, so soll über die Haut mehr Wärme abgegeben werden und in härteren Fällen wird dies durch Schweißsekretion unterstützt. Auch dadurch wird noch einmal deutlich, dass die Temperatur Auswirkungen auf die Raumluftqualität hat, da der Schweiß eine der Verunreinigung der Luft darstellt.

Da die Regulierung der Raumlufttemperatur durch Lüften maximal an die Außentemperatur angeglichen werden kann, soll sofern möglich, im Rahmen dieser Arbeit, die Raumtemperatur im Bereich von 20-24°C im Winter bzw. 23-26°C im Sommer liegen, da dies die, nach Fangers Behaglichkeitsforderung für Büroarbeit, Wohlfühltemperaturbereiche des Menschen sind.

2.1.4 Luftfeuchtigkeit

Bei der Luftfeuchtigkeit handelt es sich nach Fanger (1994) um eine erwünschte Luftbeimengung die immer in der Atmosphäre vorhanden ist. Die Luft kann bei einer bestimmten Temperatur eine gewisse Menge an Feuchtigkeit halten. Um nun anzugeben wie viel Prozent der Luft mit Wasserdampf gesättigt sind, verwendet man die relative Feuchte. (Häckel, 2021, S. 51-52)

Mikroorganismen und Parasiten sind an eine höhere Luftfeuchtigkeit gebunden, bei niedriger Feuchtigkeit kann es zu unerwünschten Erscheinungen wie statischer Elektrizität kommen. Es wird davon ausgegangen, dass die relative Feuchte im Bereich von 30-70% liegen sollte. Bei kalten Außentemperaturen wird eine obere Grenze von ca. 50% empfohlen, um Kondensation zu vermeiden. Vor allem im Winter haben viele Menschen das Problem, dass sie sich elektrisch aufladen. Dies ist auf eine geringe relative Luftfeuchte und Materialeigenschaften, oft von Bodenbelägen, zurückzuführen. Die Entladung kann dann zu unangenehmen Stromstößen führen. (Fanger, 1994, S. 165-166)

Bodenbelag	Relative Luftfeuchtigkeit in %
Teppich auch Nylon, Acryl, Wolle	> 45
Linoleum, Vinyl	> 35
Teppich aus Baumwolle	> 30
Beton, Stein, Holz	> 25

Quelle: Fanger (1994, S. 166)

Tabelle 2.1: Luftfeuchten, die zur Vermeidung elektrostatischer Aufladungen für diverse Fußbodenbeläge erforderlich sind.

2.1.5 Weitere Parameter

Neben den oben genannten Bestandteilen der Luft gibt es noch einige Weitere, darunter Verbrennungsprodukte (Kohlenmonoxid und Nitrose Gase), Radon, Allergene, Bakterien und Viren.

	EU-Grenz-/Zielwerte ¹	WHO-Empfehlungen ^{2 3}
	Grenzwerte	Richtwerte
Feinstaub PM ₁₀ Jahresmittelwert	40 µg/m ³	20 µg/m ³
Feinstaub PM ₁₀ Tagesmittelwert	50 µg/m ³ , 35 Überschreitungen zulässig	50 µg/m ³ , 3 Überschreitungen zulässig
Feinstaub PM _{2,5} Jahresmittelwert	25 µg/m ³ ⁴	10 µg/m ³
Feinstaub PM _{2,5} Tagesmittelwert	-	25 µg/m ³ , 3 Überschreitungen zulässig
Stickstoffdioxid NO ₂ Jahresmittelwert	40 µg/m ³	40 µg/m ³
Stickstoffdioxid NO ₂ 1-Stundenmittelwert	200 µg/m ³ , 18 Überschreitungen zulässig	200 µg/m ³
Schwefeldioxid SO ₂ Tagesmittelwert	125 µg/m ³ ; 3 Überschreitungen zulässig	20 µg/m ³
Schwefeldioxid SO ₂ Stundenmittelwert	350 µg/m ³ , 24 Überschreitungen zulässig	
Kohlenmonoxid CO 8-Stundenmittelwert	10 mg/m ³	10 mg/m ³

Quelle: Umweltbundesamt (2015)

Tabelle 2.2: Gegenüberstellung der in Europa geltenden Grenz-/Zielwerte und der Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO) zum Schutz der menschlichen Gesundheit (Zusammenstellung UBA, Stand 08.01.2019) Teil 1

	EU-Grenz-/Zielwerte¹	WHO-Empfehlungen^{2 3}
	Zielwerte	Richtwerte
Ozon O ₃ 8-Stundenmittelwert	120 µg/m ³	100 µg/m ³
Cadmium Cd Jahresmittelwert	5 ng/m ³	5 ng/m ³

Quelle: Umweltbundesamt (2015)

Tabelle 2.3: Gegenüberstellung der in Europa geltenden Grenz-/Zielwerte und der Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO) zum Schutz der menschlichen Gesundheit (Zusammenstellung UBA, Stand 08.01.2019) Teil 2

	Eu-Grenz/Zielwerte für kanzerogene Stoffe	WHO: zusätzliches Lebenszeitrisiko, an Krebs zu erkranken⁵
	Grenzwert	
Benzol Jahresmittelwert	5 µg/m ³	1,7 µg/m ³ (Risiko 1:100.000)
	Zielwerte	WHO: zusätzliches Lebenszeitrisiko, an Krebs zu erkranken
Arsen As Jahresmittelwert	6 ng/m ³	6,6 ng/m ³ (Risiko 1:100.000)
Nickel Ni Jahresmittelwert	20 ng/m ³	25 ng/m ³ (Risiko 1:100.000)
Benzo[a]pyren BaP Jahresmittelwert	1 ng/m ³	0,12 ng/m ³ (Risiko 1:100.000)

Quelle: Umweltbundesamt (2015)

Tabelle 2.4: Gegenüberstellung der in Europa geltenden Grenz-/Zielwerte und der Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO) zum Schutz der menschlichen Gesundheit (Zusammenstellung UBA, Stand 08.01.2019) Teil 3

¹Grenz-/Zielwerte zum Schutz der menschlichen Gesundheit aus den EU-Richtlinien 2008/50/EG und 2004/107/EG

²Empfehlungen der WHO für den Schutz der menschlichen Gesundheit aus Air Quality Guidelines for Europe, 2nd edition 2000

³WHO Regional Publications, European Series, No. 91 und WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide, Global update 2005 – Überarbeitung der WHO-Empfehlungen von 2000 hinsichtlich PM₁₀, PM_{2,5}, NO₂, SO₂, Ozon

⁴Zielwert der zum 1.1.2010 erreicht werden sollte, ab 1.1.2015 einzuhaltender Grenzwert

Da die Einbeziehung aller Parameter den Rahmen sprengen würde, sollen bei dieser Arbeit allerdings nur Kohlenstoffdioxid, als Indikator für Schadstoffe in der Luft, die Temperatur und Luftfeuchtigkeit für die Bewertung der Raumluftqualität einbezogen werden. Dennoch soll die Arbeit hier einen kurzen Überblick über die weiteren Bestandteile der Luft geben, da diese einfach zum Thema Luftzusammensetzung gehören.

Verbrennungsprodukte

Laut Fanger (1994) kommen jedes Jahr zahlreiche Menschen wegen unsachgemäßem Betrieb von Gas-, Kohle- oder Kerosinheizern sowie durch unbemerktes Eindringen von Verbrennungsgasen aus Garagen zu Tode. Das dafür verantwortliche Kohlenmonoxid (CO) entsteht bei der unvollständigen Verbrennung fossiler Brennstoffe. Neben CO entstehen bei der Verbrennung bei hohen Temperaturen Nitrose Gase, darunter hauptsächlich Stickstoffoxid (NO_2), welche ebenfalls giftig für den Mensch sind. Um die Konzentration von Verbrennungsprodukten in der Raumluft gering zu halten wird empfohlen die Quellen zu vermeiden oder die Quellstärke zu begrenzen.

Radon

Bei Radon handelt es sich um ein radioaktives Edelgas, welches von Menschen nicht wahrgenommen werden kann. Es entsteht aus natürlichem Uran in Böden und Gesteinen und kann sich in Gebäuden ansammeln. Neben dem Rauchen ist Radon eine der häufigsten Ursachen für Lungenkrebs und stellt daher ein erhebliches Gesundheitsrisiko dar. Beim Zerfall entstehen Isotope von Polonium, Wismut und Blei, welche ebenfalls radioaktiv sind. Diese Folgeprodukte haben die Eigenschaft sich an Aerosole zu binden, welche der Mensch einatmet. Beim Zerfall der Radon-Folgeprodukte in der Lunge werden Alphastrahlen ausgesendet, welche die Zellen im Lungengewebe schädigen und so Lungenkrebs auslösen können. (Bundesamt für Strahlenschutz (2020)) „Auch für Radon gilt es, in erster Linie die Emissionen zu begrenzen und erst dann den Luftwechsel zu erhöhen“ (Fanger, 1994, S. 165).

Allergene

Während höhere Luftfeuchtigkeiten Atemwegserkrankungen vorbeugen, können zu hohe Luftfeuchtigkeitswerte Allergien begünstigen. Dies geschieht durch erhöhte Entstehung typischer Innenraumallergene durch Hausstaubmilben und Schimmelpilze.

Nach Fanger (1994) haben Hausstaubmilben optimale Bedingungen ab relativen Feuchten von 75% und sterben unter 45% ab. Ein Inhaltsstoff des Milbenkots kann bei sensibilisierten Personen eine sogenannte Hausstauballergie auslösen. Nach dem Tod der Milben ist dennoch die Entfernung des Allergens aus dem Raum erforderlich.

⁵Für krebserregende Stoffe gibt die WHO keine Richtwerte an, da kein gesundheitlich sicheres Level einer Exposition empfohlen werden kann. Zum Zwecke einer Orientierung gibt die WHO das zusätzliche Lebenszeitrisiko an Krebs zu erkranken für aus arbeitsmedizinischen Studien abgeleitete Konzentrationswerte an. In der Tabelle ist jeweils die Konzentration entsprechend des Risikos von 1:100.000 angegeben (das heißt ein zusätzlicher Krebsfall bezogen auf 100.000 exponierte Einwohner).

Durch Schimmelpilze bzw. deren Sporen können ebenfalls Allergien hervorgerufen werden. Bei einer relativen Feuchte von über 70% kann es zu Schimmelpilzwachstum kommen. Diese Feuchte muss nicht zwingend im ganzen Raum vorliegen, es reicht eine einzelne Stelle z.B. in Befeuchtern. (Fanger, 1994, S. 166)

Bakterien und Viren

Um sich mit einer Krankheit zu infizieren, benötigt es eine bestimmte Infektionsdosis, deren Höhe vom Erreger und dem Immunsystem des Menschen abhängig ist. Die Übertragung über die Luft erfolgt durch Krankheitserreger, die im Rachenraum oder im Atmungstrakt einer infizierten Person angesiedelt sind. Diese werden beim Sprechen, Niesen und Husten durch winzige Speicheltröpfchen an die Luft abgegeben und werden von anderen Menschen eingeatmet oder über die Schleimhäute aufgenommen. Größere Tröpfchen sinken schnell ab und werden über die Luft meist nur etwa einen Meter weit transportiert. Diese können dann jedoch immer noch über Gegenstände übertragen werden. Kleinere Tröpfchen können allerdings lange Zeit in der Luft schweben und auch über größere Distanzen verbreitet werden. (Bundeszentrale für gesundheitliche Aufklärung, o. D.)

Das Gemisch aus kleineren Tröpfchen und der Luft bezeichnet man als Aerosol (Umweltbundesamt, 2020). Neben den herkömmlichen respiratorischen, die Atmung (Respiration) betreffend, übertragenen Krankheiten wie der Grippe, spielt nun das SARS-CoV-2-Virus eine große Rolle und die Bedeutung einer guten Raumluftqualität steigt. Durch das Verdünnen der Raumluft mit Frischluft kann die Konzentration der Infektionsdosis und somit das Infektionsrisiko verringert werden.

2.1.6 Resümee

Sicherlich haben alle der oben genannten Faktoren einen großen Einfluss auf uns Menschen, dennoch soll diese Arbeit nicht alle Probleme auf einmal lösen. Wie bereits erwähnt soll vor allem auf Kohlenstoffdioxid, Temperatur und Luftfeuchtigkeit näher eingegangen werden. Wieso ich speziell diese Parameter gewählt habe, soll im folgendem Kapitel näher erläutert werden.

2.2 Lüften als Maßnahme zur Steigerung der Raumluftqualität

Nachdem der Begriff *Raumluftqualität* nun geklärt ist, wird der Prozess des *Lüftens* untersucht. In den folgenden Unterabschnitten soll erläutert werden, welche Abhängigkeiten beim Lüften bestehen, wie gelüftet werden kann und wie die Luft dabei beeinflusst wird. Abschließend werden Ziele definiert, anhand derer die Raumluftqualität gesteigert werden soll.

2.2.1 Wovon ist Fensterlüftung abhängig?

„Der Winddruck und die Temperaturdifferenzen und damit die Dichteunterschiede in der Luft sind die Antriebskraft für die freie Lüftung“ (Ranft und Frohn, 2004, S. 82). Zusätzlich sagen Ranft und Frohn (2004), dass im Winter die Temperaturdifferenz, im Sommer hingegen der Wind, die treibende Kraft für einen Luftwechsel durch Fensterlüftung ist. Dabei unterscheidet man beim Fensterlüften zwischen Kipp-, Stoß-, Querlüften und Atriumbelüftung.

2.2.2 Welche Methoden gibt es?

Beim Kipplüften wird, wie der Begriff schon sagt, das Fenster in Kippstellung gebracht. Jedoch ist bei gekippten Fenstern die Fensteröffnung geringer und erlaubt daher nur geringere Volumenströme gegenüber vollständig geöffneten Fenstern bei sonst gleichen Bedingungen. Stoßlüften beschreibt einen Lüftvorgang über ein vollständig geöffnetes Fenster über einen kurzen Zeitraum. Bei der Querlüftung werden Fenster auf unterschiedlichen Fassadenseiten gleichzeitig geöffnet, wodurch ein schneller und hoher Luftwechsel erreicht werden kann. Zuletzt kann beim Atriumlüften, welches baulich bedingt eher seltener möglich ist, die größte Luftwechselrate erreicht werden. Dort wird durch Öffnen von Fenstern an den Fassadenseiten und der Raumdecke gelüftet.

2.2.3 Wie werden die Parameter durch Lüften beeinflusst?

Da der Mensch die Hauptquelle für CO_2 in Innenräumen darstellt (Umweltbundesamt, 2007, S. 1467) und die CO_2 -Konzentration in der Außenluft bei etwa 400 ppm liegt kann durch Lüften, je nachdem wie gut effizient der Luftwechsel ist, ein CO_2 -Wert erreicht werden, der etwa dem der Außenluft gleicht.

Bei der Temperatur und Luftfeuchte hingegen schwanken die Werte auch in der Außenluft. Beides ist abhängig davon welches Wetter gerade vorherrscht. So ist damit zu rechnen, dass es Tagsüber wärmer als nachts ist, im Sommer ist es wärmer als im Winter und unabhängig davon gibt es in den Jahreszeiten kältere bzw. wärmere Tage. Je wärmer nun die Luft, egal ob im Raum oder außen, ist desto mehr Feuchtigkeit kann diese tragen. (Häckel, 2021, S. 50-52)

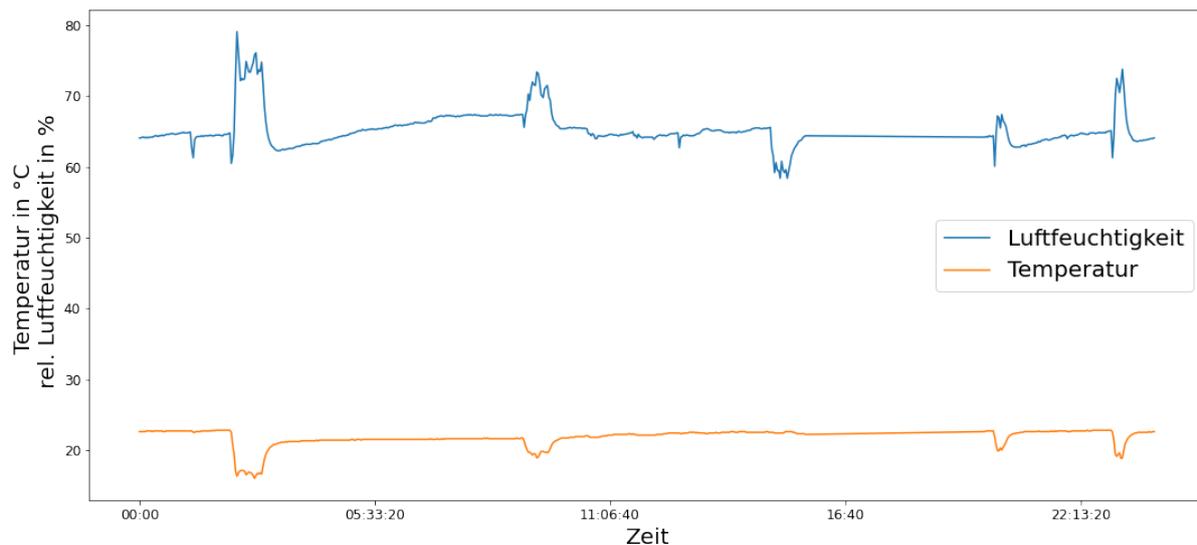


Abbildung 2.1: Gegenüberstellung von relativer Luftfeuchtigkeit und Temperatur bei einer Messung in einem Raum mit einer Person

In *Abbildung 2.1* sieht man, mittels eines Sensors, aufgezeichnete Temperatur- und relative Luftfeuchtigkeitswerte, welche in meinem Arbeits- und Schlafzimmer aufgenommen wurden. An den Stellen, an denen die relative Luftfeuchtigkeit starke Schwankungen aufweist, wurde ein Luftwechsel durch Lüften vorgenommen. Man kann erkennen das beim Sinken der Temperatur, durch Austausch der Raumluft mit kalter Außenluft, die relative Feuchte im Raum ansteigt. Nach erneutem Ansteigen der Temperatur ist erkennbar, dass obwohl die Temperatur nach dem Luftwechsel geringer als davor ist, die relative Luftfeuchtigkeit ebenso niedriger ist als davor. Daraus lässt sich schließen, dass die absolute Luftfeuchtigkeit durch den Luftwechsel gesunken ist. Um etwa 15:00 Uhr sinkt die Luftfeuchtigkeit, obwohl die Temperatur gleich bleibt. Zu dieser Zeit waren die Außen- und Innentemperatur etwa identisch, daher kann man davon ausgehen, dass durch den Luftwechsel Luft mit geringerer Feuchte in den Raum getreten ist.

Durch reines Lüften kann die Temperatur maximal auf die Temperatur der Außenluft korrigiert werden. Wenn die Temperatur nun im Raum zu hoch ist kann diese nur gesenkt werden, wenn außerhalb eine geringere Temperatur herrscht, gleiches gilt umgekehrt. Wenn nun die Temperatur im Raum zu hoch/niedrig ist, die Außentemperatur jedoch noch höher/niedriger, so kann keine Verbesserung durch Lüften erreicht werden. Um die relative Luftfeuchtigkeit zu senken, muss die Raumluft durch Frischluft mit geringerer Feuchte verdünnt werden, eine Erhöhung dagegen durch Lüften ist, ohne Beihilfe durch einen Befeuchter o.ä., nur möglich, wenn die Außenluft einen höheren Anteil an Feuchtigkeit aufweist.

2.2.4 Was soll erreicht werden?

Das Ziel in dieser Arbeit soll eine Verbesserung der Raumluftqualität sein. Durch das Lüften soll die im Raum befindliche CO_2 -Konzentration gesenkt, sowie die Tempe-

ratur und Luftfeuchtigkeit in einen behaglichen Bereich gebracht werden. Sicherlich sind die Temperatur und Luftfeuchtigkeit stark vom Außenklima abhängig, so kann es passieren das in besonders warmen oder kalten Zeiten kein Erfolg durch reines Lüften erzielt werden kann. Sofern allerdings möglich können die Werte zumindest in einen Bereich nahe den Grenzwerten gebracht werden, indem Zeitfenster für einen Luftwechsel optimiert werden. Deshalb soll, abhängig vom Zeitpunkt einer Grenzwertüberschreitung, ermittelt werden ob durch freies Lüften, Lüften durch Winddruck oder Temperaturunterschiede, ein korrigieren der Werte möglich ist. Zusätzlich soll festgestellt werden, wann am besten gelüftet werden sollte und wie lange der Luftwechsel dauern sollte. Der Zeitpunkt wann gelüftet wird hat daher einen Einfluss auf den Luftwechsel, da z.B. durch ein verfrühtes Lüften am Vormittag, vor dem Erreichen des CO₂-Grenzwerts, die Raumtemperatur an einem heißen Sommertag im Verlauf des Tages geringer gehalten werden kann als wenn der Luftwechsel nachmittags bei Spitzentemperaturen stattfindet.

Kapitel 3

Analyse bestehender Systeme

Nachdem im vorherigen Kapitel der Begriff Raumlufthqualität erläutert wurde, soll in diesem Kapitel analysiert werden welche Systeme bereits existieren und welcher Verbesserungsbedarf besteht. Die ggf. nachgewiesene Forschungslücken sollen in der Arbeit weiter untersucht und geschlossen werden.

3.1 Überwachung der Raumlufthqualität

Bei der Überwachung der Raumlufth geht es darum aktuelle Werte zu messen und diese wiederzugeben. Im Handel finden sich sehr viele verschiedene Systeme zur Ermittlung der Raumlufthqualität. Es können von CO₂-Ampeln über Geräte, die nahezu alle der in *Abschnitt 2.1* erläuterten Parameter ermitteln können, erworben werden. Diese zeigen jedoch nur aktuelle oder historische Daten an und geben zum Zeitpunkt einer Grenzwertüberschreitung ein Signal. Eine Vorhersage darüber wann welcher Parameter einen kritischen Wert erreichen wird, wird dort nicht gegeben. Zusätzlich fehlt eine Empfehlung wie der Überschreitung eines Grenzwerts vorgebeugt werden kann.

3.2 Vorhersage der Raumlufthqualität

Schon vorher zu wissen, wann ein Parameter welchen Wert haben wird, eine sogenannte „Prediction“, gibt den Betroffenen mehr Spielraum Entscheidungen zu treffen. Es gibt einige Forschungsarbeiten bezüglich Vorhersagen von Kohlenstoffdioxid, Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und weiteren Parametern, welche die Raumlufthqualität beeinflussen. Saini et al. haben in einer ihrer Publikation „Indoor air quality prediction systems for smart environments: A systematic review“ (2020) einundzwanzig Studien über KI-basierte Raumlufthqualitäts-Vorhersagesysteme aus den Datenbanken von PubMed, IEEE und ACM untersucht. Dabei wurden nur Veröffentlichungen nach 2008 in englischer Sprache berücksichtigt. Bei der Untersuchung sollten Antworten auf die folgenden Fragen gefunden werden:

1. Welche Systemarchitekturen werden für die Datenerfassung verwendet und wie werden die Daten erfasst?
2. Welche Features oder Eingabeparameter werden verwendet, um die Vorhersagesystem zu designen?
3. Welche sind die meistgenutzten KI-Methoden für Raumluftqualitätsvorhersagen?
4. Wie genau und schnell sind diese Vorhersagemethoden?
5. Wo werden diese angewendet?
6. Wie können diese Systeme in Smart-Building-Systeme integriert werden?
7. Wie werden die Ergebnisse den Nutzern präsentiert?

Die Analyse ergab das 14 von 21 Studien CO_2 als Parameter verwendeten, 19 verwendeten Temperatur und die relative Feuchtigkeit wurden in 18 Studien berücksichtigt. Nur acht der Studien haben angegeben wie die Daten dem Nutzer präsentiert werden, davon waren vier Lösungen webbasiert und vier eine Smartphone-App. Weiter geben Saini et al. an, dass ggf. die Effizienz von Raumluftqualitäts-Vorhersagesystemen stark davon abhängt, wie die Daten dem Nutzer präsentiert werden.

Weiter ist aufgefallen, dass die Systeme Vorhersagen in großen zeitlichen Abständen machen. Es werden Vorhersagen von Tageswerten generiert, nicht von stündlichen oder minütlichen Werten. Kurzfristige Vorhersagen sind sehr anfällig für Schwankungen. Nehmen wir als Beispiel einmal den CO_2 -Verlauf in einem Raum. Dieser steigt im Laufe der Zeit abhängig davon wie viele Personen im Raum sind und welche Aktivität diese ausführen. Sollte nun die Anzahl der Personen im Raum oder deren Aktivität häufig wechseln so ist es schwierig eine Vorhersage über deren CO_2 -Emission zu treffen. Weiter kann die Kohlenstoffdioxid-Konzentration sinken, wenn häufig Türen geöffnet oder sogar offen gelassen werden. All das macht eine Vorhersage über kurzen Zeiträume schwer.

Das Ziel der Arbeiten ist es eine Vorhersage zu treffen, wann welcher Parameter welchen Wert erreicht. Zusätzlich spielt die Zeit eine große Rolle, denn wie weit im Voraus lassen sich akkurate Vorhersagen treffen? Weiter werden in den Arbeiten verschiedene Methoden zur Vorhersage verwendet und evaluiert.

3.3 Fazit

Zusammenfassend lässt sich sagen das weiterer Forschungsbedarf bezüglich der Vorhersage von Parametern in kurzen Zeiträumen und deren Präsentation besteht. Es wird nicht darauf eingegangen welchen Einfluss es auf die Parameter hat, wenn ein Luftwechsel durch Lüften vorgenommen wird oder wie lange das Lüften dauern sollte. Denn was bedeutet es zu wissen wann die Luft schlecht ist, wenn man nicht weiß wie man damit umgehen soll. Dies soll mit dem in dieser Arbeit entwickelten System weiter untersucht werden.

Kapitel 4

Anforderungen an das System

4.1 Anforderungskatalog

Im Folgenden sollen funktionale Anforderungen an das System definiert werden, welche zum einen die aufgedeckten Forschungslücken beinhalten und zum anderen den Umfang des zu entwickelnden Systems festzulegen. Zur Identifizierung werden diese mit dem Kürzel *FA* (Funktionale Anforderung) und einer fortlaufenden Nummer versehen. Diese sollen nach der Entwicklung des Prototypen evaluiert werden, um die Gebrauchstauglichkeit des Systems auszuwerten und um später mögliche Verbesserungen zu benennen. Zusätzlich soll damit sichergestellt werden das die Forschungsfragen beantwortet werden.

4.1.1 Anforderung FA-1

Identifikator	FA-1
Beschreibung	Das System muss eine Vorhersage treffen können, wann ein Grenzwert überschritten wird.
Zielsetzung	Der Machine Learning Server soll die gesammelten Daten eines Sensors aus der Datenbank auslesen können und anhand der Daten den Zeitpunkt einer Grenzwertüberschreitung vorberechnen. Dieser Zeitpunkt soll dem Server übermittelt werden.
Priorität	Hoch
Anmerkung	Um eine Vorhersage treffen zu können muss analysiert werden, welche Einflüsse es auf die Raumluft gibt und wie sich diese auf die Luft auswirken.

Tabelle 4.1: Detaillierte Spezifikation der Anforderung FA-1

4.1.2 Anforderung FA-2

Identifikator	FA-2
Beschreibung	Das System soll eine Vorhersage darüber treffen, wie lange ein Lüftungsvorgang zu einem gewissen Zeitpunkt dauern sollte.
Zielsetzung	Anhand von aktuellen Daten und Prognosen der Wetter-API soll der Machine Learning Server ein Modell trainieren, welches die Dauer eines Lüftvorgangs vorhersagen kann. Diese Dauer wird dem Server und dann dem Client übermittelt.
Priorität	Hoch
Anmerkung	Mit der Prognose der Lüftungsdauer soll ein unnötig langes oder zu kurzes Lüften vermieden werden. Je nach Außenwetter kann somit ein zu starkes Abfallen/Ansteigen der Raumtemperatur vermieden werden oder die Dauer der Störung durch Geräusche von außen reduziert werden.

Tabelle 4.2: Detaillierte Spezifikation der Anforderung FA-2

4.1.3 Anforderung FA-3

Identifikator	FA-3
Beschreibung	Das System muss den Nutzer rechtzeitig über einen vorzunehmenden Luftwechsel informieren.
Zielsetzung	Um über den Tag ein möglichst optimales Raumklima beizubehalten, muss der Nutzer wissen, wann er lüften sollte. Dazu soll vor dem Zeitpunkt der Überschreitung eines Grenzwerts darüber informiert werden, wann diese Überschreitung erfolgen wird.
Priorität	Mittel
Anmerkung	Der Nutzer muss so informiert werden, dass klar ist was dieser wann zu machen hat. Zusätzlich sollen Informationen darüber bereit gestellt werden, warum ein Luftwechsel erforderlich ist und ggf. warum der Zeitpunkt so gewählt wurde.

Tabelle 4.3: Detaillierte Spezifikation der Anforderung FA-3

4.1.4 Anforderung FA-4

Identifikator	FA-4
Beschreibung	Das System soll für eine große Anzahl an Nutzern ausgelegt werden.
Zielsetzung	Um das System für eine größere Nutzerbasis anwendbar zu machen soll dieses mit einem Nutzermanagement ausgestattet werden. Es soll möglich sein, dass Nutzer sich und ihre Sensoren registrieren und diese ortsunabhängig verwenden können.
Priorität	Mittel
Anmerkung	Um dies zu gewährleisten, sollen Datenverwaltung und Datenverarbeitung auf externen Servern erfolgen. Die Sensoren sollen Daten ausschließlich an den Server senden, der Client soll als Schnittstelle zwischen dem Server und dem Nutzer dienen.

Tabelle 4.4: Detaillierte Spezifikation der Anforderung FA-4

Kapitel 5

Konzept

In diesem Kapitel soll ein Konzept für das zu entwickelnde Benachrichtigungssystem vorgestellt werden. Die in *Kapitel 4* vorgestellten Anforderungen sollen im Konzept erfüllt werden und dieses später prototypisch entwickelt werden.

5.1 Gesamtsystem

Das System soll aus den sechs folgenden Komponenten bestehen:

- Arduino inkl. Sensoren
- Wetter API
- Server
- Machine Learning Server
- Datenbank
- Client

Der Arduino misst mittels seiner Sensoren die Werte der Raumluft. Diese werden an den Server übertragen, welcher die Daten dann in einer Datenbank speichert. Des weiteren sollen Wetterprognosen, aus einer API, abgefragt und ebenfalls in der Datenbank abgespeichert werden. Ein Machine Learning Server soll, auf Anfrage des Servers, Daten aus der Datenbank lesen, verarbeiten und dem Server übermitteln. Als Nutzerschnittstelle soll ein Client dienen. Dieser erhält die relevanten Daten vom Server.

Auf jede dieser Komponenten und deren Funktion soll im Folgenden tiefer eingegangen werden.

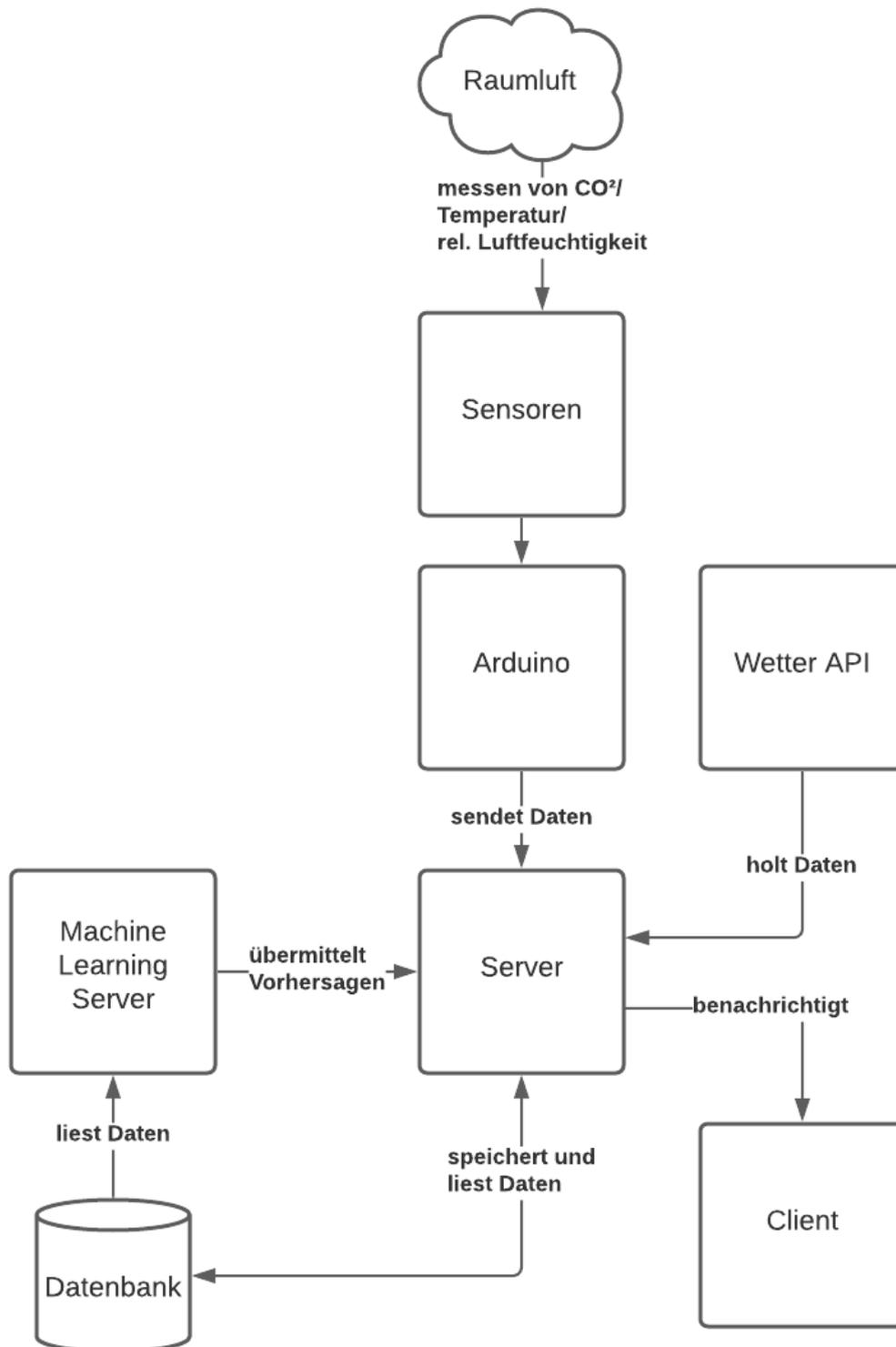


Abbildung 5.1: Grafische Darstellung der Systemkomponenten und deren Zusammenspiel

5.2 Datenermittlung

Bei der Ermittlung der Daten soll auf zwei Komponenten zurückgegriffen werden. Zum einen sollen CO_2 , Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit im Raum mit einem Arduino gemessen werden und an den Server übermittelt werden. Um die Werte zu messen wird dieser mit den nötigen Sensoren ausgestattet. Weiter sollen Außenluftwerte in die Vorhersagen einbezogen werden. Dafür soll eine Wetter-API verwendet werden.

Um das System für mehrere Nutzer zugänglich zu machen, muss es möglich sein das Nutzer sich im System registrieren und ihre Sensoren hinterlegen. Jeder der Sensoren muss dafür eindeutig identifizierbar sein. Weiter ist es notwendig den Standort der Sensoren zu hinterlegen damit die dazugehörigen Außenwetterdaten der Wetter-API abgerufen werden können.

5.3 Kommunikation zwischen Sensoren und dem Server

Die Sensoren müssen in der Lage sein, eine Verbindung zum Server aufzubauen, dafür ist eine Internetverbindung zwingend notwendig. Im Folgenden sollen zwei Varianten erläutert werden, wie die Sensoren eine Verbindung zum Server aufbauen können um die gemessenen Daten zu übertragen.

5.3.1 Variante 1

Auf der einen Seite gibt es die Variante, Sensoren mittels USB-Verbindung an einen PC mit Internetverbindung anzuschließen. Dies würde jedoch erfordern, dass der Sensor dauerhaft an einen eingeschalteten Computer mit Internetverbindung angeschlossen ist.

5.3.2 Variante 2

Alternativ könnte der Sensor mit einer eigenständigen Internetverbindung via WLAN ausgestattet werden. Jedoch würde diese Variante eine externe Stromquelle für den Sensor erfordern.

Verbindungsaufbau via WLAN

Zusätzlich muss eine Möglichkeit geschaffen werden, den Sensor mit einem WLAN-Netzwerk zu verbinden. Dafür könnte der Benutzer in einem vom Sensor erstellten WLAN-Netzwerk, eine Eingabemaske aufrufen und die Verbindungsdaten zu seinem WLAN eingeben. Der Sensor müsste diese dann speichern und anschließend eine Verbindung zum WLAN-Netzwerk des Nutzers aufbauen.

Verbindungsaufbau via Bluetooth

Die Eingabe der eigenen WLAN-Daten könnte alternativ auch via Bluetooth und einer Smartphone-App vorgenommen werden. Dafür wäre allerdings neben dem WLAN-Modul für den Sensor ein weiteres Bluetooth-Modul notwendig. Zusätzlich müssten Smartphone-Apps für die gängigen Smartphone-Betriebssysteme entwickelt werden.

5.4 Datenverarbeitung am Server

Eines der wichtigsten Elemente des Systems ist der Server. Auf diesem kommen die Daten der Sensoren an, welche später mit den abgefragten API-Daten in der Datenbank abgespeichert werden müssen. Dafür soll eine Schnittstelle zum Empfangen der Daten entwickelt werden. Zusätzlich soll der Server in regelmäßigen Abständen die Außenwetterdaten aktualisieren.

Anhand des aktuellen Zustands der Raumluft soll ein Wertverlauf vom Machine Learning Server abgefragt werden und an den Client übermittelt werden. Aus dem Wertverlauf soll zusätzlich ermittelt werden, wann ein Grenzwert überschritten werden würde. Um das Lüften zu optimieren, muss der Server vom Machine Learning Server eine Vorhersage erhalten wie lange der Lüftvorgang dauern sollte um die Raumluftqualität zu optimieren. Zuletzt soll der Client über Lüftdauer informiert werden.

5.5 Datenverwaltung der Datenbank

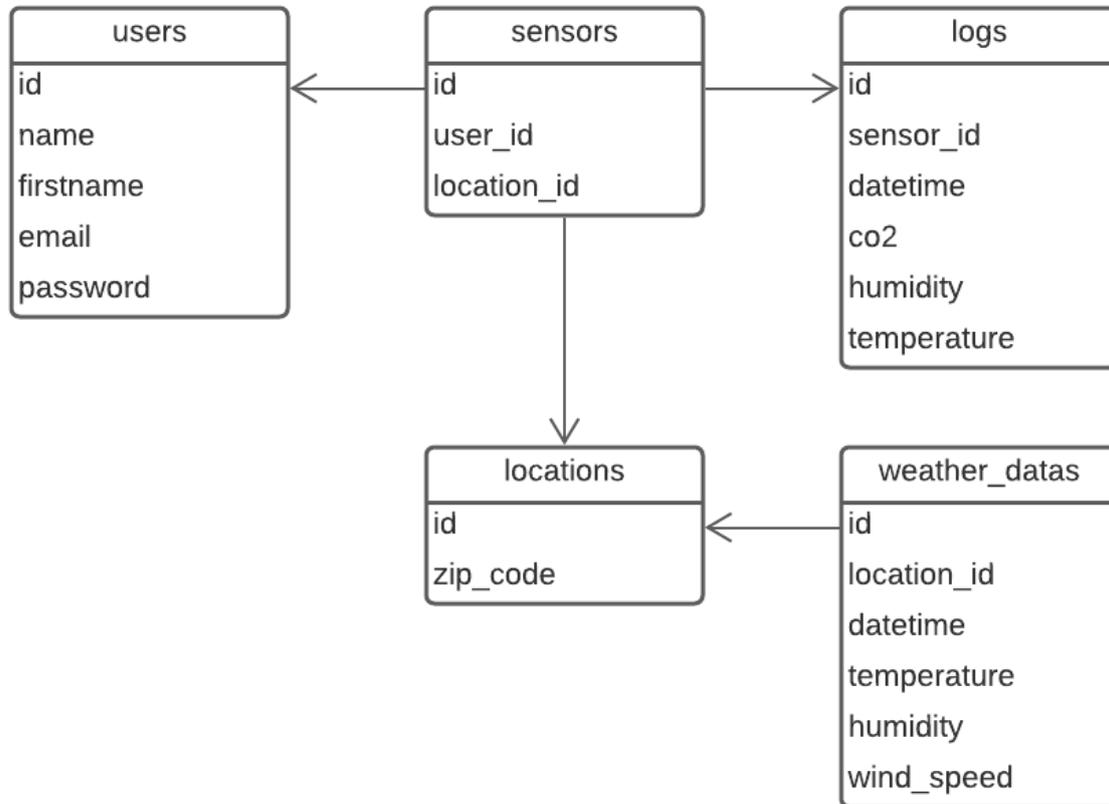


Abbildung 5.2: Grafische Darstellung des Datenbankentwurfs

5.5.1 users

Die *users*-Entität soll die Daten der Nutzer enthalten. Dafür notwendig sind Vor- und Nachname des Nutzers selbst sowie seine E-Mail-Adresse und ein von ihm gesetztes Passwort, um sich später am Client anmelden zu können. Die Nutzer stehen in einer One-to-Many Beziehung zu den Sensoren damit jeder Nutzer auch mehrere Sensoren nutzen kann.

5.5.2 sensors

Die *sensors*-Entität enthält die ID seines Nutzers sowie die ID seines Standortes welcher für die API-Abfrage des Servers notwendig ist. Die Sensoren stehen in einer One-to-Many Beziehung mit den aufgezeichneten *logs* und den *locations*.

5.5.3 logs

Bei der *logs*-Entität handelt es sich um die von den Sensoren aufgezeichneten Raumwerte. Diese enthalten die ID des Sensors, der die Daten aufgezeichnet hat, den Zeitpunkt mit Datum und Uhrzeit sowie CO₂-, relative Luftfeuchtigkeit- und Temperaturwerte.

5.5.4 weather_datas

Die *weather_datas*-Entität enthält die von der Wetter-API abgerufenen Außenwetterdaten und deren Zeitpunkt. Zusätzlich wird auf den Standort über die *location_id* referenziert. Die *weather_datas* stehen in einer One-to-Many Beziehung mit den *locations*.

5.5.5 locations

Sofern es mehrere Sensoren an einem Standort gibt, sollen deren Wetterdaten nicht mehrmals aus der API abgefragt werden und redundant gespeichert werden. Deshalb soll mit der *locations*-Entität jeder Standort nur einmal hinterlegt werden. Für die API wird als Ortsangabe die Postleitzahl des Ortes verwendet und diese ist in der Spalte *zip_code* enthalten.

5.6 Vorhersagen des Machine Learning Servers

Der Machine Learning Server soll als Hauptaufgabe Vorhersagen über Wertverläufe im Raum und die Dauer eines Luftwechsels machen. Dafür ist es notwendig das dieser Daten aus der Datenbank liest und aus ihnen Modelle trainiert. Auf Anfrage des Servers sollen die Vorhersagen berechnet und an diesen übermittelt werden.

5.7 Nutzerschnittstelle Client

Der Client soll als Schnittstelle zwischen dem System und dem Nutzer dienen. Er soll vom Server historische Daten erhalten und diese visualisiert dem Nutzer des Systems darstellen. Zusätzlich sollen über den Client die Benachrichtigungen übermittelt werden wann und wie lange gelüftet werden soll. Als weitere Aufgabe müssen Nutzer sich und ihre Sensoren über den Client registrieren und anmelden können.

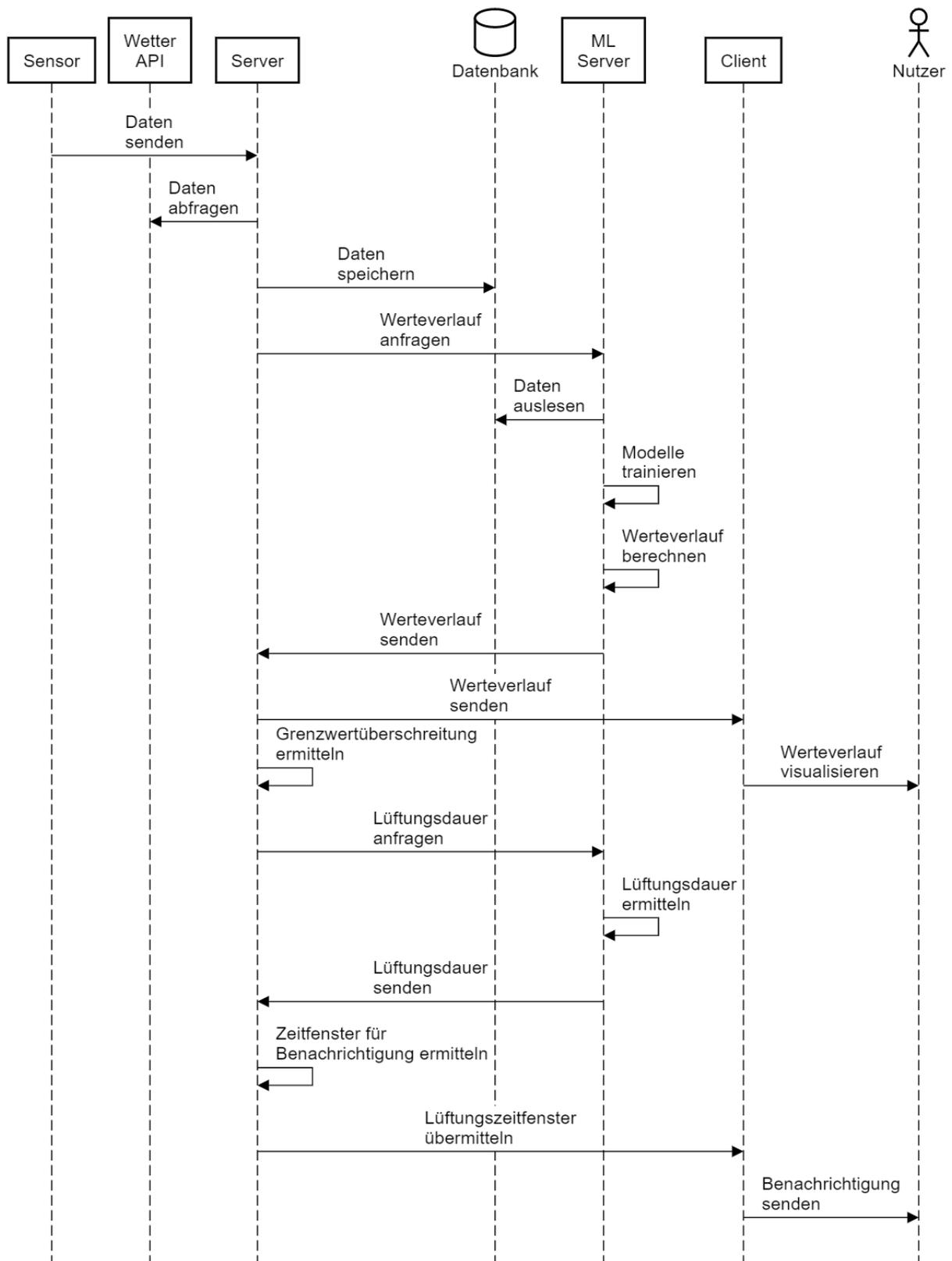


Abbildung 5.3: Grafische Darstellung des Systemkonzepts

Kapitel 6

Entwicklung des Benachrichtigungssystems

Mithilfe des, in *Kapitel 5* erstellten, Konzeptes soll in diesem Abschnitt die prototypische Implementierung vorgestellt werden. Zuerst soll in *Abschnitt 6.1* ein Überblick über das Gesamtsystem gegeben werden und in *Abschnitt 6.2* darauf eingegangen werden wie und womit die Daten ermittelt werden. In *Abschnitt 6.3* wird dann das Zusammenspiel der Systemkomponenten näher erläutert. Zuletzt soll in *Abschnitt 6.4* die Nutzerschnittstelle vorgestellt werden.

6.1 Übersicht Gesamtsystem

Wie in *Kapitel 5* beschrieben, besteht das System aus:

- Arduino-Sensormodule
- Wetter-API von *OpenWeather*
- Server implementiert mit *Node.js*
- Machine Learning Server implementiert mit *Flask*
- *MySQL*-Datenbank
- Client implementiert als Webanwendung mit *Vue.js*

In den nächsten Abschnitten soll nun die Umsetzung der einzelnen Aufgaben der Systemkomponenten aufgezeigt werden.

6.2 Ermittlung der Daten

Für diese Arbeit sind sowohl Innenluft- als auch Außenluftdaten erforderlich. Für die Ermittlung wird auf zwei verschiedene Komponenten zurückgegriffen. Die Innenwerte sollen von einem Sensormodul bestehend aus einem Arduino und Sensoren gemessen

werden, die Außenwerte werden aus einer Wetter-API abgerufen. In den beiden folgenden Abschnitten soll die genauere Umsetzung erläutert werden.

6.2.1 Raumlufte

Um die Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und die CO_2 -Konzentration der Raumlufte zu bestimmen wurde ein Arduino mit zwei Sensoren ausgestattet.

Ein DHT22-Sensor misst mittels kapazitivem Feuchtigkeitsfühler und Heißleiter die Temperatur und Luftfeuchtigkeit der Umgebungslufte und gibt die Daten über ein digitales Signal aus. Er hat einen Temperaturmessbereich von -40 bis 80 °C mit einer Messgenauigkeit von $\pm 0,5$ °C. Der Luftfeuchtigkeitsbereich liegt bei 0 bis 100% mit einer Messgenauigkeit von $\pm 2\%$ relativer Feuchte.

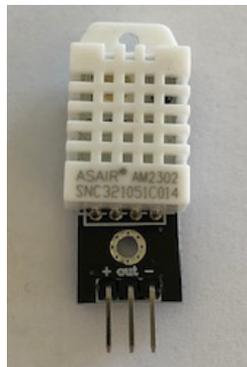


Abbildung 6.1: DHT22-Sensor



Abbildung 6.2: MH-Z19B-Sensor

Die Kohlenstoffdioxid-Messung erfolgt durch einen MH-Z19B-Sensor. Er misst mithilfe des NDIR-Prinzips (Non-Dispersive Infrarot) das Vorhandensein von CO_2 in der Luft. Er hat einen Messbereich von 400 - 5000 ppm und hat eine Messgenauigkeit von ± 50 ppm $+3\%$ des gemessenen Wertes.

Die Implementierung des Arduino-Sensors wurde mithilfe der Arduino IDE (Integrierte Entwicklungsumgebung) und der Programmiersprache C vorgenommen. Aus Kostengründen wurde bei dem Prototypen auf eine eigenständige Internetverbindung des Sensors verzichtet, stattdessen werden die Daten über eine serielle Schnittstelle an ein Python-Script übergeben, welches die Weiterleitung an den Server übernimmt.

Für die Messung werden in einer Schleife beide Sensoren ausgelesen und die Werte auf die serielle Schnittstelle geschrieben. Die Schleife wird alle zwei Minuten wiederholt (siehe Abbildung 6.3).

Das Python-Script baut eine Verbindung zur seriellen Schnittstelle auf und verwirft alle Eingaben in seinem Puffer. In einer weiteren Schleife werden die gelesenen Daten an den Server gesendet. Für die Implementierung des Python-Scripts werden die Bibliotheken *pySerial* und *Requests* verwendet.

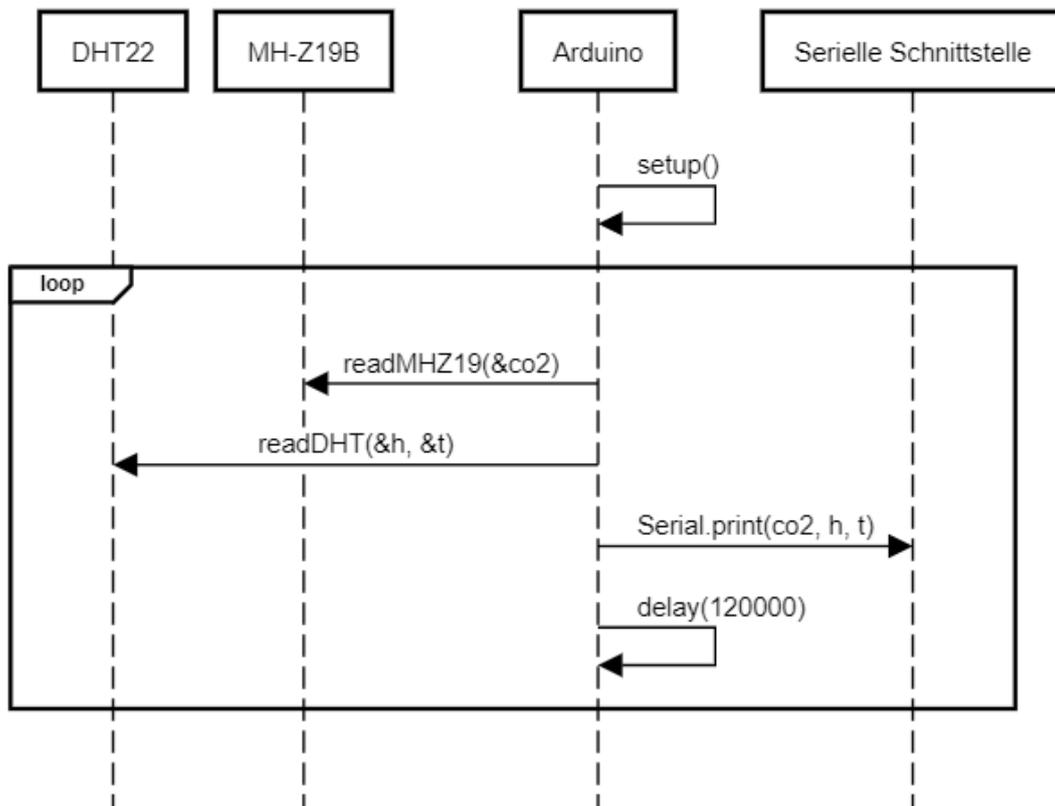


Abbildung 6.3: Vereinfachte Darstellung des Ablaufs der Sensormessung

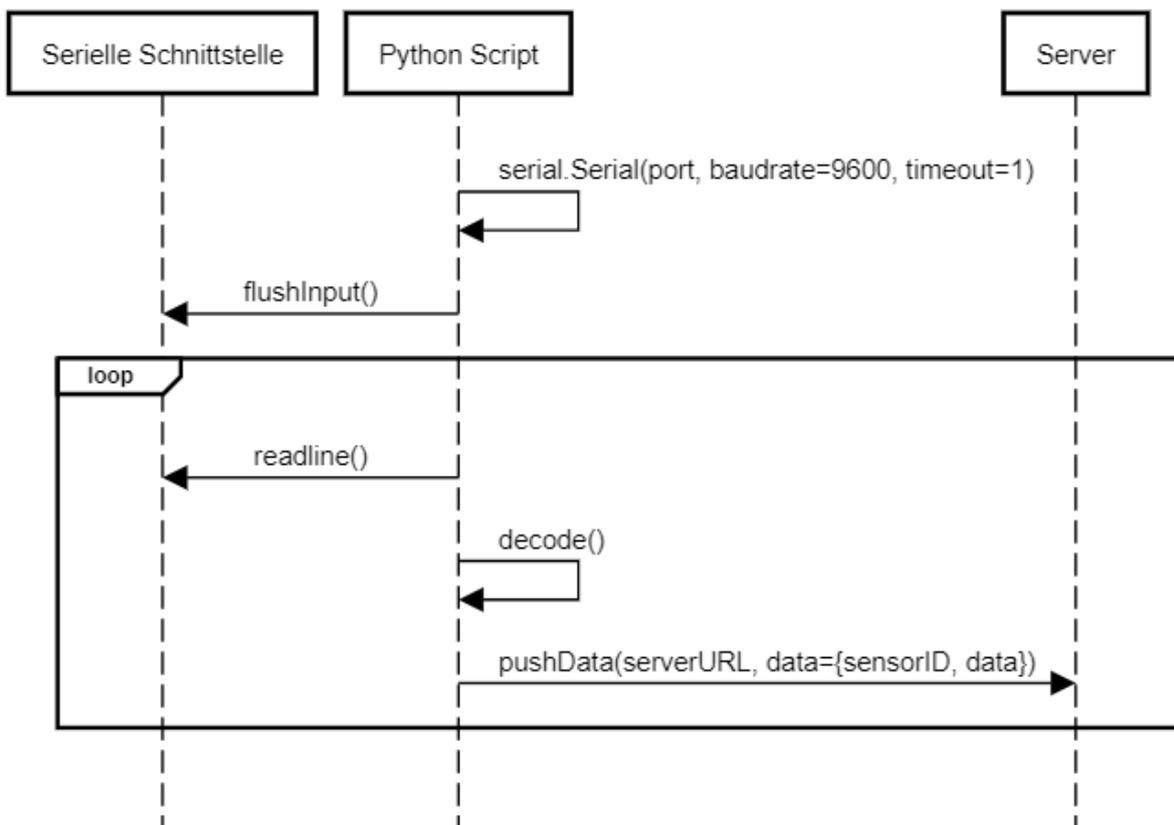


Abbildung 6.4: Vereinfachte Darstellung des Ablaufs der Datenübertragung mittels Pythonscript

6.2.2 Außenluft

Um auf Außenluftdaten zugreifen zu können wird auf die Wetter-API von *OpenWeather* zugegriffen, welche unter <https://openweathermap.org/api> erreichbar ist. *OpenWeather* bietet verschiedene APIs für Wetterdaten, Wettervorhersagen und historischen Wetterdaten an. Diese sind überwiegend kostenpflichtig, jedoch steht die Schnittstelle für Vorhersagen in drei Stunden Schritten kostenlos zur Verfügung.

Um die Außenwetterdaten im System zu aktualisieren wird, für jeden im System hinterlegten Standort, täglich eine API-Abfrage durchgeführt. Die Daten werden dann vom Server in der Datenbank abgelegt um diese für die Prognosen nutzbar zu machen.

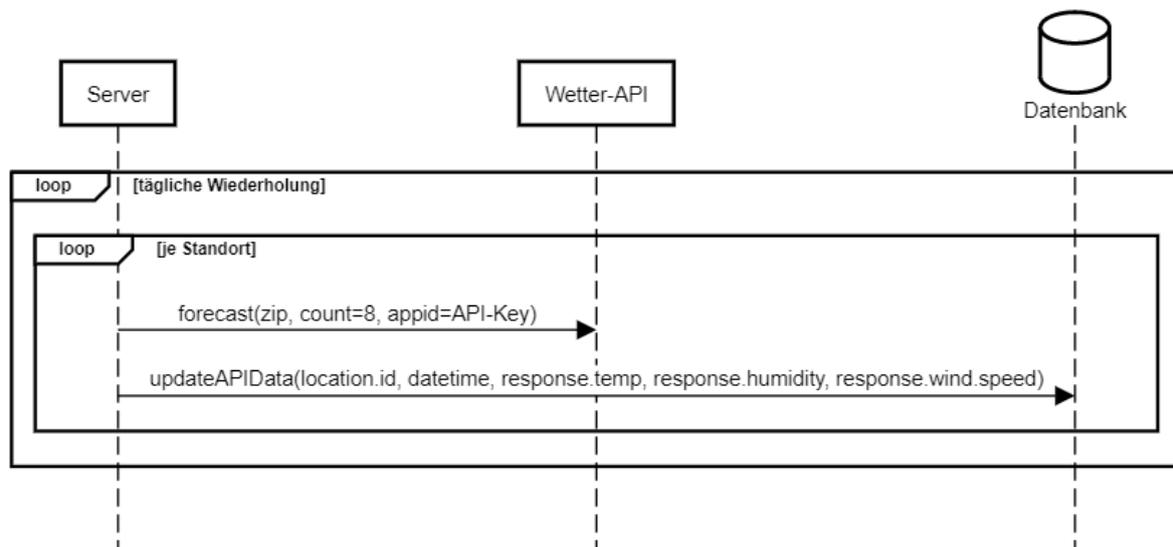


Abbildung 6.5: Vereinfachte Darstellung des Ablaufs der API-Abfrage

6.3 Datenverarbeitung

In diesem Kapitel soll näher auf die Datenverarbeitung eingegangen werden. In *Unterabschnitt 6.3.1* wird erläutert, wie der Zeitpunkt der Grenzwertüberschreitung ermittelt wird. *Unterabschnitt 6.3.2* beschreibt die Schritte, die notwendig für die Prognose der benötigten Luftwechseldauer sind.

6.3.1 Zeitpunkt von einer Grenzwertüberschreitung ermitteln

Um den Zeitpunkt der Grenzwertüberschreitung festzustellen, muss zunächst analysiert werden, wie die Werte sich im Raum verhalten. Anhand der während der Entwicklung aufgezeichneten Daten wurde schnell klar, dass der rasche Anstieg des CO₂-Wertes im Raum der Hauptgrund für Luftwechselbedarf sein wird. Zusätzlich ist eine kontrollierte Veränderung der Temperatur und Luftfeuchtigkeit durch einfaches Lüften schwer möglich. Dies liegt daran, dass die Luft im Raum zwar rasch abkühlt, Wände und Möbel im Raum kühlen jedoch nicht so rasch ab und geben dann ihre Wärme an die Luft ab. Dies liegt nach Ranft und Frohn (2004) an der Wärmekapazität

einzelner Stoffe. Zwar haben Luft und Beton etwa dieselbe spezifische Wärmekapazität ($c = 1000 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$), jedoch ist die Masse der Luft im Raum wesentlich geringer als die der Wände. Ein langes Lüften, um effektiv die Temperatur zu verändern würde daher sehr lange Lüftungsintervalle erfordern. Bei sehr hohen oder niedrigen Außentemperaturen ist es jedoch nicht erstrebenswert den Raum gleich zu temperieren.

Um die Luftfeuchtigkeit in einem gesunden Bereich zu halten ist es ausreichend regelmäßig zu Lüften. Dem Umweltbundesamt (2017) nach soll vor allem bei Baufeuchte und der daraus resultierenden Schimmelbildung verstärkt gelüftet werden. Dies erfolgt bereits bei regelmäßigem Lüften.

Demnach wurde sich bei der Entwicklung des Systems darauf konzentriert den CO_2 -Wert und die damit einhergehenden Schadstoffe im Raum gering zu halten sowie durch regelmäßiges Lüften Schimmelbildung zu verhindern.

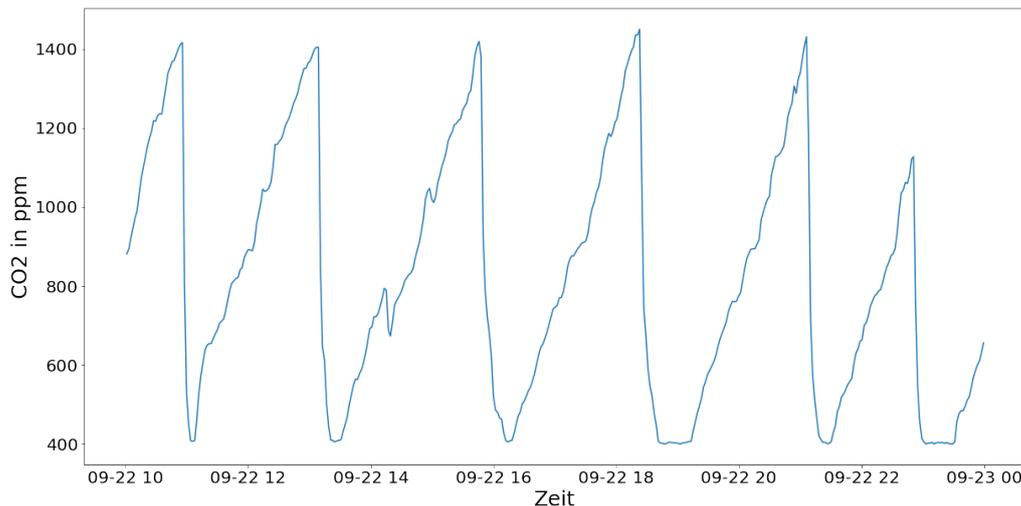


Abbildung 6.6: CO_2 -Konzentration im Raum bei regelmäßigem Lüften

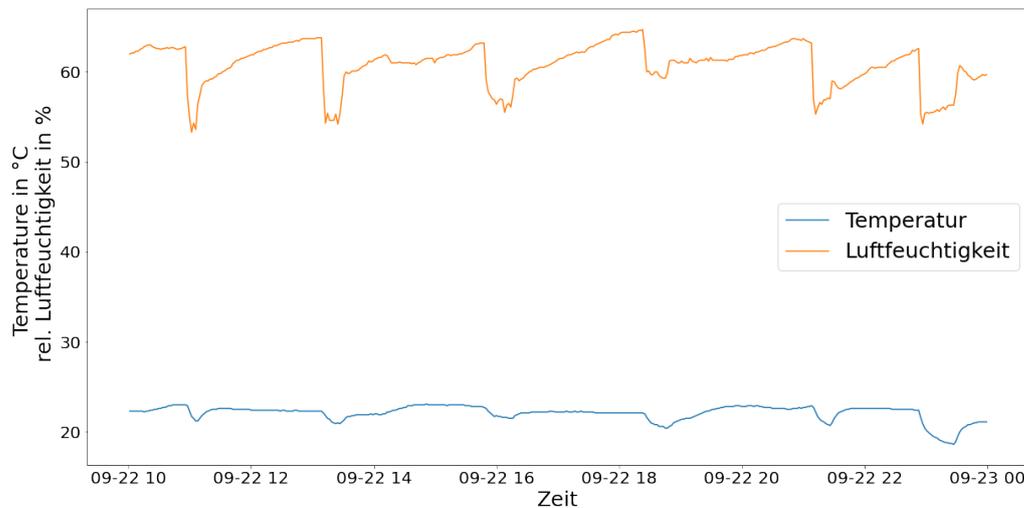


Abbildung 6.7: Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit im Raum bei regelmäßigem Lüften

Eine Vorhersage darüber zu treffen, wann der CO_2 -Wert einen gewissen Wert hat, erfordert zu wissen, wie der Wert ansteigen wird. Wie in *Abschnitt 2.2* beschrieben ist der Mensch die Hauptquelle für CO_2 in Innenräumen. Je nach Aktivität steigt der Wert schneller an, werden Türen oder Fenster geöffnet sinkt der Wert. Geht man nun davon aus, dass die Menschen im Raum eine gleichbleibende Aktivität ausführen, so ist deren CO_2 -Emission gleichbleibend. Als unberechenbarer Störfaktor stellte sich eben genannte Türöffnung heraus, wodurch eine exakte Vorhersage unmöglich ist. Im Machine-Learning gibt es den Bereich der Zeitreihenprognose. Dieser befasst sich mit Vorhersagen von zukünftigen Werten basierend auf vorhandenen Zeitreihen, also Sammlungen von Beobachtungen, die sich über einen bestimmten Zeitraum erstrecken (Hirschle, 2020, S. 12). Jedoch wäre für einen Machine-Learning-Ansatz erforderlich die Ursache für die Veränderung des CO_2 -Werts in den Daten abzubilden. Da dies in diesem System nicht vorgesehen ist, wurde ein alternativer Ansatz entwickelt, um den Anstieg zu prognostizieren.

Um nun den Anstieg zu ermitteln, muss der nächstmögliche minimale CO_2 -Wert ermittelt werden. Die Datenaufbereitung und Vorhersage wurde mit der Programmiersprache Python entwickelt. Für die Datenaufbereitung wurden die Bibliotheken *Pandas*, *Numpy* verwendet. Die Vorhersage wurde mit der Bibliothek *scikit-learn* umgesetzt.

```
1 def getStartingIndex(df):
2     # Wenn gerade gelüftet wird return None
3     if df["co2"].diff().iloc[-1] < 0:
4         return None
5
6     # Iteriere rückwärts über die Daten
7     for index, value in df["co2"].diff()[::-1].items():
8         # Hole die letzten 2 Werte
9         lastValues = df["co2"].diff().iloc[index-2:index]
10
11         # Prüfe ob der CO2-Wert bei den
12         # letzten 2 Zeitpunkten gesunken ist
13         if (value < 0 and (lastValues < 0).all()):
14             # returne den Zeitpunkt bei dem
15             # der Wert das erste mal steigen wird
16             return index+1
17
18     # Wenn kein Lüftungsvorgang existiert
19     # starte bei erstem Eintrag
20     return 0
```

Listing 6.1: Ermitteln des letzten minimalen CO₂-Werts

Der Anstieg zwischen dem niedrigsten Wert und dem aktuellen Wert kann mit der Zeitdifferenz ins Verhältnis gesetzt werden. Somit erhält man einen durchschnittlichen Anstieg pro Zeitintervall. Da in diesem System, Messungen im Abstand von zwei Minuten stattfinden, macht es Sinn den Anstieg in genau diesen Schritten zu ermitteln.

Berechnung des mittleren CO₂-Anstiegs:

$$y = \left(\sum_{i=1}^n \frac{x_t}{t_i} \right) / n \quad (6.1)$$

y = mittlerer CO₂-Anstieg
 x_t = CO₂-Wert zum Zeitpunkt t_i
 t_i = Zeitpunkt

```
1 def predictNextCO2(data, timestamps):
2     # Breche ab wenn weniger als 1 Wert
3     # zur Verfügung steht
4     if len(data) > 1:
5         # Zeitdifferenz als Int-Wert
6         timedelta = (
7             np.diff(timestamps)
8             .astype('timedelta64[m]')
9             .astype(int)
10        )
11
12        # Berechne Mittelwert:
13        mean = ((np.diff(data) / timedelta) * 2).mean()
14
15        # Breche ab wenn der Mittelwert
16        # kleiner als 1 ist
17        if mean <= 1:
18            return False
19
20        currentCO2 = data[-1]
21
22        # Addiere Mittelwert zu aktuellem Wert
23        # um eine CO2-Wert für nächsten Zeitpunkt
24        # zu erhalten
25        nextCO2 = currentCO2 + mean
26
27        return nextCO2
28
29    return False
```

Listing 6.2: Berechnung des nächsten CO₂-Werts

```
1 def predictUntil(data, timestamps, limit):
2     # Berechne nächsten CO2-Wert
3     nextCO2 = predictNextCO2(data, timestamps)
4
5     # füge nächsten CO2-Wert zu Daten hinzu
6     data = np.insert(data, len(data), nextCO2)
7
8     # füge Zeitstempel für nächsten CO2-Wert hinzu
9     timestamps = np.insert(
10         timestamps,
11         len(timestamps),
12         timestamps[-1:] + np.timedelta64(2, 'm')
13     )
14
15     # Wenn kein Fehler aufgetreten ist
16     # wiederholung bis Grenzwert erreicht ist
17     if nextCO2:
18         if nextCO2 < limit:
19             return predictUntil(data, timestamps, limit)
20         else:
21             return data
22
23     # Wenn bei der Berechnung ein Fehler aufgetreten ist
24     # gib leeres Numpy-Array zurück
25     return np.empty([0])
```

Listing 6.3: Berechnung der nächsten CO₂-Werte bis der Grenzwert erreicht wurde

Sofern nun der CO₂-Wert am Steigen ist, lassen sich die nächsten Werte vorberechnen und somit die Dauer bis zum Erreichen eines Grenzwerts ermitteln.

6.3.2 Prognose der benötigten Luftwechseldauer

Um eine Vorhersage über die benötigte Lüftungsdauer treffen zu können benötigt man zunächst die Faktoren, die den Luftwechsel beeinflussen. Wie in *Abschnitt 2.2* bereits erwähnt, spielen die Temperaturdifferenz zwischen Innenraum- und Außenluft und der am Fenster anliegende Winddruck eine Rolle. Als Grundlage sollen die Sensordaten, für Innenwerte, und die API-Daten, für Außenwerte, dienen.

Zunächst muss aus den vorliegenden Daten ein Datensatz bestehend aus Lüftungsintervallen erstellt werden. Hierfür müssen Start- und Endpunkt eines Luftwechsellvorgangs ermittelt werden.

```
1 # Starte mit Suche nach erstem fallenden Wert
2 # um den Startpunkt eines Lüftvorgangs zu finden
3 increasing = True
4 states = {"increasing": [], "decreasing": []}
5
6 # Iteriere über CO2-Differenzen
7 for index, value in df["co2"].diff().items():
8     # Ignoriere ersten NaN Wert
9     if not math.isnan(value):
10        # Während der CO2 Wert steigt
11        # suche nach dem Ersten fallenden Wert
12        if increasing:
13            if value < 0:
14                # Wechsle zu Suche nach
15                # steigenden Wert
16                increasing = False
17                # Speichere Index des
18                # letzten steigenden Wert
19                states["increasing"].insert(
20                    len(states["increasing"]),
21                    index - 1
22                )
23        # Während der CO2 Wert fällt suche nach
24        # dem ersten steigenden Wert
25        elif not increasing:
26            if value > 0:
27                # Wechsle zu Suche
28                # nach sinkenden Wert
29                increasing = True
30                # Speichere Index des
31                # letzten sinkenden Wert
32                states["decreasing"].insert(
33                    len(states["decreasing"]),
34                    index - 1
35                )
```

Listing 6.4: Ermittlung der Indizes der Daten vor und nach dem Lüften

Im nächsten Schritt werden die Daten, vor und nach dem Lüften, zu einem Datensatz bestehend aus der Zeitdifferenz, CO₂-Differenz, Temperaturdifferenz der Raum- und Außenluft sowie der Windgeschwindigkeit am Standort generiert. Da die Daten dem aktuellen Raumzustand entsprechen kann es sein, dass der letzte Datensatz ungültige Werte enthält, da keine Werte für den Zeitpunkt nach dem Lüften vorhanden sind. Dieser Datensatz muss entfernt werden.

```
1 # Datensatz mit den Werten vor dem Lüften
2 df_increase = df[[
3     "datetime",
4     "co2",
5     "temperature_in",
6     "temperature_out",
7     "wind_speed"
8 ]].loc[states["increasing"]]
9 df_increase.index = range(len(df_increase))
10
11 # Datensatz mit den Werten nach dem Lüften
12 df_decrease = df[
13     ["co2", "datetime"]
14 ].loc[states["decreasing"]]
15 df_decrease.index = range(len(df_decrease))
16
17 # Erstelle Datensatz mit:
18 # Delta CO2, Delta t,
19 # Delta T, und Windgeschwindigkeit
20 df_combined = pd.DataFrame({
21     "delta_co2":
22         df_increase["co2"] - df_decrease["co2"]
23 })
24
25 # Umrechnung von Sekunden zu Minuten
26 df_combined["delta_t"] = (
27     df_decrease["datetime"] - df_increase["datetime"]
28 ).dt.total_seconds() / 60
29
30 df_combined["delta_T"] = pd.to_numeric(
31     abs(
32         df_increase["temperature_in"]
33         - df_increase["temperature_out"]
34     ),
35     downcast="float"
36 )
37
38 df_combined["wind_speed"] = df_increase["wind_speed"]
39
40 # Wenn nicht gerade gelüftet wird
41 # enthält der letzte Datensatz NaN-Werte.
42 # Diese werden entfernt.
43 if len(states["increasing"]) > len(states["decreasing"]):
44     df_combined = df_combined.iloc[:-1]
```

Listing 6.5: Zusammensetzen der Datensätze

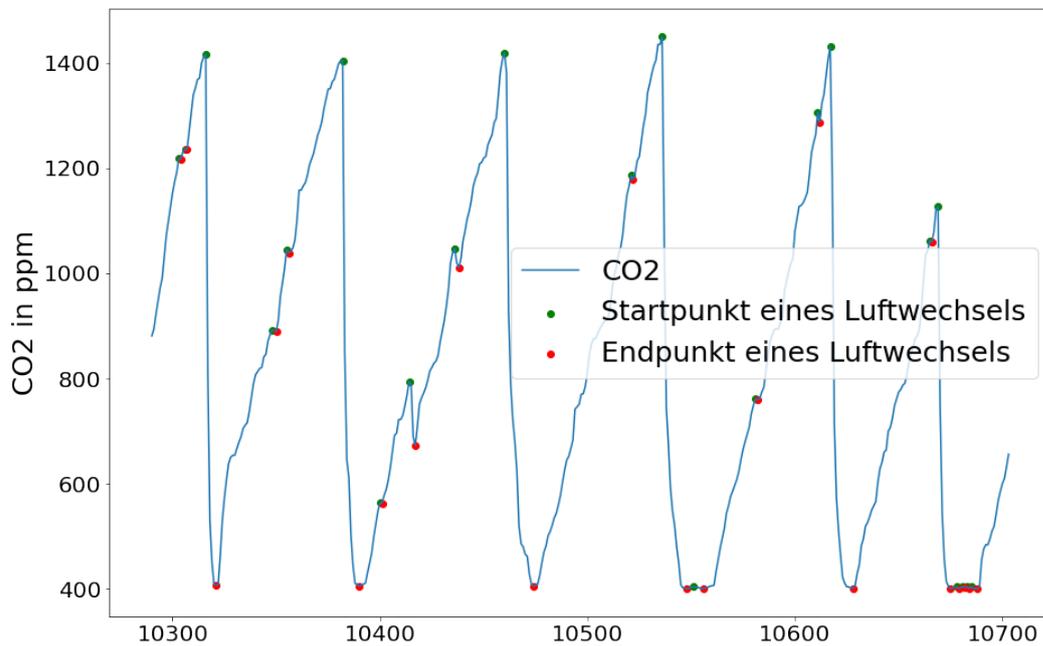


Abbildung 6.8: Exemplarische Visualisierung der Start- und Endzeitpunkte von Luftwechselintervallen

Wie in *Abbildung 6.8* zu sehen ist, sind Datensätze mit geringen CO_2 -Schwankungen vorhanden, erkennbar an den geringen Abständen zwischen dem grünen und roten Punkt, welche vor allem dann auftreten, wenn das Fenster nach Erreichen eines CO_2 -Wertes von ca. 400 ppm geöffnet bleibt oder die Tür geöffnet wurde. Diese müssen vor dem Trainieren des Modells noch entfernt werden. Zuletzt werden Trainings- und Testdatensätze für die Vorhersage der benötigten Lüftungsdauer erstellt.

```
1 # Initiale Scaler zum normieren der Daten
2 scaler = StandardScaler()
3
4 # Entferne Lüftungsperioden die länger als 2h sind
5 df = df[df["delta_t"] < 120]
6 # Entferne Lüftungsperioden deren CO2-Differenz
7 # kleiner als deren Dauer ist
8 df = df[df["delta_co2"] > df["delta_t"]]
9 # Entferne Lüftungsperioden die kürzer als 4 Minuten sind
10 df = df[df["delta_t"] > 4]
11
12 X = df[[
13     "delta_T",
14     "delta_co2",
15     "wind_speed"
16     ]].values.tolist()
17
18 # Normiere X-Daten
19 scaler.fit(X)
20 X = scaler.transform(X)
21
22 y = df["delta_t"].values.tolist()
23
24 # Erstelle Trainings- und Testdatensatz
25 X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(
26     X,
27     y,
28     test_size=0.3,
29     random_state=42
30 )
```

Mit den erstellten Trainingsdatensätzen wurden nun verschiedene Machine-Learning-Modelle trainiert und mit den Testdaten bewertet. Auf die genauere Bewertung möchte ich in *Kapitel 7* eingehen, letztlich habe ich mich dafür entschieden den *Random-Forest*-Algorithmus zu verwenden.

Ein *Random-Forest* ist ein Klassifizierer der aus einer Sammlung von leicht unterschiedlichen Entscheidungsbäumen besteht. Er gibt vor wie die Entscheidungsbäume generiert werden und kombiniert diese, um das bestmögliche Ergebnis zu liefern. Der *Random-Forest* hat eine hohe Genauigkeit, ist sehr schnell und kann sich nicht Überanpassen. Ein weiterer Vorteil ist, dass er die Bedeutung von individuellen Variablen bestimmen kann. Des Weiteren kann der Algorithmus mit stetigen, wie auch kategorischen Variablen umgehen. (Liu et al. (2012))

Bei der Entwicklung des Prototypen wurde festgestellt, dass die Menge der Daten

einen entscheidenden Einfluss auf die Genauigkeit der Vorhersage hat. Vor allem durch die Abhängigkeit vom Außenwetter und deren unterschiedlich oft auftretenden Zuständen (z.B. hohe Windgeschwindigkeiten), kann dies bei geringen Datenbeständen zu ungenauen Vorhersagen führen. Daher trainiert der Prototyp das Model immer wieder erneut. In späteren Versionen sollte ab einer gewissen Datenmenge weniger häufig trainiert werden. Da die Vorhersage unabhängig von Raumgröße, Fenstergröße und Anzahl der Fenster ist, muss für jeden Raum ein separates Model trainiert werden.

6.4 Unterstützung der Nutzer

Nachdem die benötigten Werte berechnet werden können, müssen diese dem Nutzer hilfreich präsentiert werden. Um dies möglichst plattformunabhängig umzusetzen wurde eine Webanwendung mit dem JavaScript-Webframework *Vue.js* entwickelt. Die Nutzer sollen auf ihren Geräten, Informationen über die aktuellen und historischen sowie zukünftigen Zustände der Raumluft erhalten und rechtzeitig über zu unternehmende Schritte informiert werden. In *Unterabschnitt 6.4.1* wird auf die Umsetzung der Visualisierung eingegangen. Abschließend soll in *Unterabschnitt 6.4.2* die Implementierung der Benachrichtigung erläutert werden.

6.4.1 Visualisierung

Um den Nutzer schnell und einfach einen Überblick über die Raumluftqualität zu geben, wird auf eine Visualisierung durch ein Liniendiagramm gesetzt. Die Implementierung des Diagramms wurde mit der Bibliothek *JSCharting* umgesetzt. Der Nutzer hat in der Oberfläche die Möglichkeit auszuwählen welche Sensordaten im Diagramm angezeigt werden sollen und kann zusätzlich das Datum der zu visualisierenden Daten wählen. Um mehrere Tage angezeigt zu bekommen, kann ein Datumsbereich gewählt werden. Die Eingabe des Datums ist durch ein Datumseingabefeld der Bibliothek *V-Calendar* einfach und intuitiv realisiert.

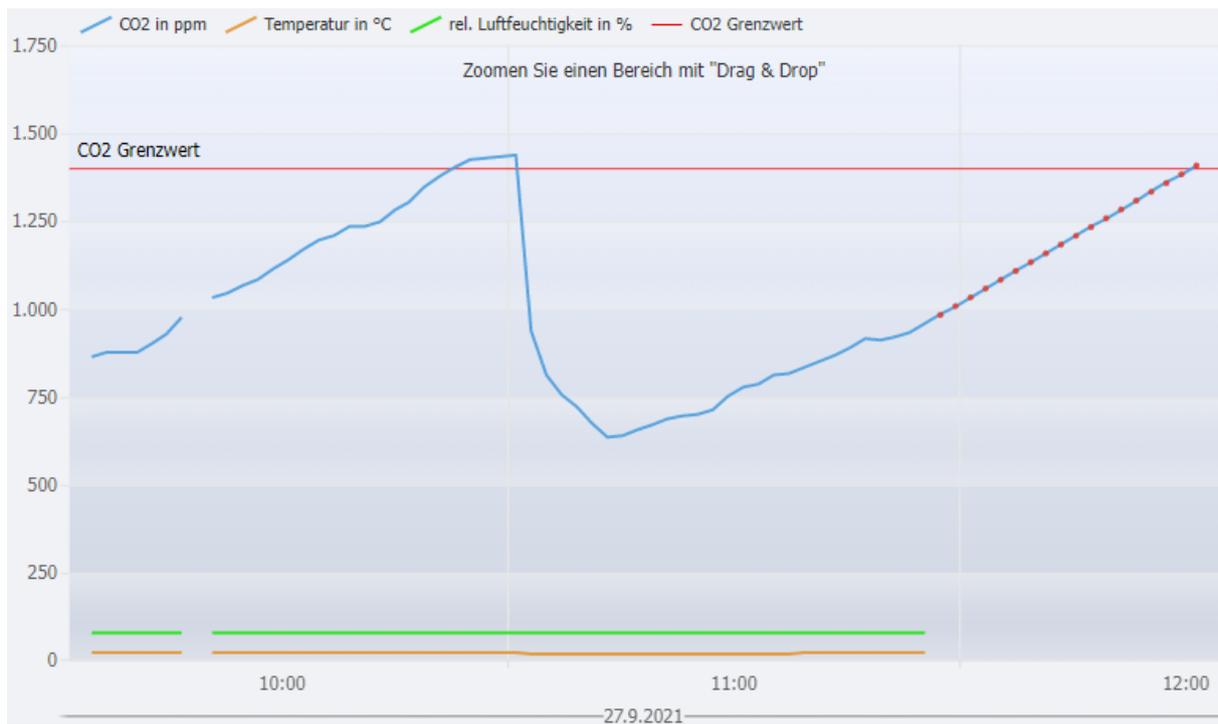


Abbildung 6.9: Visualisierung der Werte in der Benutzeroberfläche

Das Diagramm zeigt standardmäßig die Daten des aktuellen Tages sowie den CO_2 -Grenzwert. Über eine interaktive Legende können dann einzelne Werte ausgeblendet werden, um die Anzeige weiter zu vereinfachen. Wenn der Maus-Zeiger auf einen Punkt gesetzt wird, erscheint eine Anzeige mit den Daten des zugehörigen Zeitpunktes. Eine Zoom-Funktion soll eine genauere Betrachtung eines bestimmten Zeitraums erleichtern. Sofern der aktuelle Tag ausgewählt ist, wird die Vorhersage des steigenden CO_2 -Werts in das Diagramm integriert.

6.4.2 Benachrichtigung

Zur Unterstützung durch Benachrichtigungen sollen Push-Nachrichten versendet werden. Es gibt drei verschiedene Benachrichtigungen. Etwa 30 Minuten vor dem Erreichen des Grenzwertes soll der Nutzer darauf aufmerksam gemacht werden, dass in Kürze eine Handlung erforderlich ist. Diese Nachricht wird ca. alle 10 Minuten versendet. Da die Prognose über den Zeitpunkt der Grenzwertüberschreitung durch z.B. Türöffnung verfälscht werden kann, soll dies durch das wiederholte Benachrichtigen mit der aktualisierten Vorhersage korrigiert werden.

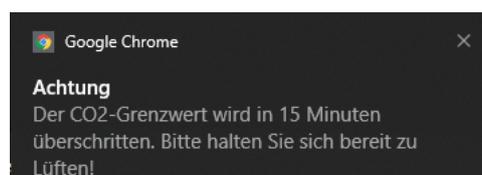


Abbildung 6.10: Push-Nachricht vor dem Erreichen des Grenzwerts mit dem Browser GoogleChrome

Die zweite Benachrichtigung soll zum Zeitpunkt der Grenzwertüberschreitung versendet werden. Sie soll den Nutzer darauf aufmerksam machen, dass jetzt gehandelt werden soll. Sofern die Nachricht ignoriert oder übersehen wurde wird diese wiederholt versendet, sobald das System registriert, dass keine Verbesserung erfolgt ist.

Sobald der Raum ausreichend gelüftet ist, soll der Nutzer mit einer dritten Nachricht darüber informiert werden, dass der Lüftvorgang ausreichend war und das Fenster wieder geschlossen werden kann.

Kapitel 7

Evaluierung

In diesem Kapitel soll der in *Kapitel 6* entwickelte Prototyp evaluiert werden. Dafür wird überprüft ob die funktionalen Anforderungen aus *Kapitel 4* erfüllt werden. Abschließend soll ein Fazit gezogen werden.

7.1 Auswertung der implementierten Anforderungen

In diesem Abschnitt sollen die in *Kapitel 4* definierten Anforderungen mit dem Ist-Zustand des Prototypen verglichen werden. Zusätzlich sollen die Algorithmen zur Prognose auf ihre Genauigkeit untersucht werden.

7.1.1 Anforderung FA-1

In *Anforderung FA-1* wurde gefordert, dass das System Vorhersagen darüber treffen kann, wann ein Grenzwert überschritten wird. Wie in *Unterabschnitt 6.3.1* erwähnt, wurde die Prognose der Grenzwerte auf den CO₂-Wert beschränkt, da dieser im Laufe des Tages mehrmals überschritten wird. Sofern der Nutzer den CO₂-Wert durch Lüften senkt, wird die Temperatur und Luftfeuchtigkeit an die Außenwerte angepasst. Bei extremen Außenverhältnissen ist eine Verbesserung durch reines Lüften nicht möglich. Die Genauigkeit des Algorithmus zur Prognose der Grenzwertüberschreitung ist von zwei Faktoren abhängig. Auf der einen Seite steigt die Genauigkeit je mehr Messwerte nach dem letzten Lüften aufgezeichnet wurden. Auf der anderen Seite wird ein besseres Ergebnis erzielt, wenn der Zeitpunkt der Grenzwert nahe am aktuellen Zeitpunkt liegt.

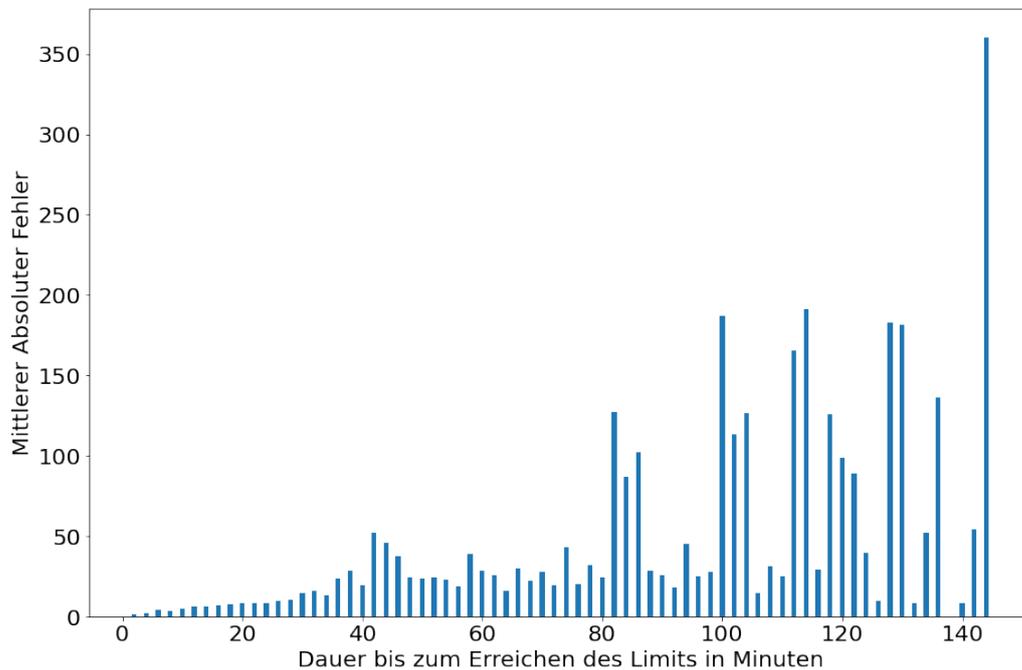


Abbildung 7.1: Visualisierung des mittleren absoluten Fehlers in Abhängigkeit zur realen Dauer bis zum Erreichen des Grenzwerts

In *Abbildung 7.1* wird der mittlere absolute Fehler (MAE), also die Höhe der Abweichung der Vorhersage von der Beobachtung, in Abhängigkeit zur realen Dauer bis zum Erreichen des Grenzwerts gezeigt. Man sieht deutlich dass je ferner der Zeitpunkt ist desto ungenauer wird die Prognose. Da die Vorhersage den steigenden Wert in zwei Minuten Schritten berechnet, sind für zeitlich weit entfernte Grenzwerte mehr Rechenschritte notwendig. Zusätzlich steigt die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer unvorhergesehenen Abweichung des Anstiegs. *Tabelle 7.1* zeigt noch einmal die genauen Werte des mittleren absoluten Fehlers. Da das System den Nutzer ab 30 Minuten vor dem Erreichen des Grenzwertes informiert liegt der maximale mittlere Fehler bei etwa zwölf Minuten. Je näher der Zeitpunkt nun rückt, desto genauer wird dessen Vorhersage.

Dauer bis zum Erreichen des Grenzwerts in Minuten	Mittlerer absoluter Fehler	Dauer bis zum Erreichen des Grenzwerts in Minuten	Mittlerer absoluter Fehler
2	1,17	52	22,45
4	2,32	54	26,78
6	3,71	56	16,2
8	4,40	58	39,02
10	4,90	60	30,90
12	7,16	62	27,92
14	6,01	64	21,61
16	6,86	66	33,11
18	7,64	68	21,18
20	8,34	70	26,25
22	7,88	72	16,76
24	10,95	74	23,30
26	9,64	76	31,62
28	9,79	78	45,90
30	12,27	80	30,35
32	15,39	82	135,44
34	17,45	84	89,23
36	19,2	86	97,09
38	28,0	88	26,11
40	27,26	90	27,27
42	44,43	92	24,0
44	40,75	94	45,57
46	30,83	96	30,2
48	20,73	98	37,8
50	21,55	100	203,77

Tabelle 7.1: Mittlerer absoluter Fehler bei einer Dauer t bis zum Erreichen des Grenzwertes

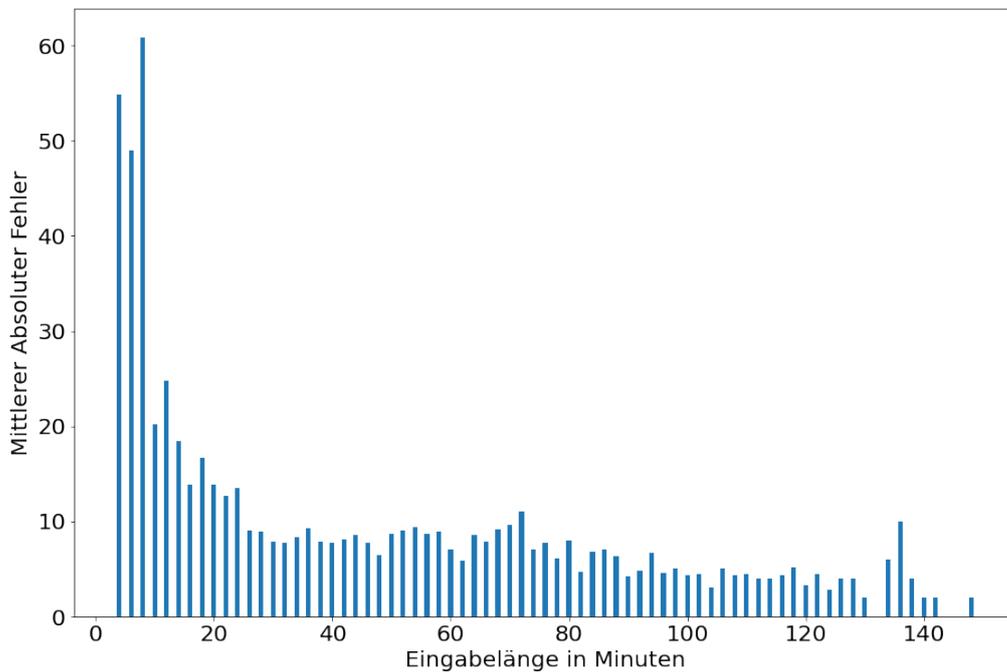


Abbildung 7.2: Visualisierung des mittleren absoluten Fehlers in Abhängigkeit zur Menge der Eingabewerte

Abbildung 7.2 zeigt die Genauigkeit im Verhältnis zur Länge der Eingabedaten. Deutlich erkennbar ist, dass eine Eingabe von Daten unter 16 Minuten, d.h. weniger als acht Messwerte als Eingabe, zu ungenau ist. Bei den, während der Entwicklung, aufgezeichneten Daten ist zu erkennen, dass der Grenzwert etwa alle zwei Stunden überschritten wird. Davon ausgehend wird erst bei einer Eingabe von mehr als 90 Messwerten eine Benachrichtigung gesendet, womit die Genauigkeit der Prognose als ausreichend gesehen werden kann. In *Tabelle 7.2* sind die genauen Fehlerwerte in Abhängigkeit zur Eingabe aufgelistet.

Länge der Eingabe in Minuten	Mittlerer absoluter Fehler	Länge der Eingabe in Minute	Mittlerer absoluter Fehler
4	44.83	78	6.66
6	74.65	80	6.0
8	55.05	82	4.77
10	37.40	84	2.61
12	24.52	86	5.62
14	19.36	88	4.53
16	14.93	90	6.92
18	13.33	92	6.76
20	12.10	94	5.83
22	12.92	96	5.16
24	13.23	98	5.0
26	10.34	100	3.2
28	8.48	102	4.0
30	9.08	104	2.75
32	9.80	106	3.6
34	9.91	108	3.71
36	8.52	110	7.33
38	8.03	112	2.66
40	8.05	114	3.0
42	8.77	116	1.5
44	9.28	118	4.66
46	7.80	120	6.0
48	8.83	122	2.66
50	9.52	124	2.0
52	8.76	126	3.0
54	8.04	128	4.0
56	9.09	130	5.0
58	7.17	132	2.0
60	6.70	134	7.0
62	7.10	136	2.0
64	10.43	138	3.33
66	9.66	140	1.0
68	8.37	142	2.0
70	10.56	144	2.0
72	8.64	146	0.0
74	8.32	148	2.0
76	7.73		

Tabelle 7.2: Mittlerer absoluter Fehler bei einer Eingabe mit der Dauer t

7.1.2 Anforderung FA-2

Anforderung FA-2 fordert eine Vorhersage über die Dauer eines Lüftungsvorgangs. Wie in Unterabschnitt 6.3.2 erwähnt, wurden zur Prognose verschiedene Modelle trainiert und getestet. Die Bewertung erfolgte anhand des mittleren absoluten Fehlers sowie des Bestimmtheitsmaßes (R^2 -Wert). Der R^2 -Wert beschreibt wie viel Streuung in den Daten durch ein vorliegendes lineares Regressionsmodell „erklärt“ werden kann. Ein perfektes Modell besitzt einen R^2 -Wert von 1,0, während ein Modell das unabhängig von den Eingabeparametern immer den erwarteten Ausgabewert liefert einen Wert von 0 hat.

In *Tabelle 7.3* erkennt man direkt, dass das *Random-Forest*-Modell besser abschneidet als die beiden anderen Modelle. Um den R^2 -Wert zu steigern, müsste vermutlich auf echte Außenwerte zugegriffen werden, da die API-Daten zum einen vorhergesagte Werte sind und sich zum anderen auf den Standort über die Postleitzahl beziehen, die Werte aber schon in einem Ort variieren können. Des Weiteren ist in diesem Modell nicht vorgesehen, dass während dem Lüften ggf. Türen geöffnet werden oder das Fenster nicht richtig geöffnet ist. Eine laufende Heizung unter dem Fenster kann zusätzlich die Luftwechsel beeinflussen. Davon ausgehend ist ein mittlerer absoluter Fehler von etwa fünf Minuten tolerierbar.

Modell	R^2 -Wert	Mittlerer absoluter Fehler
Random-Forest	0,45	5,13
Lineare Regression	0,38	5,98
Entscheidungsbaum	0,11	6,46

Tabelle 7.3: Bewertung der Modelle anhand von R^2 und MAE

7.1.3 Anforderung FA-3

Die durch *Anforderung FA-3* geforderte „rechtzeitige Benachrichtigung“ der Nutzer, ist mithilfe von zwei Typen von Push-Nachrichten umgesetzt worden. Zum einen die wiederholte Benachrichtigung vor dem Erreichen des Grenzwertes, zum anderen eine Benachrichtigung zum Zeitpunkt der Grenzwertüberschreitung.

7.1.4 Anforderung FA-4

Die in *Anforderung FA-4* geforderte Verfügbarkeit für eine große Personengruppe wurde konzeptuell so weit umgesetzt, dass funktional eine Anwendung für multiple Nutzer möglich ist. Beim entwickelten Prototypen beschränkt sich die Umsetzung darauf, dass es möglich wäre mehrere Nutzer zu unterstützen. Die Webanwendung wurde auf eine prototypische Umsetzung eines Registrierungsprozesses für neue Nutzer und einer Anmeldemaske beschränkt.

7.2 Fazit

Durch das in *Kapitel 5* ausgearbeitete Konzept sind alle der in *Kapitel 4* definierten Anforderungen umsetzbar. Der in *Kapitel 6* entwickelte Prototyp erfüllt die Anforderungen *FA-1*, *FA-2* und *FA-3*. Die entwickelten Algorithmen zur Prognose des Zeitpunkts der Grenzwertüberschreitung und der benötigten Luftwechseldauer liefern ausreichend genaue Ergebnisse.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Abschlussarbeit wurde ein Konzept für ein Benachrichtigungssystem entworfen und ein Prototyp entwickelt, der dabei unterstützen soll, eine anhaltend hohe Raumluftqualität durch Lüften zu gewährleisten. Dabei wurde untersucht wie die Raumluftqualität ermittelt werden kann und welche Parameter dabei eine Rolle spielen. Durch den entwickelten Sensor können die Raumluftwerte gemessen werden, welche dann durch einem Server in einer Datenbank gespeichert werden. Damit wurde die Grundlage geschaffen die Qualität der Raumluft zu bestimmen und sogar vorherzusagen. Durch die Anbindung einer Wetter-API können Außenwetterdaten dazu verwendet werden, die benötigte Luftwechseldauer zu prognostizieren. Als Schnittstelle zwischen dem System und Nutzern dient eine Webanwendung. Diese sendet Benachrichtigungen vor und beim Erreichen eines Grenzwerts. Außerdem wird der Nutzer benachrichtigt wenn ein Luftwechsel ausreichend durchgeführt wurde. Zusätzlich werden in der Nutzerschnittstelle aktuelle und historische Daten visuell aufbereitet dargestellt. Das ausgearbeitete Konzept ist darauf ausgelegt, vielen Nutzern eine Unterstützung zur Aufrechterhaltung ihrer Raumluftqualität zu bieten, diese benötigen dabei lediglich einen Zugang zum System und einen Sensor.

In späteren Versionen des Systems sollte die Webanwendungen um weitere Informationen erweitert werden. Unter anderem könnten Außenwetterdaten für die Nutzer interessant sein. Weiter ist zu überlegen ob statt den Arduino-Sensoren nicht etwa tragbare Sensoren in z.B. Smartwatches umsetzbar wären, so könnten die Messungen und Benachrichtigungen über ein Gerät abgewickelt werden und die Nutzer hätten ihren Sensor immer bei sich.

Um die Prognosen weiter zu verbessern könnte die Wetter-API durch ein weiteres Sensor-Modul ersetzt werden. So wären die Daten wesentlich genauer und damit auch die Prognose der Luftwechseldauer. Zusätzlich sollte die Prognose des CO_2 -Anstiegs weiter untersucht werden. Diese beruht in der aktuellen Version darauf, dass der Anstieg keinen großen Schwankungen unterliegt, welche jedoch durch menschliches Verhalten auftreten können.

Literatur

- Bundesamt für Strahlenschutz. (2020). *Was ist ionisierende Strahlung*. Bundesamt für Strahlenschutz. Zugriff 28. Juli 2021 unter <https://www.bfs.de>
- Bundeszentrale für gesundheitliche Aufklärung. (o. D.). *Infektionskrankheiten: Übertragungswege*. Bundeszentrale für gesundheitliche Aufklärung. Zugriff 29. Juli 2021 unter <https://www.infektionsschutz.de/>
- Fanger, P. O. (1994). Mensch und Raumklima. In H. Rietschel & H. Esdorn (Hrsg.), *Raumklimotechnik: Band 1: Grundlagen* (16. Auflage, korrigierter Nachdruck, S. 125–176). Springer.
- Häckel, H. (2021). *Meteorologie* (9., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage). Verlag Eugen Ulmer.
- Hirschle, J. (2020). *Machine Learning für Zeitreihen*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. <https://doi.org/10.3139/9783446468146>
- Kubba, S. (2017). Indoor Environmental Quality. *Handbook of Green Building Design and Construction* (S. 353–412). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810433-0.00007-1>
- Lahrz, T., Bischof, W. & Sagunski, H. (2008). Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden [English Abstract Journal Article]. *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz*, 51(11), 1358–1369. <https://doi.org/10.1007/s00103-008-0707-2>
- Liu, Y., Wang, Y. & Zhang, J. (2012). New Machine Learning Algorithm: Random Forest. In D. Hutchison, T. Kanade, J. Kittler, J. M. Kleinberg, F. Mattern, J. C. Mitchell, M. Naor, O. Nierstrasz, C. Pandu Rangan, B. Steffen, M. Sudan, D. Terzopoulos, D. Tygar, M. Y. Vardi, G. Weikum, B. Liu, M. Ma & J. Chang (Hrsg.), *Information Computing and Applications* (S. 246–252). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34062-8_32
- Ranft, F. & Frohn, B. (Hrsg.). (2004). *Natürliche Klimatisierung*. Birkhäuser Basel. <https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7921-7>
- Saini, J., Dutta, M. & Marques, G. (2020). Indoor air quality prediction systems for smart environments: A systematic review. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 12(5), 433–453. <https://doi.org/10.3233/AIS-200574>
- Seppänen, O. & Fisk, W. (2008). Rentabilität von Verbesserungen des Raumklimas. In K. Fitzner (Hrsg.), *Raumluft- und Raumkühltechnik: Mit 54 Tabellen* (16., völlig überarb. und erw. Aufl., S. 729–754). Springer.

- Tiesler, G., Schönwälder, H.-G., Ströver, F. & Bilek, A. (2009). *Gesundheitsfördernde Einflüsse auf das Leistungsvermögen im schulischen Unterricht: Ein Beitrag zur Ergonomie der Schule* (Bd. 30). Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wiss.
- Umweltbundesamt. (2007). Kohlendioxid und Schimmelpilze in Schulgebäuden – Fragen und Antworten [PII: 378]. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, 50(11), 1467–1469. <https://doi.org/10.1007/s00103-007-0378-4>
- Umweltbundesamt. (2015). *Gegenüberstellung EU-Grenz-/Zielwerte vs. WHO-Empfehlung*. Zugriff 13. August 2020 unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/4640/dokumente/gegenueberstellung_eu_who_empfehlungen.pdf
- Umweltbundesamt. (2017). *Richtig Lüften, Schimmelbildung vermeiden*. Umweltbundesamt. Zugriff 23. September 2021 unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/schimmel/richtig-lueften-schimmelbildung-vermeiden>
- Umweltbundesamt. (2020). *Infektiöse Aerosole in Innenräumen*. Umweltbundesamt. Zugriff 16. Dezember 2020 unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/innenraumluft/infektioese-aerosole-in-innenraeumen>
- von Pettenkofer, M. (1858). *Über den Luftwechsel in Wohngebäuden*. Cotta.

Anhang

Übersicht über elektronische Anhänge:

- Quellcode des implementierten Systems innerhalb der Abschlussarbeit
- Abschlussarbeit in elektronischer Form

Auch zu finden unter: <https://github.com/HelgeKohl/Bachelorarbeit>